

COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ANTE CARGAS DE COMPRESIÓN AGREGANDO EL SRD COMO DISPOSITIVO DISIPADOR DE ENERGÍA, USANDO CAUCHO RECICLADO

BEHAVIOR OF CONCRETE SUBJECTED TO COMPRESSION LOADS INCLUDING THE SRD AS AN ABSORPTION ENERGY DEVICE, USING RECYCLED TIRE SHEETS

Jorge Tovar-Rodríguez^{1*}, Francisco Taipe-Carbajal¹

¹Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil, Universidad Nacional De San Cristóbal De Huamanga, Ayacucho, Perú

Recibido: 08/11/2022

Publicado: 20/12/2023

RESUMEN

En esta investigación se estudió el comportamiento lineal y no lineal del concreto con el objetivo de incrementar la capacidad de absorción de energía histerética para su uso en edificaciones comunes para comunidades de bajos recursos y que se encuentran en zonas de alto peligro sísmico. Se usó caucho reciclado de neumáticos fuera de uso para fabricar el dispositivo disipador de energía, denominado SRD (Dispositivo Acero-Caucho, por sus siglas en inglés) el cual consiste en una serie de capas de caucho de 5mm de espesor y capas de acero de 2mm de espesor, habilitados de forma circular de 5cm de diámetro y puestos uno sobre otro asemejando un “sándwich”. Este dispositivo se colocó al interior de las probetas de concreto. Los especímenes de ensayo fueron de dos tipos: probetas convencionales (sin SRD), denominados como PC y probetas modificadas (con SRD), denominados PM. Se llevaron a cabo ensayos experimentales según el estándar ASTM C469 y complementados con ensayos en elementos finitos mediante un software confiable. Los resultados mostraron que el SRD reduce la resistencia a la compresión en un rango del 13% al 17% y también reduce el módulo de elasticidad en un rango del 3.30% al 10%, ambos respecto a la probeta convencional. Sin embargo, el SRD incrementó la capacidad de disipación de energía en el rango inelástico debido a un incremento en las deformaciones plásticas y un desarrollo progresivo del daño en las probetas modificadas.

Palabras Clave: Neumáticos fuera de uso (NFU), probetas de concreto, resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, disipación de energía

ABSTRACT

In this research the lineal and nonlinear behavior of concrete was studied with the purpose of increasing the hysteretic energy absorption capacity in order it can be used in common buildings for low resources communities and held in highly seismic zones. Recycled tires from disused tires were used to elaborate the energy dissipation device, named SRD (Steel-Rubber Device) which consist of rubber layers of 5mm thickness and steel layers of 2mm thickness, with circular shape of 5cm diameter and put one on another like a “sandwich”. This device was placed inside the concrete samples. The specimens were of two types: conventional samples (without SRD), labeled as PC and modified samples (with SRD), labeled as PM. Experimental tests were carried out according to the standard ASTM C469 and complemented with numerical test on finite element analysis on a reliable software. Results showed that the SRD reduce the compression strength in 13% to 17% range and decrease the modulus of elasticity as well in 3.30% to 10% range, both in relation to the conventional samples. On the other hand, the SRD increased the energy dissipation capacity due to an increase in inelastic deformations and to a gradually damage developing in the modified samples.

Keywords: Disused tires, concrete samples, compression strength, modulus of elasticity, energy dissipation

1. INTRODUCCIÓN

El Perú está ubicado en una de las regiones de mayor sismicidad en el mundo; esto obliga a los códigos de diseño estructural a tener como objetivo el lograr que las estructuras desarrollen una adecuada disipación de energía sin llegar al colapso.

La forma convencional en la que las estructuras de concreto armado disipan la energía cuando estas incursionan en el rango inelástico es mediante energía histerética (responsable directa del daño). Por lo tanto, para lograr el objetivo del diseño sismorresistente se tienen dos opciones: reducir la energía sísmica de entrada al sistema, como el caso de los aisladores sísmico o; aumentar la capacidad de disipación de energía de la estructura.

* Corresponding author.:

E-mail: jorgenx010644@gmail.com

La energía histerética se canaliza en función al esfuerzo interno que predomina en el elemento. Así, mientras en miembros sujetos a flexión la energía disipada será primordialmente la del refuerzo traccionado; en miembros sujetos a compresión axial, el concreto será quien aporte la mayor capacidad de disipación de energía [1]. Esta investigación cae dentro de este último grupo ya que se realizaron pruebas experimentales en probetas de concreto sin refuerzo de acero y sujetas a compresión axial, caso típico de columnas cargadas principalmente a compresión axial.

Actualmente se cuentan con dispositivos como aisladores y amortiguadores, pero estos son muy costosos lo que hace que su empleo sea obligatorio solo en estructuras principales o esenciales. Esto motiva a que se investigue productos similares, pero de menor costo y pensando en edificaciones no esenciales. Estos productos tienden a usar materiales reciclables como es el caucho de Neumáticos Fuera de Uso (NFU).

Un ejemplo es el caucho triturado adicional en la mezcla de concreto, el cual demostró brindar una mayor disipación de energía, pero al mismo tiempo un decremento en la resistencia a la compresión y, por lo tanto, del módulo de elasticidad [2] - [6].

