

Nueva propuesta de gaviones para sistemas fluviales frente a la erosión e inundación

New gabion proposal for fluvial systems against erosion and flooding

Maiquel López-Silva^{1*}

 <https://orcid.org/0000-0002-0946-6160>

Jorge Luis Quicaño-Quispe²

 <https://orcid.org/0009-0001-0224-0943>

Johan Walter Alessandro Porras-Olortegui²

 <https://orcid.org/0009-0007-0845-3548>

Dayma Sadami Carmenates-Hernández¹

 <https://orcid.org/0000-0001-5482-7562>

Recibido 17 de marzo de 2025, aceptado 30 de diciembre de 2025.

Received: March 17, 2025

Accepted: December 30, 2025.

RESUMEN

Las estructuras de gaviones proporcionan una solución sostenible para el control de la erosión, socavación e inundaciones, siendo ampliamente utilizadas por los ingenieros debido a la capacidad de adaptarse a las deformaciones y resistencia al impacto fluvial, así como su baja huella de carbono y sostenibilidad ambiental. Pero, en ciertas circunstancias, es limitado su uso debido a los escasos materiales locales. El presente estudio experimental tiene como propósito hacer una nueva propuesta de gaviones con núcleo de arena para sistemas fluviales frente a la erosión e inundaciones. Se elaboraron tres modelos de gaviones, el tradicional (GT) y dos con núcleo de arena al 50% (GM50) y 60% (GM60) de su volumen, respectivamente. Los gaviones se sometieron a un total de 30 pruebas hidrodinámicas y mecánicas. El análisis de los resultados mostró que el modelo de gavión GM50 cumplió mejor con los requisitos de velocidad crítica y tensión cortante crítica. También mostró una mayor resistencia a la deformación y mejor distribución de las cargas internas. Lo cual mejora la estabilidad estructural y permite una mejor absorción de las fuerzas generadas por el flujo de agua. Finalmente, este nuevo enfoque de gaviones con núcleo de arena proporciona una base para nuevos diseños de estructuras hidráulicas sostenibles en el futuro.

Palabras clave: Gavión mixto, núcleo de arena, tensión cortante crítica, carga axial, resistencia hidráulica, estabilidad estructural, mecánica de gaviones.

ABSTRACT

Gabion structures provide a sustainable solution for erosion, scour, and flooding; they are widely used by engineers for their adaptability to accommodate deformation and impact resistance from river currents, as well as their low carbon footprint and environmental sustainability. However, their use is limited in certain circumstances due to the scarcity of local materials. This experimental study aims to propose a new type of gabion with a sand core for river systems prone to erosion and flooding. Three gabion models were developed: the traditional one (GT), and two with 50% (GM50) and 60% (GM60) sand core volume, respectively. The gabions underwent a total of 30 hydrodynamic and mechanical tests. The analysis of the results showed that the GM50 gabion model better satisfied the critical velocity and critical shear stress requirements. It also exhibited greater resistance to deformation and a more effective distribution of internal loads. This improves structural stability and allows for better absorption of the forces generated

¹ Universidad Católica Sedes Sapientiae. Facultad de Ingeniería, Departamento de Investigaciones. Lima, Perú.

E-mail: mlopezs@ucss.edu.pe; dcarmenates@ucss.edu.pe

² Universidad Ricardo Palma. Escuela Profesional de Ingeniería Civil. Lima, Perú.

E-mail: 202010506@urp.edu.pe; 202010515@urp.edu.pe

* Autor de correspondencia: mlopezs@ucss.edu.pe

by water flow. Finally, this new approach to gabions with a sand core provides a foundation for future designs of sustainable hydraulic structures.

Keywords: Mixed gabion, sand core, critical shear stress, axial load, hydraulic resistance Structural stability, gabion mechanics.

INTRODUCCIÓN

En ingeniería civil, los gaviones se han presentado como una solución ecológica para los problemas en ingeniería fluvial, destinados a controlar inundaciones, erosión y la estabilidad de taludes [1]. En otras instancias, son estructuras viables para la disipación de energía en canales abiertos y vertedero escalonado para presa, producto de su macro rugosidad y porosidad [2]. Se ha demostrado que, con muros de contención vertical con una altura de 3 m, no colapsa, aunque se produzca una deformación hacia adelante por un terremoto de escala considerable [3]. Esto permite que la estructura de gaviones se pueda utilizar con éxito para la restauración de ríos en lugar de las estructuras hidráulicas tradicionales y sólidas, producto de su elasticidad y preservación del medio ambiente natural [4].

El gavión está conformado por una malla hexagonal de acero de doble torsión y roca; esta última materia prima, por lo general, se extrae del propio río donde se implementa la obra. Sin embargo, la disponibilidad se limita a ríos de llanuras o zonas de escasas rocas que reúnan las especificaciones técnicas. Otra solución ha sido la utilización de rocas extraídas de canteras cercanas al río. Pero, aun así, persiste el problema de implementar una solución sostenible con muros de gaviones por sus elevados costos de transportación. La escasez de roca adecuada y las dificultades logísticas para su traslado pueden inflar los presupuestos y prolongar los plazos de construcción. La obtención de las rocas es un obstáculo para la construcción de gaviones en regiones llanas, montañosas, de selva y zonas desérticas.

En particular, los ríos de llanuras se caracterizan por serios problemas debido a las frecuentes inundaciones y vulnerabilidad de los ecosistemas acuáticos. Además, estos ríos de llanuras presentan bancos de arena y grava fina que oscilan en valores inferiores a 2 mm hasta 25 mm [5]. En otros contextos, los ríos de montañas se caracterizan por ser trezados,

rectos y meandroformes, que acrecientan los problemas de inundaciones. La morfología del río de montaña depende de la variabilidad del caudal, los suministros de sedimentos, la vegetación de ribera y la erosividad de la geología subyacente. Mientras tanto, los elementos que forman las llanuras aluviales son influenciados por grandes descargas, así como por la erosión, la deposición y el confinamiento en el valle [6]. Por tanto, la utilización de los gaviones como solución a los problemas hidrodinámicos del cauce se ve limitada o nula. Por ello, se requiere la búsqueda de alternativas viables para los casos particulares en los que no existan materiales adecuados para la construcción de gaviones.