En [7] se observó que incluir caucho triturado a la mezcla de concreto aumenta el amortiguamiento; esto es debido a la degradación de la rigidez que experimenta el elemento. Esta degradación de rigidez se presenta también en las probetas con SRD; sin embargo, el estudio del amortiguamiento no es objeto de esta investigación.

También se desarrollaron prototipos de aisladores sísmicos con caucho reciclado obteniéndose resultados satisfactorios [8], [9].

Así, la presente investigación tiene como objetivo incrementar la capacidad de absorción de energía del concreto mediante la adición del SRD, fabricado a base de caucho reciclado de NFU y planchas de acero.

2. ANTECEDENTES

“Los neumáticos son una parte esencial de la economía de cada país que se basa en el transporte vehicular y/o aéreo para movilizar personas y bienes [...]” [10]; lo que significa no solo la importancia en la sociedad sino también el incremento de neumáticos año tras año. De hecho, se estima que entre el 65% (caso de Europa) y el 75% del caucho producido está destinado a la industria del automóvil [10] - [12]. Así mismo, en las regiones de Asia, Centro y Sudamérica, Oceanía y el Oeste Medio la cantidad de vehículos adquiridos se ha incrementado exponencialmente [10], [13], y por lo tanto también los NFU.

En el Perú, en el año 2003 habían aproximadamente 1.3 millones de vehículos en circulación [14] y en el año 2019 se registró una década de crecimiento continuo del número de vehículos que conformaban el parque automotor, donde se alcanzó una cifra de 6.40 millones de vehículos circulando por el país [15], [16] y que siguió esa tendencia hasta el año 2021 seguido de una reducción de 5.5% el año 2022 [17], siendo la ciudad de Lima la que registra la mayor cantidad de ellos. De igual forma, desde el 2014 hasta el 2018 se registró un incremento de 66.43% en el número de toneladas de neumáticos ingresados al país debido al recambio necesario de estos componentes y que luego serán convertidos a NFU [18]. Esta preocupación llevó a realizar un plan estratégico por parte del Ministerio del Ambiente (MINAM), hasta finalmente publicar el Decreto Supremo N° 024-2021-MINAM [19] para la adecuada gestión y manejo de los NFU siendo considerados un bien priorizado con un tratamiento diferenciado; en tanto que otros países vecinos como Argentina, Chile, Brasil, Ecuador y Colombia ya cuentan con una ley similar desde hace unos años atrás [14].

Los NFU han sido causantes de diversos tipos de contaminación y desastres naturales y/o sociales, tal es el caso del incendio que ocurrió en 2018 en España debido a una acumulación, por más de 15 años, de 70000 a 90000 toneladas de NFU en un vertedero [20]. Por una preocupación medioambiental es que se viene realizando esfuerzos por reutilizar los NFU, por ejemplo: en los campos de fútbol artificiales [21] (lo cual pone en riesgo a las personas) o como teja para techos [22]. Aunque en algunos países desarrollados existe la tecnología para reciclar hasta el 100% de los NFU, esto es algo aún imposible para los países en “vías de desarrollo” dado su complejidad tanto a nivel tecnológico como cultural [23].

Por otro lado, en el planeta hay muchas zonas de alto peligro sísmico como son la costa del pacífico y zonas de Asia. Desafortunadamente, muchos países en “vías de desarrollo” y que no cuentan con la tecnología para sobrellevar los terremotos se ubican en estas zonas y sufren pérdidas económicas y, sobre todo, humanas; casos como los de Chile, Indonesia, Nepal, Perú, etc.; donde predomina la autoconstrucción [24], [25]. En el caso de Perú se estima que, de ocurrir un evento sísmico grande, este sería de entre 8.5Mw y 8.8Mw [26]. Dharam Vir [27] menciona que aproximadamente el 50% de las viviendas en los países en vías de desarrollo son autoconstruidas y que el 75% de las muertes ocurren debido al colapso de este tipo de estructuras. De este escenario parte la preocupación de desarrollar elementos que mejoren el desempeño de este tipo de estructuras, que al mismo tiempo sean de bajo costo y haciendo uso de materiales reciclables como el caucho de NFU.

3. METODOLOGÍA

La investigación se dividió en dos partes: ensayo experimental y ensayo analítico. Primero se ejecutó el ensayo experimental en 12 especímenes de concreto, preparados de forma intencional para los propósitos de esta investigación; los datos obtenidos a partir de este sirvieron para realizar el ensayo analítico en el programa Abaqus. El objetivo es incrementar la capacidad de absorción de energía en el rango inelástico del concreto esperando a su vez una reducción de la resistencia a la compresión y del módulo de elasticidad. Para lograr este objetivo, se fabricó los SRDs (dispositivo acero – caucho, por sus siglas en inglés) el cual consiste en una serie de capas de caucho de 5mm de espesor y planchas de acero de 2mm de espesor, habilitados de forma circular de 5cm de diámetro y puestos uno sobre otro asemejando un “sándwich”. Este dispositivo se colocó al interior de las probetas de concreto.

El espesor de las planchas de acero es la que se encuentra de forma comercial; en tanto que el espesor del caucho adoptado es lo que un NFU provee como material útil, ya que el desgaste y en algunos casos, la malla de acero presente en el neumático, imposibilitan su uso. El diámetro del SRD fue considerado de 5 cm afín de no reducir en más de 1/3 la dimensión a cada lado de las probetas, siendo que estas tienen un diámetro de 15 cm. Con esa configuración, obtenemos un elemento simétrico en forma.

Las propiedades mecánicas y físicas del acero y del caucho están definidas en las tablas I y II, respectivamente. El caucho se consideró como un material incompresible, esta característica está definida por su ratio volumétrico en la tabla II.

TABLA I

Características mecánicas y físicas del acero usado

Propiedad	Unidad	Valor
Densidad	Kg/m ³	7850
Módulo de elasticidad	N/m ²	2E11
Módulo de Poisson		0.20

TABLA II

Características mecánicas y físicas del caucho usado

Propiedad	Unidad	Valor
Densidad	Kg/m ³	1076
Módulo de corte	N/m ²	1.0379E6
Ratio volumétrico		1.0

Uno de los principales inconvenientes con el caucho es su poca o nula adherencia con el concreto; esto se puede mejorar mediante tratamientos que van desde lavarlos con agua o con una pasta de cemento y agua, hasta aditivos químicos que se colocan al caucho para mejorar esta adherencia [6]. Para esta investigación, las zonas laterales del caucho son las que se encuentran expuestas al concreto y se les trató solo lavándolos con

agua y las planchas de acero colocados por debajo y por encima sirven como materiales adherentes con el concreto ya que las planchas poseen estrías (ver Fig. 1, 2 y 3).

La interface caucho-acero, se puede mejorar mediante vulcanización haciendo uso de una pasta de caucho para tener una mejor adherencia entre estos materiales. En este trabajo el SRD fue fabricado con el caucho y acero tal y como se obtuvieron sin ningún tratamiento en la interface.

Las probetas ensayadas son de dos (02) tipos: probeta convencional (PC, sin SRD) y probetas modificadas (PM, con SRD), y a su vez estas se sub dividen en tres (03) tipos: PM1, PM2 y PM3, los cuales contienen una, dos y tres capas de caucho entre dos planchas de acero, respectivamente. En la Fig. 1 se muestra la estructura del SRD y su ubicación dentro de la probeta, así como la configuración de cada probeta para ser ensayada.

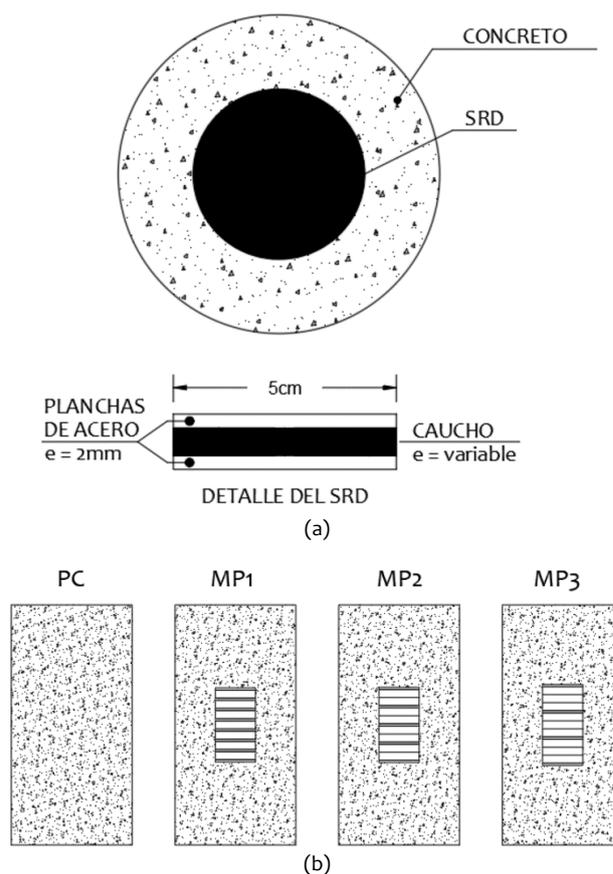


Fig. 1. Estructura y ubicación del SRD en las probetas de concreto (a) y configuración de cada espécimen de ensayo (b).

3.1. ENSAYO EXPERIMENTAL

HABILITACIÓN DE MATERIALES

El acero fue de plancha estriada con el propósito de darle mayor adherencia con el concreto. Sin embargo,

el objetivo principal del acero es de evitar un contacto mayor de superficie entre el caucho y el concreto. El caucho se obtuvo a partir de Neumáticos Fuera de Uso (NFU) los cuales fueron habilitados de forma circular al igual que las planchas de acero (Fig. 2). Los agregados grueso y fino se consiguieron de la zona de Chacco, en la región Ayacucho; y el cemento fue del tipo I. En la Fig. 3. se muestran los SRD los cuales fueron de tres tipos como se vio en la Fig. 1.



(a)



(b)

Fig. 2. Habilitación de las planchas de acero (a) y las capas de caucho de NFU (b).



(a)

Fig. 3. Fabricación de los SRD para los especímenes: PM1 (a), PM2(b) y PM3 (c).



(b)



(c)

Fig. 3. (continuación)

ENSAYO DE ROTURA DE PROBETAS

El ensayo de rotura se realizó en el equipo universal siguiendo el estándar ASTM C469 [28]. Para registrar la deformación y resistencia se usaron galgas extensiométricas colocadas a mitad de la altura de las probetas (Fig. 4) ya que en esa zona se generan esfuerzos uniaxiales mientras que en los extremos se generan esfuerzos triaxiales. Una probeta típica preparada lista a ser ensayada se muestra en la Fig. 5.