En la literatura científica se analizan diferentes contextos enfocados en la evolución mecánica de las rocas y los modos de falla de la malla. Un ejemplo es el estudio de ensayos de laboratorio de un mortero geopolimerizado que usa arena de mar en lugar de piedras. Sin embargo, la resistencia baja con una mayor concentración de la solución alcalina [7]. También, se sugiere usar bolsas de arena y piedras de fibra sintética para el refuerzo, pero estas no son tan estables como un gavión hecho solo de rocas [8].

En otras circunstancias, analizan la forma del gavión en cuatro situaciones distintas y concluyen que la forma cúbica ofrece un mejor rendimiento estructural [9]. En este mismo contexto, se indica que el gavión con forma trapezoidal es más estable frente a los efectos de volteo y tiene un mayor factor de seguridad con altos niveles de agua [10].

Por otro lado, se muestra que la relación entre altura y diámetro o longitud lateral del gavión tiene un rol importante porque, mientras menor sea la relación, mayor será el incremento en el primer pico de la curva de carga y esfuerzo axial [11]. Los mismos autores indican que los gaviones tienden a deformarse en forma circular cuando están bajo carga axial debido a su nivel de porosidad. También, se indica que la deformación principal de los

gaviones se muestra como una expansión externa en las pruebas de compresión unidireccional, y la mayor deformación lateral ocurre en el centro del gavión [12]. En efecto, se deduce que la resistencia de los gaviones proviene de la acción conjunta del relleno de piedras y la estructura de alambre que los contiene. En concordancia, [13] cita que la relación porosidad y densificación como estructura puede mejorar la distribución de cargas. No obstante, señalan que la forma de la roca influye en la resistencia a la deformación de un muro de contención de gaviones, mientras que la presión vertical tiene poco efecto.

En relación, [14] investiga los efectos combinados de la forma de la roca voluminosa y escamosa para la resistencia al aplastamiento de 20 a 50 MPa sometidos a una energía de impacto de 70 kJ y demuestran que se deben utilizar rocas más redondeadas para atenuar la carga de impacto concentrada para aquellas con una alta resistencia al aplastamiento de 50 MPa. Además, señalan que las cargas máximas de impacto en rocas escamosas son de 20% mayores en comparación con las rocas voluminosas. Varios estudios en condiciones reales muestran que los gaviones se deforman cuando se someten a compresión uniaxial sin soporte lateral, antes de llegar a romperse. Los valores de tensión a la compresión varían entre 0,294 y 0,392 kN/cm².

No obstante, en la literatura actual, hay una falta de información sobre el diseño de gaviones que incluya el análisis experimental o la construcción de estos utilizando núcleos de arena, es decir, un porcentaje de ese material granular y roca. Por tanto, el objetivo de la presente investigación es plantear una nueva propuesta de gaviones con núcleos de arena para sistemas fluviales frente a la erosión e inundación en condiciones experimentales.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló en dos laboratorios. Las pruebas hidrodinámicas se realizaron en el Laboratorio de Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Ricardo Palma, mientras que las pruebas mecánicas se ejecutaron en el Laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Católica Sedes Sapientiae. En el área de hidráulica, los ensayos se desarrollaron en el canal abierto modelo H91.8D/15, con sección rectangular de ancho de 0,30 m (pero se ajustó a un ancho de 0,10 para los ensayos), altura

0,45 m y una longitud de 15 m. Este equipo permite trabajar con un caudal máximo de 12 L/s y ajustar la pendiente del fondo del canal hasta 5° a intervalos de 0,25°. La prueba mecánica se realizó con una máquina de compresión automática Forney F-1100KN-I-230 VDF. Esta máquina tiene una capacidad de carga de 11 kN a 1100 kN y puede abrirse verticalmente hasta 49,85 cm y horizontalmente hasta 23,5 cm. En particular, se elaboraron dos láminas de acero como tapas de almohadillas cuadradas de 12 cm y espesor de 5 cm para los ensayos.

Modelo de gavión

Se evaluaron tres modelos de gaviones: el gavión tradicional (GT), conformado por el 100% de su volumen con piedras de cantos rodados. También se evaluaron los que tienen núcleo de arena GM50 y GM60. Estos se rellenaron con una combinación de cantos rodados y arena en proporciones de 50% x 50% y 40% x 60%, respectivamente. Las dimensiones del modelo fueron de 10 cm x 10 cm x 10 cm, correspondientes a una escala de 1:10 con respecto al gavión prototipo, cuyas dimensiones de largo, ancho y alto fueron de 1 m x 1 m x 1 m, respectivamente. Se utilizó para la construcción una malla metálica cuadrada de 0,635 cm y un alambre de diámetro 1 mm para el amarre y atirantamiento de las mallas. Señalar que el amarre se ejecutó en cada intersección de malla mediante la técnica doble-simple-doble [15].

El material de relleno de los gaviones estuvo constituido por partículas de diámetros uniformes, empleándose piedras de cantos rodados de 19 mm con una densidad de 1,93 g/cm³. Este aspecto se consideró en la escala del modelo, producto de que el prototipo de las rocas de relleno oscila entre 70 a 250 mm para diámetros medios de 85 a 190 mm [16], [17]. Asimismo, la arena utilizada fue uniforme, con diámetro de 1,18 mm con una densidad de 1,61 g/cm³. Indicar que todos los aspectos del diseño planteado fueron de acuerdo a la normativa vigente [18]. En la Tabla 1 se ilustran las propiedades del material de relleno de los modelos de gavión.

La Figura 1 muestra los tres modelos físicos a escala de gaviones con malla metálica y rellenos con materiales granulares de diferentes composiciones. El modelo a (Figura 1a) corresponde a un gavión tradicional (GT) relleno exclusivamente con piedras. Los modelos b y c (Figura 1b y Figura 1c)

Tabla 1. Parámetros físicos del material granular empleado en los modelos de gavión.