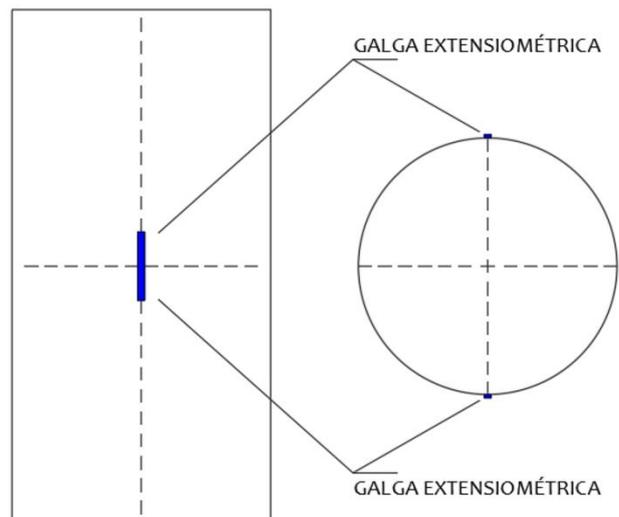


Fig. 4. Ubicación de las galgas extensiométricas en los especímenes de ensayo.



Fig. 5. Especimen de ensayo en el laboratorio.

En la Fig. 6 se observa las formas de falla de las probetas ensayadas en donde se aprecia una clara diferencia entre la probeta PC y las probetas PM. Estas últimas experimentan un tipo de falla con fisuración gradual antes de llegar a la falla, momento en que el concreto queda desecho alrededor del SRD, mientras que el concreto por encima y debajo de este queda intacto.



(a)



(b)

Fig. 6. Falla de los especímenes de concreto: a) PC, b) PM1, c) PM2, d) PM3



(c)



(d)

Fig. 6. (continuación)

No se realizaron ensayos adicionales al estándar ASTM C469; los resultados obtenidos de la prueba experimental fueron después empleados para el análisis en elementos finitos de los especímenes de concreto para obtener la energía disipada y el desarrollo del daño.

3.2. ENSAYO ANALÍTICO

Se usó el programa Abaqus para representar el ensayo experimental para observar el efecto del SRD en la distribución de los esfuerzos; así como el daño en las probetas y los desplazamientos plásticos.

Para definir las propiedades elásticas del concreto se usó los resultados obtenidos del ensayo experimental. El daño se definió por el modelo constitutivo “Concrete Damage Plasticity” (CDP) cuyos parámetros se muestran en la tabla III [29].

TABLA III
Parámetros que definen el modelo CDP

$\Psi(^{\circ})$	λ	f_{b0}/f_{c0}	K	μ
30	0.10	1.16	0.6667	0.0005

Nota: Algunos parámetros del CDP. [29].

Donde ψ , ángulo de expansión y λ , excentricidad; son parámetros relacionados a la función de flujo de la superficie de fluencia. K es el parámetro que controla la superficie de fluencia; f_{b0} es la resistencia a la compresión biaxial del concreto; f_{c0} es la resistencia a la compresión uniaxial del concreto; μ es el parámetro de viscosidad definido por el modelo CDP [29].

El comportamiento del concreto en compresión se definió por modelo de Mander para concreto no

confinado [30], tomando como parámetros los resultados obtenidos en el ensayo experimental. Así mismo, el comportamiento en tensión fue definido mediante el modelo propuesto por el FIB 2010 [31]; el cual define una respuesta bilineal para la relación esfuerzo – abertura de fisuración (w) mediante las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_{ct} = f_{ctm} * \left(1.0 - 0.8 \frac{w}{w_1}\right), \text{ para } w \leq w_1$$

$$\sigma_{ct} = f_{ctm} * \left(0.25 - 0.05 \frac{w}{w_1}\right), \text{ para } w_1 \leq w \leq w_c$$

Donde:

$$w_1 = G_F / f_{ctm}, \text{ cuando } \sigma_{ct} = 0.20 f_{ctm}$$

$$w_c = 5G_F / f_{ctm}, \text{ cuando } \sigma_{ct} = 0$$

G_F es la energía de fractura definido como $G_F = 73f_{cm}^{0.18}$; siendo f_{cm} , la resistencia a la compresión del concreto. f_{ctm} , es la resistencia a tracción del concreto definido como $f_{ctm} = 0.30 * f_{ck}^{2/3}$ para concretos de resistencia menor a 50Mpa, siendo f_{ck} la resistencia característica a compresión del concreto de peso normal.

El comportamiento del caucho se caracterizó mediante el modelo constitutivo de Yeoh para definir la hiperelasticidad [32]. El modelo de Yeoh se basa en la siguiente ecuación de energía potencial de deformación:

$$W = \sum_{i=1}^3 C_{i0} (\bar{I}_1 - 3)^i + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^{2i}$$

Donde el primer sumando es la contribución de los efectos desviadores y el segundo sumando es la contribución de los efectos volumétricos. J, es el ratio volumétrico antes y después de la deformación; \bar{I}_1 , es la primera invariante del tensor de deformación de Cauchy-Green; C_{i0} y D_i , son parámetros de correlación. Se consideró al caucho como material incompresible.