Modelo de gavión	Peso total (N)	Peso específico (N/m ³)		Composición (%)		Porcentaje del peso (%)		Diámetro del material (mm)		Porosidad (%)	
		roca	arena	roca	arena	roca	arena	roca	arena	roca	arena
GT	18,91	1,89x10 ⁴	1,58x10 ⁴	100%	—	100%	—	19	—	33	—
GM50	15,78			50%	50%	63,98	36,02	19	1,18	36	28
GM60	15,47			40%	60%	62,46	37,54	19	1,18	38	26

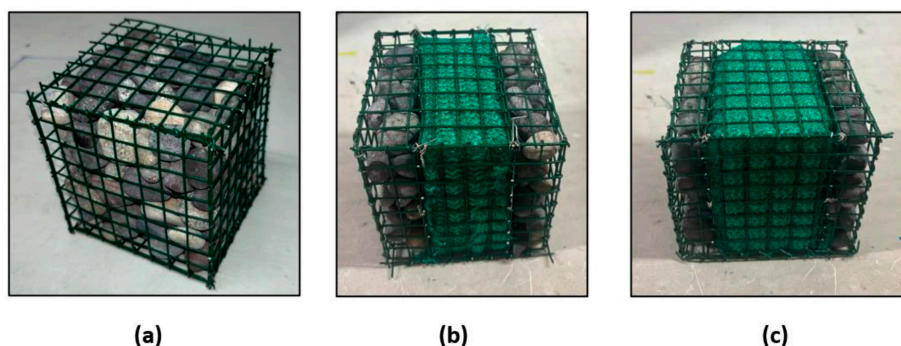


Figura 1. Modelos de gaviones: a) modelo GT, b) modelo GM50 y c) modelo GM60.

representan los gaviones con núcleo de arena al 50% y 60% confinados centralmente mediante una malla doble de polietileno a 2 cm y 2,5 cm de ancho, respectivamente. Estas configuraciones se diseñaron para investigar cómo la adición de material fino y la zonificación interna afectan las propiedades mecánicas e hidráulicas de los gaviones en condiciones controladas.

Prueba hidrodinámica

Los gaviones modelo GT, GM50 y GM60 se sometieron a pruebas hidrodinámicas para determinar el comportamiento hidráulico. En particular, las pruebas para los modelos con núcleos de arena GM50 y GM60 se expusieron de forma transversal a la dirección del flujo. Producto que es clave para estudiar la estabilidad hidráulica y cómo responde a la disipación de energía, la pérdida de carga, la reducción de la velocidad, además de su uso práctico como dique, presa u obra disipadora.

La literatura científica especializada [19], [20], [21] indica que, en el diseño de defensas ribereñas para la protección de sistemas fluviales, construidas mediante gaviones de malla de doble torsión, la estabilidad hidráulica de estas estructuras se alcanza cuando el

desplazamiento de las rocas dentro del confinamiento se limita. Esto no compromete el desempeño ni la función protectora del sistema, como se muestra en la Figura 2. El Δz es el desplazamiento vertical relativo del material granular dentro del confinamiento del gavión. Las causas de un desplazamiento leve dentro del gavión se deben a acomodación inicial de partículas después del relleno y reajustes por cargas externas (hidráulicas o mecánicas) [22].

En estas condiciones hidráulicas del gavión, la tensión cortante medida en la superficie se puede expresar por la ecuación (1).

$$\tau_0 = \gamma_w \cdot R \cdot S \quad (1)$$

Donde τ_0 es la tensión cortante (N/m²), γ_w el peso específico del agua (N/m³), R el radio hidráulico (m) y S la pendiente longitudinal.

Los autores [22], [23] señalan que, para una piedra caracterizada por un diámetro medio, la tensión cortante crítica se define por medio de la ecuación (2).

$$\tau_c = C^* (\gamma_r - \gamma_w) d_m \quad (2)$$

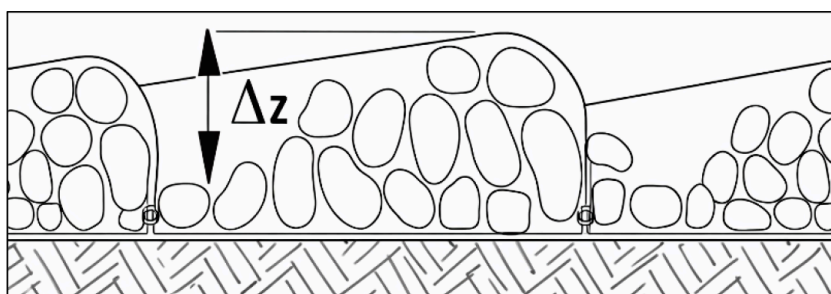


Figura 2. Patrón del movimiento de las piedras dentro del gavión.

Donde τ_c es la tensión cortante crítica (N/m^2), C^* el parámetro de Shields crítico, γ_r el peso específico de la roca (N/m^3), d_m diámetro medio de las rocas (m).

Sin embargo, en el caso del gavión con dos materiales, roca y arena, se analiza el objeto considerando el mayor peso específico y el diámetro de las partículas. Esto se debe a que el componente grueso controla la estabilidad del gavión, y se crearon ecuaciones de corte para las partículas que tienen un mayor impacto [23], [24], mientras que el coeficiente de Shields, que se creó para caracterizar cuánto tienden a moverse las partículas según su formato, en particular para las rocas contenidas en mallas metálicas como gaviones, el valor definido fue de $C^* = 0,10$ [22], [25], [26]. Por tanto, el revestimiento del gavión con o sin núcleo de arena es estable con una deformación limitada si se cumple lo establecido por la ecuación (3). Al mismo tiempo, la estructura de gavión debe lograr una estabilidad durante el desarrollo del flujo supercrítico con número de Froude (Fr) ≤ 3 .

$$\tau_c \geq \tau_0 \quad (3)$$

Durante las pruebas hidráulicas, los modelos de gavión se sometieron a condiciones de régimen permanente a pendiente constante de 1,745% con tres caudales diferentes, lo que permitió generar variaciones controladas en la profundidad del agua (y) respecto a la altura del gavión (H): $y = 50\%H$ (flujo continuo), $y = 100\%H$ (flujo de transición) y, por último, $y = 120\%H$ (flujo en sobrevertimiento). Estas pruebas buscan investigar la deformación y capacidad de disipación de energía en situaciones de variación gradual del nivel de agua.

El caudal de circulación en el canal se determinó a través de un medidor de flujo ultrasónico portátil

de alta precisión de $\pm 1\%$. Asimismo, se empleó un indicador del nivel de agua con división de 1mm para la profundidad del flujo de agua. La velocidad del flujo fue obtenida por medio de un tubo de Pitot Pasco con una precisión de $\pm 0,03$ m/s. Los niveles del agua, como las velocidades del flujo, se tomaron aguas arriba y aguas abajo de la estructura.

Prueba mecánica

Se ejecutaron pruebas mecánicas en diferentes escenarios de los modelos de gaviones para la máxima resistencia a compresión simple. Los escenarios planteados fueron los siguientes: 1) Deformación progresiva del gavión; 2) El colapso de los modelos de gaviones; 3) Deformación y ruptura de la malla cuadrada. Todas las condiciones del análisis fueron en estado seco y controlado. En general, los ensayos se desarrollaron teniendo en cuenta algunas consideraciones de [27] y [28].

Las pruebas se llevaron a cabo utilizando una máquina de ensayo de compresión con capacidad máxima de carga axial de 1100 kN, como se muestra en la Figura 3. El ensayo de compresión se ejecutó sin restricciones laterales, con una carga vertical aplicada al gavión para proporcionar una indicación de su resistencia máxima a la compresión. La velocidad de carga se estableció para 1,33 kNf/s hasta alcanzar la deformación axial del 50% de la altura del gavión. Asimismo, la curva de carga y el desplazamiento axiales del ensayo se registraron de forma automática. Todo ello permitió obtener características iniciales y finales del tipo de gavión.

Se calculó la resistencia máxima a la compresión ($\sigma_{\text{máx}}$) considerada como la relación entre la capacidad máxima de carga obtenida por la prueba y el área original de la sección, que se expresa por



Figura 3. Máquina de ensayo a compresión.

la ecuación (4). También se estableció la relación de compresión axial (ACR) debido a la variación en la altura del gavión usando la ecuación (5).

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A} \quad (4)$$

$$ACR = \frac{H_1}{H_0} \quad (5)$$

Donde F_{max} es la carga axial máxima, A el área original de la sección transversal de la muestra de gavión, H_0 la altura inicial de la muestra, H_1 la altura de la muestra bajo compresión final.

El análisis de incertidumbre

Con el objetivo de minimizar los errores en la investigación, se ejecutaron para todas las condiciones tres réplicas experimentales. Asimismo, se repitieron las mediciones tres veces para obtener el valor real, que se expresa como medición = mejor estimación $\pm$ incertidumbre medición. La incertidumbre relativa se ha utilizado para determinar la precisión cuantitativa de los experimentos como la relación de la incertidumbre absoluta entre valor absoluto.

Para ello, el parámetro del caudal, osciló entre 2 y 5%, mientras que, en la velocidad del flujo, debido a la turbulencia de la porosidad de los gaviones, fue de 3 a 6%.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Resultados del comportamiento hidrodinámico

Los resultados de las pruebas hidráulicas realizadas sobre el gavión tradicional (GT) y los gaviones modificados con núcleo de arena (GM50, GM60) evidencian un comportamiento hidráulico consistente para los regímenes de flujos subcritos en estado continuo, transición y sobrevertimiento, como muestran en la Tabla 2. Sin embargo, hay diferencias significativas entre los modelos GT en comparación con el GM50 y GM60. Estas diferencias están relacionadas principalmente con la permeabilidad y la capacidad de disipación de energía de cada configuración.

El modelo GT, por tener una mayor permeabilidad en su estructura, permite que el flujo pase rápidamente a través de su matriz, lo que ayuda a la circulación del flujo entre los espacios entre granos. A consecuencia, el efecto de remanso de aguas arriba es moderado, con reducciones parciales de la velocidad media que oscilaron entre 0,225 y 0,268 m/s. En contraste, los gaviones GM50 y GM60, con núcleo de arena, generan menor permeabilidad, lo cual induce una restricción al paso del flujo, lo que incrementa la resistencia hidráulica del sistema. Esta situación hace que el efecto del remanso de aguas arriba sea más fuerte en la estructura. Se observan aumentos más marcados en el nivel del agua y una reducción notable de la velocidad media, especialmente en el modelo GM60. En concordancia [29], obtiene para condiciones experimentales una reducción promedio de la profundidad del agua del 7% producto del aumento del tamaño de la roca de porosidad de 33% al 38%. Asimismo, [30] enfatiza que los modelos de gaviones de baja porosidad muestran una velocidad y una profundidad de flujo ligeramente más altas que los modelos de mayor porosidad para todas las secciones. Además, argumentó que el aumento de la porosidad de 0,38 a 0,42 produjo un incremento del nivel del agua de 27% en la relación de flujo continuo.

En el interior de los modelos GM50 y GM60, a causa de la escasa permeabilidad por el núcleo de

Tabla 2. Prueba hidrodinámica.

Tipo de gavión	Zona de flujo	Q (L/s)	Y (m)		V (m/s)		R (m)	τ_0 (N/m ²)	τ_c (N/m ²)
			aguas arriba	aguas abajo	aguas arriba	aguas abajo			
GT	Continuo	1,121	0,051	0,043	0,268	0,272	0,038	6,553	17,305
	Transición	2,546	0,101	0,086	0,301	0,327	0,060	10,362	
	Sobrevvertimiento	2,963	0,122	0,110	0,298	0,340	0,067	11,550	
GM50	Continuo	1,117	0,051	0,039	0,247	0,271	0,038	6,534	13,598
	Transición	2,527	0,103	0,063	0,272	0,329	0,061	10,484	
	Sobrevvertimiento	2,953	0,121	0,095	0,265	0,340	0,067	11,498	
GM60	Continuo	1,111	0,052	0,024	0,225	0,273	0,039	6,629	12,855
	Transición	2,529	0,102	0,045	0,256	0,328	0,061	10,423	
	Sobrevvertimiento	2,947	0,123	0,077	0,253	0,341	0,068	11,602	

arena, se favoreció la retención temporal del flujo, lo cual produjo mayores gradientes hidráulicos e intensificó los mecanismos de disipación de energía. En contraste, al modelo GT con mayor permeabilidad mostró un régimen plenamente turbulento, lo que limita la capacidad disipativa de la estructura.