Los parámetros para definir el modelo de Yeoh se muestran en la tabla IV, tomado de [32] para un caucho obtenido de la zona externa de la llanta de un camión.

TABLA IV
Parámetros que definen el modelo constitutivo de Yeoh

C_{10} (Mpa)	C_{20} (Mpa)	C_{30} (Mpa)	D_1	D_2	D_3
0.51895	-0.292015	0.17925	0.00	0.00	0.00

Nota: Coeficientes de Yeoh, forma de Abaqus, modelo de material. [32].

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

En la tabla V se muestra la resistencia a la compresión (f_c) alcanzada por cada espécimen en el que se puede apreciar una reducción de entre el 13% al 17%, no encontrándose influencia del mayor o menor número de capas de caucho añadidas.

TABLA V
Resistencia a la compresión de cada espécimen de ensayo

Probeta	f_c (N/m2) $\times 10^7$	Promedio (N/m2) $\times 10^7$	% respecto a PC
PC-01	3.789		
PC-02	3.597	3.625	100.00
PC-03	3.490		
PM1-01	3.077		
PM1-02	2.917	3.000	82.76
PM1-03	3.006		
PM2-01	3.087		
PM2-02	3.176	3.147	86.82
PM2-03	3.180		
PM3-01	3.046		
PM3-02	3.364	3.107	85.72
PM3-03	2.911		

Nota: Elaboración propia.

4.2. MÓDULO DE ELASTICIDAD

En la tabla VI se muestra el módulo de elasticidad (E_c) alcanzada por cada espécimen en el que se puede apreciar una reducción de entre el 3.30% al 10% no encontrándose influencia del mayor o menor número de capas de caucho añadidas.

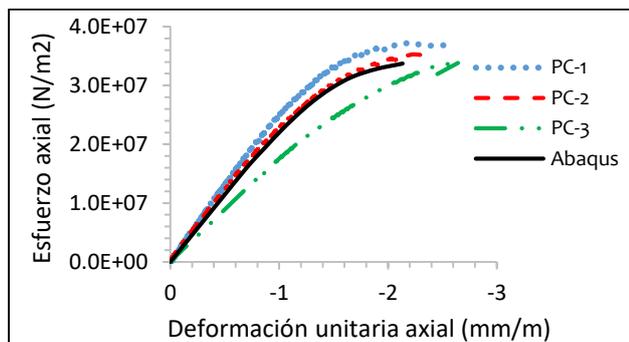
TABLA VI
Módulo de Elasticidad de cada espécimen de ensayo

Probeta	E_c (N/m2) $\times 10^{10}$	Promedio (N/m2) $\times 10^{10}$	% respecto a PC
PC-1	2.671		
PC-2	2.374	2.287	100.00
PC-3	1.815		
PM1-1	1.906		
PM1-2	2.234	2.184	95.51
PM1-3	2.412		
PM2-1	1.989		
PM2-2	2.201	2.058	89.99
PM2-3	1.983		
PM3-1	2.131		
PM3-2	2.331	2.211	96.69
PM3-3	2.171		

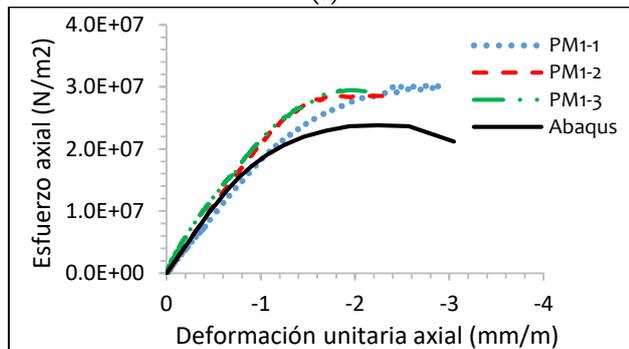
Nota: Elaboración propia.

4.3. GRÁFICOS ESFUERZO – DEFORMACIÓN

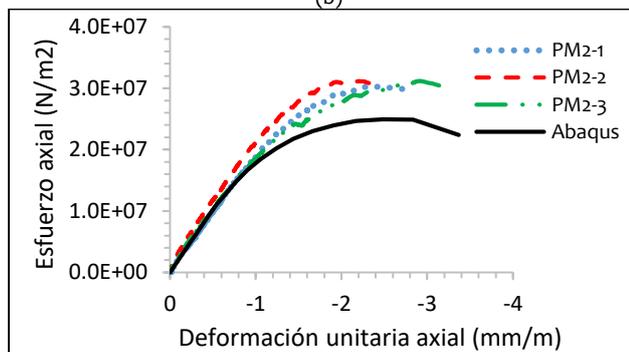
En la Fig. 7 se muestran las curvas de comportamiento de los ensayos experimentales y los obtenidos del programa Abaqus. Se observa que las probetas modificadas experimentan mayores desplazamientos inelásticos relativos a su límite de deformación elástica (ver Fig. 8), en comparación con las probetas convencionales.