Aguas abajo de las estructuras, el gavión GT produce una aceleración más pronunciada del flujo emergente, fundamentalmente para las condiciones de transiciones y en sobre vertimiento, pero rápido restablecimiento del flujo cuasi uniforme. Por otro lado, los modelos GM50 y GM60 producen una aceleración local más controlada, con áreas de mezcla y vórtices secundarios, seguidas de una transición hidráulica suave antes de llegar a un flujo uniforme. Este comportamiento permite que dichos modelos reduzcan las velocidades medias del flujo entre un 4% y un 7% con menores niveles de agua, en un 21% y un 56% en comparación con el modelo GT. En este contexto, el modelo GM60 presentó la mayor capacidad de disipación de energía, entre el 18% y el 28%.

El análisis del esfuerzo cortante (τ_0) muestra valores similares entre los tres tipos de gaviones, lo que sugiere que las condiciones hidráulicas impuestas son equivalentes. Sin embargo, el esfuerzo cortante crítico (τ_c) disminuye gradualmente cuando se incrementa la cantidad de arena en el núcleo del gavión, siendo los valores más altos en el GT y los más bajos en el GM60. No obstante, todas las pruebas cumplen la condición $\tau_0 < \tau_c$, lo que confirma que existe estabilidad hidráulica. Se observó que el incremento del volumen de arena en el gavión tipo

GM50 redujo la τ_c en un 25,72% en comparación con el modelo GM60, que se redujo en un 21,42%. Lo que sugiere que la existencia de un riesgo de falla es más probable para los gaviones compuestos por un elevado porcentaje de arena.

Durante las pruebas hidráulicas no se observaron movimientos de las rocas dentro de la malla metálica. Se llega a la conclusión de que los modelos hechos con los núcleos de arena GM50 y GM60 ayudan a aumentar la resistencia al agua. Además, en situaciones de operación reales, estos gaviones promueven el crecimiento de la vegetación porque pueden retener los sedimentos que llevan los ríos. Destacan que las obstrucciones de las zonas porosas de los gaviones pueden desviar los flujos de agua, así como provocar la acumulación de presiones hidrostáticas que consiguen desestabilizar la estructura [31]. Por otro lado, al escalar las variables hidráulicas a 1:10, el modelo prototipo puede manejar velocidades promedio de 2,6 a 3,0 m/s y un esfuerzo cortante crítico (τ_c) de 128,55 a 173,5 N/m³. En este sentido, [32] señala que los gaviones en condiciones de campo soportan un número de Froude $\leq 1,5$ y velocidades críticas permitidas de 3,6 a 6,4 m/s para un tamaño de grano de 100 a 200 mm.

Resultados del comportamiento mecánico

Los resultados de la carga axial máxima ($F_{\max}$) ejercida para cada modelo de gaviones se exponen en la Tabla 3. Se ejercieron las muestras modelos (R_0) y las réplicas (R_1 , R_2 y R_3) para un total de 4 pruebas en cada gavión. Los valores de $F_{\max}$ que preservaron los modelos gaviones tipo GT, GM50

Tabla 3. Carga axial máxima y relación H/D.

Tipo de gavión	GT				GM50				GM60			
Prueba	R ₀	R ₁	R ₂	R ₃	R ₀	R ₁	R ₂	R ₃	R ₀	R ₁	R ₂	R ₃
F _{máx} (N)	9,33	9,37	9,32	9,35	16,66	16,68	16,95	16,62	15,16	15,1	15,2	15,23
H/D	0,57	0,53	0,64	0,56	0,38	0,36	0,38	0,39	0,42	0,48	0,40	0,39

y GM60 oscilaron entre 9,33 y 16,95 N para una velocidad establecida de 1,33 kNf/s. Se nota que los gaviones tipo GM50 y GM60 tienden a soportar más la F_{máx} hasta el 50% de la muestra en comparación con el GT. En particular, el GM60 soporta la F_{máx} hasta el 38,43% en relación al GT, mientras que el GM50 resiste más del 44,15% en comparación con el GT. Al mismo tiempo, la relación entre la altura de la muestra de gavión y la longitud lateral (H/D) indica que a menor valor de H/D se presenta una tendencia ascendente de resistir mayores cargas axiales máximas. En [11] alcanzaron que cuando $H/D < 1$, toda la curva ACR muestra una tendencia ascendente y la carga máxima aparece en el 50% de ACR.

Las pruebas en los gaviones experimentaron una deformación en su altura y una alteración de su geometría original a partir de la carga axial máxima aplicada, como muestra la Figura 4. En general, alcanzaron una desproporción horizontal que osciló de 12,6 cm x 13,2 cm a 13,8 cm x 18,9 cm y deformación vertical de 5,7 cm a 8,4 cm. Estos resultados sugieren que, en ausencia de relleno, la estructura del gavión se deforma considerablemente bajo carga, afectando potencialmente su estabilidad y resistencia a largo plazo en aplicaciones de alto esfuerzo. En contraste,

[11] alcanza deformación de 16,9 cm de diámetro y 5,08 cm de altura en muestras de 10 cm x 10 cm x 10 cm, pero en malla hexagonal.

Es notable que en ninguna de las 12 pruebas el gavión logró alcanzar el 50% de la deformación; previo a ello existió la rotura parcial de la malla cuadrada. La razón probable es que la carga axial causa una reorganización (compactación) de las rocas en la cesta de gaviones, y la fricción entre ellas crea una superficie para el movimiento horizontal relativo. En estudios similares [33], determinaron que la rigidez axial promedio de la malla de gaviones tejida es de 11 kN/m² y por metro de longitud del muro de 100 kN/m²/m.

En consecuencia, [13] señala que las mallas cuadradas sometidas a cargas axiales tienen menor estabilidad en relación con la malla hexagonal. En tal sentido, se puede deducir que el incremento del volumen de arena en los gaviones mejora la resistencia a la compresión. Pero hasta cierto punto, porque el exceso del volumen de arena en comparación con el de roca provoca menos resistencia a la compresión.

En la Figura 5 se muestran los resultados de la resistencia máxima a la compresión de los gaviones.

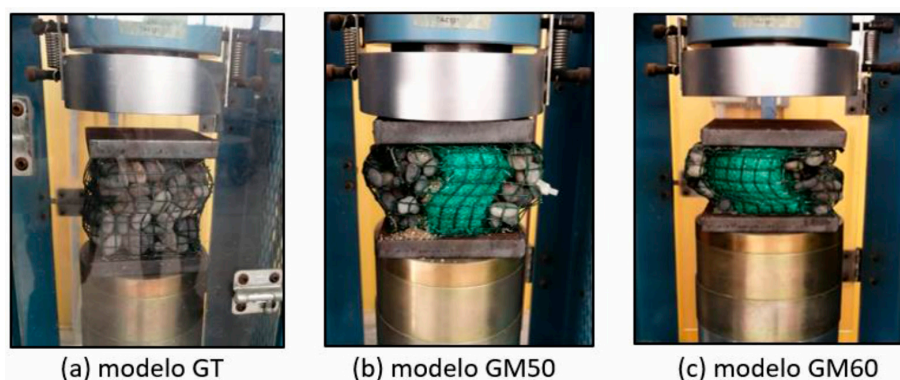


Figura 4. Deformación de las muestras posterior a la carga axial máxima.

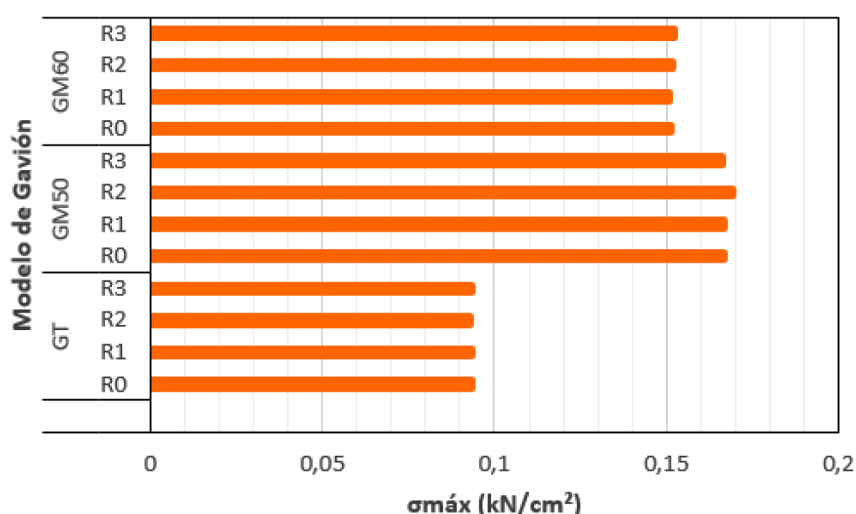


Figura 5. Resistencia máxima a la compresión.

Se observa que los modelos GM50 presentaron favorable resistencia máxima a la compresión en relación a los modelos GM60 y GT. Aunque los modelos con volúmenes de porcentajes de arena presentan mejor comportamiento que el gavión que solo está constituido por rocas GT.

Los resultados de la relación de compresión axial con respecto al tiempo transcurrido de la prueba de gaviones se muestran en la Figura 6. Se observa que los valores ACR son menores a 1 e inferiores a un tiempo de 60 segundos, lo que trae consigo un

pronto estado límite de falla de los gaviones. En específico, el valor promedio de ACR del modelo GM50 es ligeramente inferior en 0,15 para un tiempo de 13,8 segundos en relación al GM60 y de 0,20 en 27,48 respecto al GT. De manera que la relación de ACR y el tiempo de la carga axial actuando en la muestra permite visualizar el modelo más estable para las características propias del espécimen, que en este caso fue el modelo GM50. A partir de las curvas de la carga axial, se identificó que todos los picos de carga aparecieron cerca del 50% ACR y, posterior a ello, la curva general continuó

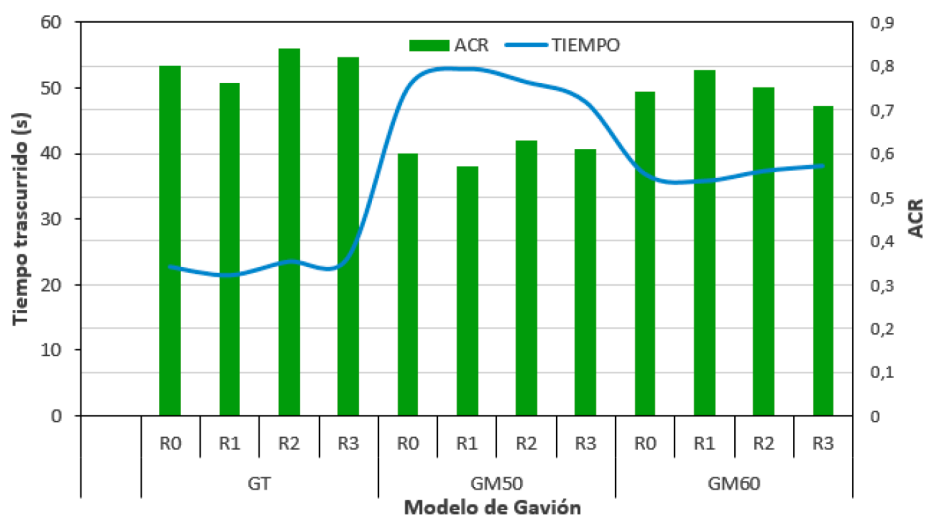


Figura 6. Relación de ACR y el tiempo transcurrido.

ascendiendo conforme con [11]. Sin embargo, para las particularidades del modelo GT, permaneció prácticamente constante hasta que alcanzó ruptura, a diferencia de [11].

Se demostró que, en el diseño de gaviones con un núcleo de arena y paredes de roca, presentan una leve deformación que podría ayudar a la estabilidad estructural bajo ciertas cargas. De modo que el gavión GM50 es más conservador en su geometría en comparación con el GM60. En este caso, el comportamiento coincide con lo que reportaron [9], quienes indican que usar relleno de piedra aumenta la capacidad estructural de los gaviones, al disminuir las deformaciones y ayudar a que las cargas se distribuyan de manera más uniforme. La combinación de arena en el interior y piedra de canto rodado en los laterales, según los resultados, otorga al gavión mayor resistencia a la deformación, confirmando la importancia del relleno en la estabilidad estructural.

En cuanto a la capacidad de carga, los gaviones GM50 y GM60 soportan cargas y esfuerzos máximos notablemente superiores a los GT. Por lo tanto, el porcentaje de arena en los gaviones ayuda a distribuir mejor las presiones internas, lo que optimiza la estabilidad de la estructura cuando se enfrenta a cargas altas.