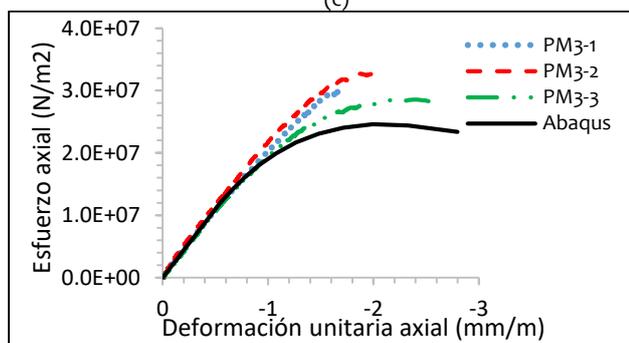
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 7. Curvas esfuerzo-deformación: a) PC, b) PM1, c) PM2, d) PM3

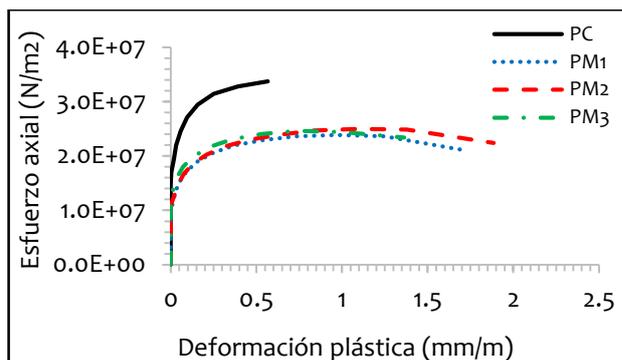


Fig. 8. Curvas esfuerzo-deformación plástica

La tabla VII muestra la energía inelástica disipada por cada espécimen, el cual es representado mediante el área bajo cada curva mostrada en la Fig. 8. Se observa que, en el régimen inelástico, las probetas modificadas disipan una mayor energía que la probeta convencional.

TABLA VII

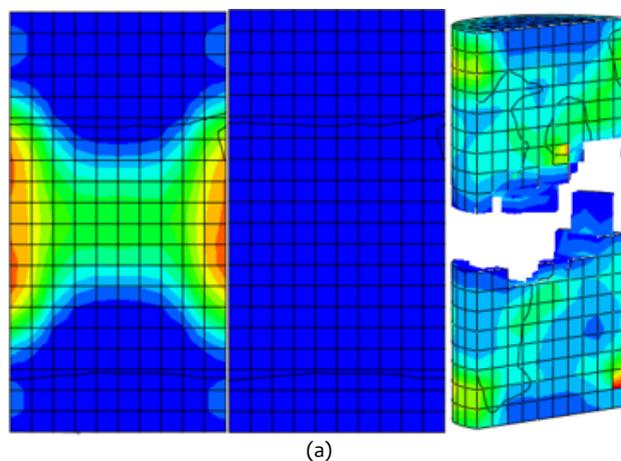
Energía disipada por deformaciones plásticas en cada espécimen

Tipo de probeta	E: Energía (mm*N/m³)	E - PM _i /E - PC
PC	1.67E7	1.0
PM1	3.76E7	2.25
PM2	4.36E7	2.61
PM ₃	3.12E7	1.87

Nota: Elaboración propia.

4.4. DESARROLLO DEL DAÑO

En la Fig. 9 se puede observar la diferencia entre la probeta PC (a) y las probetas PM (b), respecto al daño en tensión (izquierda), compresión (centro) y falla del espécimen (derecha). En las probetas modificadas el daño (en compresión y tensión) se concentra alrededor del SRD; mientras que en las probetas convencionales el daño en tensión se extiende a toda la parte central de la probeta y el daño en compresión no se alcanza hasta que el concreto llega al punto de falla.



(a)

Fig. 9. Daño y subsecuente falla de los especímenes convencionales (a) y especímenes modificados (b)

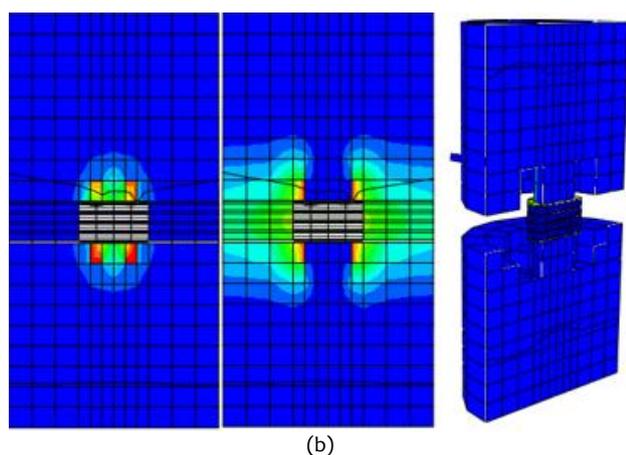


Fig. 9. (Continuación)

Estos resultados se observan de forma gráfica en la Fig. 10. En él se aprecia que la falla en los especímenes modificados se genera después de un desarrollo gradual del daño promoviendo un comportamiento más dúctil; mientras que el espécimen convencional falla inmediatamente después de alcanzar la resistencia máxima, sin tolerar daño sino hasta que llega a la falla, evidenciando un comportamiento frágil.