Sin embargo, se detectó que las características mecánicas del gavión con núcleo de arena están estrechamente relacionadas con el tipo de malla, el diámetro del alambre y el tipo de medio interno que resguarda la arena. En concordancia, [13] indica que, el aumento del diámetro de la malla puede provocar la pérdida de rellenos más pequeños y reduce la porosidad del gavión, por consiguiente, la resistencia a la compresión.

CONCLUSIONES

En conclusión, los resultados de este estudio destacan que los gaviones con núcleo de arena tipo GM50 y GM60 presentaron un desempeño favorable en comparación con los gaviones tradicionales (GT), a pesar de registrar valores inferiores de esfuerzos cortantes críticos. Se destaca que el modelo GM50 muestra características estructurales y resistencia similares al GM60 y a su vez difieren del modelo GT. De manera que mantienen una adecuada resistencia

estructural y distribución eficaz de la presión sin un aumento significativo de la expansión lateral. Esto indica que el gavión GM50 es una opción sostenible para áreas donde hay pocas rocas y acceso a bancos de arena, para ayudar a reducir la erosión y las inundaciones en ríos.

Un hallazgo destacable de este estudio es que los modelos de gaviones presentaron en general un comportamiento hidrodinámico estable frente a las velocidades de flujo promedio. Aunque el modelo GM50 y GM60, por su diseño con sección de arena fina, desarrolla un filtro granular que genera un incremento de la resistencia al flujo y, por consiguiente, un leve incremento de la profundidad del agua en la zona aguas arriba del gavión. Pero a su vez, GM50 y GM60 reducen los esfuerzos cortantes críticos en 21,42% y 25,72% en comparación con el GT, respectivamente. Sin embargo, para todos los casos de modelos de gaviones estudiados, superan el valor límite de los esfuerzos cortantes.

Se identificó que en el comportamiento mecánico los modelos de gaviones GT, GM50 y GM60 resintieron las cargas axiales máximas de 9,33 hasta 16,95 N. Aunque no se logró alcanzar el 50% de la deformación porque la malla cuadrada presentó escasa estabilidad a las cargas axiales. De manera que la relación entre la altura (H) y la longitud del lado de la muestra (H/D) tiene un gran efecto en las características mecánicas del gavión. No obstante, el GM50 estableció mejor resistencia máxima a la compresión en relación a los modelos GM60 y GT. Pero en general, el diseño de gaviones con núcleo de arena y revestimiento de rocas mejora significativamente la distribución de las cargas internas, lo cual es ligeramente menos conservador a la deformación estructural en relación al GT. En efecto, esto le permite mantenerse más estable bajo condiciones de alta carga hidráulica, lo que es particularmente importante en entornos de ríos de llanura o áreas propensas a la erosión.

Estos resultados resaltan los métodos de prueba y las metodologías como aportes para considerar diferencias contextuales y específicas en las evaluaciones de modelos de gaviones a escala. Asimismo, evidenciando la necesidad de nuevas aproximaciones y estudios en el área específica. Para investigaciones futuras, se recomienda probar diferentes proporciones de arenas y rocas. También

se sugiere incluir en el análisis mecánico el tipo de malla y sus características en condiciones experimentales, así como en el modelado usando técnicas de elementos discretos.

REFERENCIAS

- [1] M.W. Kang, D.H. Moon, H.S. Roh, Y. Jeon, H. Fu, and S.S. Lee, "Innovative upcycling gabions with coal bottom ash for nonpoint source pollution control against climate change," *Journal of Cleaner Production*, vol. 478, Art. no. 143955, pp. 1-14, 2024, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2024.143955.
- [2] D. Kasiteropoulou, "A Study of Flow in Open Orthogonal and Trapezoidal Channels with Gabion Walls," *WSEAS Transactions on Fluid Mechanics*, vol. 18, pp. 66-73, 2023, doi: 10.37394/232013.2023.18.7.
- [3] *Overtopping Protection for Dams*, FEMA P-1014, 2014. [Online]. Available: https://damfailures.org/sites/default/files/wp-pdf/COM-Technical-Manual_Overtopping-Protection-for-Dams.pdf
- [4] R. Daneshfaraz, M. Bagherzadeh, A. Ghaderi, S. Di Francesco, and M. Majedi Asl, "Experimental investigation of gabion inclined drops as a sustainable solution for hydraulic energy loss," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 12, no. 4, pp. 3451-3459, 2021, doi: 10.1016/J.ASEJ.2021.03.013.
- [5] E.H. Dingle, K.M. Kusack, and J.G. Venditti, "The gravel-sand transition and grain size gap in river bed sediments," *Earth-Science Reviews*, vol. 222, Art. no. 103838, pp. 1-10, 2021, doi: 10.1016/J.EARSCIREV.2021.103838.
- [6] A. Annis, M. Karpach, R.R. Morrison, and F. Nardi, "On the influence of river Basin morphology and climate on hydrogeomorphic floodplain delineations," *Advances in Water Resources*, vol. 159, Art. no. 104078, 2022, doi: 10.1016/J.ADVWATRES.2021.104078.
- [7] S. Marathe, S. Akhila, I.R. Mithanthaya, and N. Bhavani Shankar Rao, "Geo-polymer sea sand cubes filled gabions," *Materials Today: Proceedings*, vol. 88, pp. 14-18, 2023, doi: 10.1016/J.MATPR.2023.04.372.
- [8] T. Tanaka, S. Kawaguchi, and K. Suzuki, "An experimental study on the stability of temporary armor unit for revetment against wave," in *Coastal Structures Conference 2019*, N. Goseberg and T. Schlurmann, Eds. Hannover, Germany, 2019, pp. 170-179, doi: 10.18451/978-3-939230-64-9_018.
- [9] M. Longgang, Z. Huijian, N. Xiaoyu, Z. Rui, X. Qingshuai, and J. Yongwang, "Study on static mechanical properties of gabion specimen," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 741, Art. no. 012082, pp. 1-6, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/741/1/012082.
- [10] A. Khamid, S.I. Wahyudi, and Soedarsono, "Analysis of Stability Safety Factors of Gabion Weir Models against the Wall and Water Level Variation," *Civil Engineering and Architecture*, vol. 11, no. 3, pp. 1107-1124, 2023, doi: 10.13189/cea.2023.110301.
- [11] H. Zhang, G. Liu, W. Liu, Z. Chen, Q. Liu, and G. Xu, "Experimental study on failure mode and mechanical characteristics of gabion material," *Construction and Building Materials*, vol. 344, Art. no. 128119, pp. 1-12, 2022, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.128119.
- [12] Y. Jiang and X. Wang, "Stress-Strain Behavior of Gabion in Compression Test and Direct Shear Test," in *ICTE 2011. Proceedings of the 3rd International Conference on Transportation Engineering*, 2011, pp. 1457-1462, doi: 10.1061/41184(419)241.
- [13] C. Shi, Y. Chen, L. Zhang, X. Zhang, and L. Qiu, "Numerical study on mechanical characteristics of gabion mixed media with discrete element method," *Construction and Building Materials*, vol. 438, Art. no. 137108, pp. 1-13, 2024, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2024.137108.
- [14] Y. Su and C.E. Choi, "Effects of particle shape on the cushioning mechanics of rock-filled gabions," *Acta Geotechnica*, vol. 16, no. 4, pp. 1043-1052, 2021, doi: 10.1007/S11440-020-01080-x.
- [15] N. Mazzon, F. Ferraiolo, and M. Vicari, "Experimental study of the mechanical behaviour of double twisted steel mesh gabions," *Procedia Engineering*, vol. 158, pp. 422-427, 2016, doi: 10.1016/J.PROENG.2016.08.466.
- [16] *Manual de gaviones*, J.E. Camargo Hernández y V. Franco, Gaviones Lemac, 2001. [En línea]. Disponible: <http://datosabiertos.unam.mx/IINGEN:RUSI:624>

- [17] R.R. Berg, Barry R. Christopher, and Naresh C. Samtan, "Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes. Volume I," Federal Highway Administration, Washington, DC, USA, Rep. FHWA GEC 011-vol. I, 2009. [Online]. Available: <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/nhi10024/nhi10024.pdf>
- [18] *Steel Products. Gabions and Hexagonal Wire Mesh Made of Galvanized Steel Wire or Galvanized Steel Wire Coated with PVC*, NTP 241.125, Inacal, Lima, Perú, 2021.
- [19] P. Di Pietro, C. Thornton, T. Hogan, S. Mandavkar, and N. Mazzon, "Experimental study onrevet mattresses in open channel flow: A new design approach against erosion" in *10th International Conference on Scour and Erosion (ICSE-10)*, J. Rice, X. Liu, I. Sasanakul, M. McIlroy, and M. Xiao, Eds. Oct. 18-21, 2021. [Online]. Available: <https://www.issmge.org/publications/publication/experimental-study-on-revet-mattresses-in-open-channel-flow-a-new-design-approach-against-erosion>
- [20] *Exécution des travaux géotechniques spéciaux - Ouvrages en gabions en grillage métallique à maille hexagonale double torsion - Partie 2: ouvrages en site aquatique*, NFP 94-325-2, AFNOR, Nov. 2006.
- [21] V.T. Chow, PhD, *Open Channel Hydraulics*, New York, USA: McGraw Hill, 1988.
- [22] D.B. Simons, Y.H. Chen, and L.J. Swenson, "Hydraulic test to develop design criteria for the use of Reno mattresses," Maccaferri Steel Wire Products, Ltd., Ontario, ON, Canada, Rep. n/a, 1984.
- [23] P.T. De Lima, "Hydraulic design of gabions on longitudinal works with the software Macra Studio," in *Proceedings of the 38th IAHR World Congress*, 2019, pp. 914-923, doi: 10.3850/38WC092019-1896.
- [24] S. Maynard and C. Neill, "Riprap Design," in *Sedimentation Engineering. Processes, Measurements, Modeling, and Practice*, M.H. Garcia, Ed., Reston, Virginia, USA: American Society of Civil Engineers, 2008, pp. 1037-1056, doi: 10.1061/9780784408148.apb.
- [25] P.F. Lagasse, L.W. Zevenbergen, W.J. Spitz, and L.A. Arneson, "Stream stability at highway structures," Federal Highway Administration, Fort Collins, Colorado, USA, Rep. no. FHWA-HIF-12-004, HEC 20, fourth edition, Apr. 2012. [Online]. Available: <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/hif12004.pdf>
- [26] R.T. Kilgore and G.K. Cotton, "Design of roadside channels with flexible linings," Federal Highway Administration, Fort Collins, Colorado, USA, Rep. no. FHWA-NHI-05-114 HEC 15, third edition, Sep. 2005. [Online]. Available: <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/05114/05114.pdf>
- [27] *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, C39/C39M-21, ASTM, USA, 2021, doi: 10.1520/C0039_C0039M-2.
- [28] *Standard Specification for Double-Twisted Hexagonal Mesh Gabions and Revet Mattresses (Metallic-Coated Steel Wire or Metallic-Coated Steel Wire With Poly (Vinyl Chloride) (PVC) Coating)*, A975, ASTM, West Conshohocken, PA, USA, 2016, doi: 10.1520/A0975-11R16.
- [29] S.A. Jalil, S.A. Sarhan, J.M. Qasim, and B.S. Hussein, "Properties of Flow through and over Gravel Basket Weir," *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences*, vol. 27, no. 3, pp. 127-136, 2019. [Online]. Available: <https://www.journalofbabylon.com/index.php/JUBES/article/view/2503>
- [30] M.A. Alabas, R. Al-Ameri, and S. Das, "Investigation of flow characteristics in gabion stepped weirs," *Water Supply*, vol. 23, no. 2, pp. 564-580, 2023, doi: 10.2166/WS.2023.017.
- [31] M. Ramli, T.J.R. Karasu, and E.T. Dawood, "The stability of gabion walls for earth retaining structures," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 52, no. 4, pp. 705-710, 2013, doi: 10.1016/J.AEJ.2013.07.005.
- [32] Maccaferri, "Erosion Control on Slopes and Engineering Works," [maccaferri.com](https://www.maccaferri.com/latam/erosion-control/). [Online]. Available: <https://www.maccaferri.com/latam/erosion-control/>
- [33] J.V. Mummadisingsh and A. Sengupta, "Study of the dynamic performance of a gabion wall," *Structures*, vol. 50, pp. 576-589, 2023, doi: 10.1016/J.ISTRUC.2023.01.133.