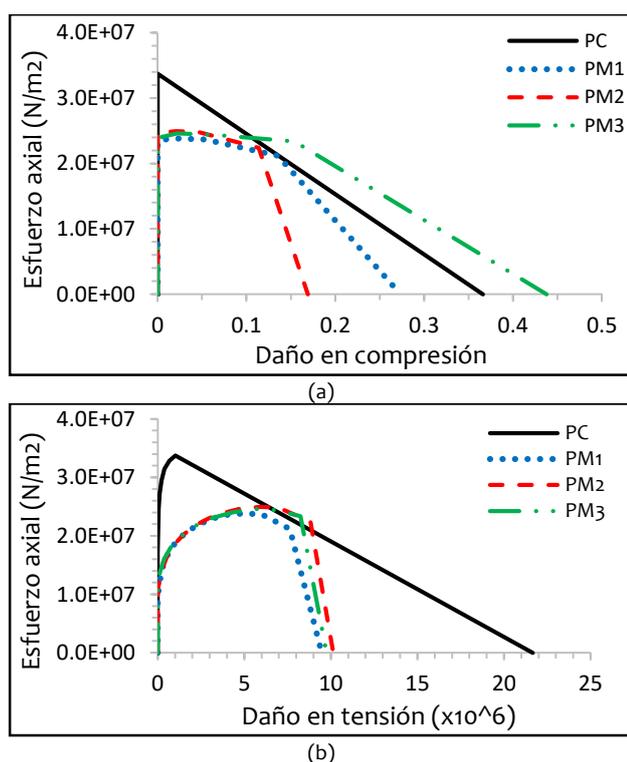


Fig. 10. Curvas daño-esfuerzo axial: a) daño en compresión, b) daño en tensión

CONCLUSIONES

- El dispositivo SRD reduce la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad, independientemente de la cantidad de capas de caucho que lleve entre las láminas de acero.
- No se observó mayores deformaciones absolutas en las probetas modificadas respecto a la probeta convencional. Sin embargo, el SRD incremento las deformaciones inelásticas en las probetas modificadas.
- El dispositivo SRD aumenta la capacidad de disipar energía mediante mayores desplazamientos inelásticos en relación a la probeta convencional.
- El dispositivo SRD genera un desarrollo gradual del daño, tanto a compresión como a tensión; además, concentra el daño en la zona que rodea al SRD.
- El dispositivo SRD muestra que se puede reducir el impacto negativo que tienen los NFU en el medio ambiente, mediante su uso en la ingeniería estructural.

REFERENCIAS

- [1] H. Park y T. Eom, "Energy dissipation capacity of flexure-dominated reinforced concrete members", presentado en 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, Agosto 1-6, 2004, Paper No. 3481.
- [2] M. Valente y A. Sibai, "Rubber/crete: Mechanical properties of scrap to reuse tire-derived rubber in concrete; A review", *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials*, vol. 17, no. 1, jun. 2019, doi: 10.1177/2280800019835486
- [3] A. Siddika, Md. A. Al Mamun, R. Alyousef, Y.H. M. Amran, F. Aslani y H. Alabduljabbar, "Properties and utilizations of waste tire rubber in concrete: A review", *Constr Build Mater.*, vol. 224, no. 10, pp. 711-731, nov. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.108
- [4] N. Flores, D. Flores, F. Hernández-Olivares y M.A. Navacerrada, "Mechanical and thermal properties of concrete incorporating rubber and fibres from tyre recycling", *Constr Build Mater.*, vol. 144, pp. 563-573, jul. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.196
- [5] A.R. Khaloo, M. Dehestani y P. Rahmatbadi, "Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles", *J. Waste Manag.*, vol. 28, no. 12, pp. 2472-2482, dic. 2008, doi: 10.1016/j.wasman.2008.01.015
- [6] R. Roychand, R. J. Gravina, Y. Zhuge, X. Ma, O. Youssf y J. E. Mills, "A comprehensive review on the mechanical properties of waste tire rubber concrete", *Constr Build Mater.*, vol. 237, no. 117651, mar. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117651
- [7] J. Xue y M. Shinosuka, "Rubberized concrete: A green structural material with enhanced energy-dissipation capability", *Constr Build*

- Mater.*, vol. 42, pp. 196 - 204, may. 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.01.005
- [8] A. Muñoz, M. Díaz y R. Reyna, “Estudio de aplicabilidad de un prototipo de aislador de bajo costo utilizando caucho reciclado”, *Tecnia*, vol: 29, no. 2, pp. 65-73, ago. 2019, doi: 10.21754/tecnica.v29i2.706
- [9] H. K. Mishra, A. Igarashi y H. Matsushima, “Finite element análisis and experimental verification of the scrap tire rubber pad isolator”, *Bull. Earthq. Eng.*, vol: 11, pp. 687-707, oct. 2012, doi: 10.1007/s10518-012-9393-4
- [10] V. L. Shulman, “Tire Recycling” en *Waste.*, Academic Press, 2019, cap. 26, pp. 489-515.
- [11] C. Halsband, L. Sorensen, A. M. Booth y D. Herzke, “Car Tire Crumb Rubber: Does Leaching Produce a Toxic Chemical Cocktail in Coastal Marine Systems?”, *Front. Environ. Sci.*, vol: 8, no. 125, Jul. 2020, doi: 10.3389/fenvs.2020.00125
- [12] K. Formela, “Sustainable development of waste tires recycling technologies – recent advances, challenges and future trends”, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, vol: 4, no. 3, pp. 209-222, jul. 2021, doi: 10.1016/j.aiepr.2021.06.004
- [13] S. Sakai, et al., “An international comparative study of end-of-life vehicle (ELV) recycling systems”, *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol: 16, pp. 1-20, 2014, doi: 10.1007/s10163-013-0173-2
- [14] G. Ana María, “La importancia de una regulación especial para la gestión de los neumáticos fuera de uso en el Perú”, Tesis de Master, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, 2018. [Online]. Disponible: <http://hdl.handle.net/20.500.12404/15644>
- [15] Superintendencia Nacional de los Registros Públicos, “SUNARP: número de autos que circulan en el país acumula una década de crecimiento continuo”. Accedido: Abr. 01, 2024. [Online]. Disponible: <https://www.sunarp.gob.pe/PRENSA/inicio/post/2020/01/08/sunarp-numero-de-autos-que-circulan-en-el-pais-acumula-una-decada-de-crecimiento-continuo>
- [16] Comunidad Andina, “Proyecto por las vías de la CAN”. Accedido: Abr. 01, 2024. [Online]. Disponible: <https://www.comunidadandina.org/notas-de-prensa/comunidad-andina-lanza-proyecto-de-seguridad-vial-por-las-vidas-de-la-can/>
- [17] Comunidad Andina (CAN), “CAN en cifras 2020”. Accedido: Abr. 01, 2024. [Online]. Disponible: <https://www.comunidadandina.org>
- [18] Ministerio del ambiente, “Régimen especial de neumáticos fuera de uso (NFU)”. Accedido: Abr. 01, 2024. [Online]. Disponible: <https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/2452205-regimen-especial-de-neumaticos-fuera-de-uso-nfu>
- [19] Ministerio del ambiente. (26, jul. 2021). “Decreto Supremo N° 024-2021-MINAM, Decreto supremo que aprueba el Régimen Especial de Gestión de Manjeo de Neumáticos Fuera de Uso”. Accedido: Abr. 01, 2024. [Online]. Disponible: <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/2039546-024-2021-minam>
- [20] M. Nadal, J. Rovira, J. Díaz-Ferrero, M. Schuhmacher y J. L. Domingo, “Human exposure to environmental pollutants after a tire landfill fire in Spain: Health risks”, *Environ. Int.*, vol: 97, pp. 37-44, oct. 2016, doi: 10.1016/j.envint.2016.10.016
- [21] S. H. Bransma, M. Brits, Q. R. Groenewoud, M. J. M. Van Velzen, P. E. G. Leonards y J. de Boer, “Chlorinated Paraffins in car Tires Recycled to Rubber Granulates and Playground Tiles”, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 53, no. 13, pp. 7595-7603, jun. 2019, doi: 10.1021/acs.est.9b01835
- [22] G. Rosana, P. María Josefina, I. Patricia, K. Jerónimo, A. Ricardo y S. A. María Paz, “Ecological Roofing Tiles Made With Rubber And Plastic Wastes”, *Adv. Mater. Res.*, vol: 844, pp. 458-461, nov. 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.844.458
- [23] T. Khudyakova, Andrey Shmidt y Svetlana Shmidt, “Sustainable development of smart cities in the context of the implementation of the tire recycling program”, *Entrepreneurship Sustain. Issues*, vol: 8, no. 2, pp. 698-715, dic. 2020.
- [24] M. Villar-Vega y V. Silva, “Assessment of earthquake damage considering the characteristics of past events in South America”, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol: 99, pp. 86-96, ago. 2017, doi: 10.1016/j.soildyn.2017.05.004
- [25] K. Okazaki, K. S. Pribadi, D. Kusumastuti y T. Saito, “Comparison of Current Construction Practices of Non-Engineered Buildings in Developing Countries”, presentado en *15th World Conference on Earthquake Engineering 2012 (15WCEE)*, Lisboa, Portugal, 2012.
- [26] Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), 2017, “Escenario sísmico para Lima Metropolitana y Callao: sismo 8.8 Mw”, Instituto Nacional de Defensa Civil, Dirección de Preparación, Subdirección de Sistemización de Información sobre Escenarios de Riesgo de Desastres. [Online]. Disponible: <https://portal.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2019/01/201711231521471-1.pdf>
- [27] D. V. Mallick, S. E. Dritsos y D. Sonda, “Construction and Strengthening of Non – Engineered Buildings in Developing Seismic – Prone Countries”, *Struct. Eng. Int.*, vol: 23, no. 2, pp. 225-228, feb. 2013, doi: 10.2749/101686613X13363929988610
- [28] American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of concrete in Compression, ASTM Designation: C 469 – 02. [Online]. Disponible: https://www.astm.org/co469_co469m-14.html
- [29] L. Qingfu, G. Wei y K. Yihang, “Parameter calculation and verification of concrete plastic damage model of ABAQUS”, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 794, no. 012036, dic. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/794/1/012036
- [30] Computers and Structures Inc., Material Stress – Strain Curves, Walnut Creek, CA, USA, 2008.
- [31] International Federation for Structural Concrete, Model Code 2010, fib CEB – FIP, 2010.
- [32] U. Gudsoorkar y R. Bindu, “Computer simulation of hyper elastic re-treaded tire rubber with ABAQUS”, *Mater. Today: Proc.*, vol. 43, no. Part 2, pp. 1992-2001, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.432