

# Proposal for a hydrodynamic casing as a defense system in bridge pillars against local erosion

Yvan Huaricallo Vilca <sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Departamento Académico de ingeniería Civil, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú,  
[yhuaricallo@unmsm.edu.pe](mailto:yhuaricallo@unmsm.edu.pe)

**Abstract:** Given the growing concern about erosion in bridge piers, exacerbated by climate change, this research focuses on proposing a hydrodynamic shell design using NACA airfoils to mitigate the formation of erosive vortices. The main objective is to identify an efficient and economical shell design that can be implemented to protect critical infrastructure against erosion. Using a mixed methodological approach, several designs were evaluated through simulations and comparative analysis, with the NACA 0025 profile standing out for its optimal balance between simplicity and effectiveness. The results of the research indicate a notable reduction in local erosion around the piers, with the rockfill showing reductions of 1.2m to 2.4m in erosion, and the energy reduction devices improving pier protection by up to 19%. In conclusion, the study validates the effectiveness of hydrodynamic shells designed with NACA profiles, particularly the NACA 0025, as a practical and cost-effective solution to combat erosion in bridge piers. These findings emphasize the importance of implementing innovative design strategies, coupled with rigorous preventative maintenance, to ensure the longevity and safety of vital infrastructure in challenging environments.

**Keywords:** Erosion, Hydronematic layer, NACA profiles, Vortices, Climate resilience

# Propuesta de carcasa hidrodinámica cómo sistema de defensa en pilares de puentes ante la erosión local

Yvan Huaricallo Vilca <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento Académico de ingeniería Civil, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú,  
[yhuaricallo@unmsm.edu.pe](mailto:yhuaricallo@unmsm.edu.pe)

**Resumen:** Ante la creciente preocupación por la erosión en pilares de puentes, exacerbada por el cambio climático, esta investigación se enfoca en plantear una propuesta de carcasas hidrodinámicas utilizando perfiles aerodinámicos NACA para mitigar la formación de vórtices erosivos. El objetivo principal es identificar un diseño de carcasa eficiente y económico que pueda ser implementado para proteger infraestructuras críticas contra la erosión. Utilizando un enfoque metodológico mixto, se evaluaron diversos diseños mediante simulaciones y análisis comparativos, destacándose el perfil NACA 0025 por su balance óptimo entre simplicidad y eficacia. Los resultados de la investigación indican una reducción notable en la erosión local alrededor de los pilares, con el enrocado mostrando disminuciones de 1.2m a 2.4m en la erosión, y los dispositivos de reducción de energía mejorando la protección de pilares en hasta un 19%. Concluyendo, el estudio valida la eficacia de las carcasas hidrodinámicas diseñadas con perfiles NACA, particularmente el NACA 0025, como una solución práctica y coste-efectiva para combatir la erosión en pilares de puentes. Estos hallazgos enfatizan la importancia de implementar estrategias de diseño innovadoras, junto con un mantenimiento preventivo riguroso, para asegurar la longevidad y seguridad de infraestructuras vitales en entornos desafiantes.

**Palabras Clave:** Erosión, Carcasa hidroneomática, Perfiles NACA, Vórtices, Resiliencia climática

## I. INTRODUCCIÓN

En la presente investigación se realizará una revisión bibliográfica referente a los sistemas de defensa en pilares ante la erosión local, así mismo se propondrá una solución a este problema. Los puentes ubicados en los ríos están expuestos a la erosión constante, así como a la socavación [2], dicha erosión se debe principalmente a la gradiente de velocidad que genera una presión hacia la parte inferior [1], generando vórtices que desgasta el lecho del río lo que provoca que las estructuras se vuelvan inestables.

Existen diferentes sistemas para la protección de la erosión local, dichos estudios serán analizados y mostrados en la presente investigación; se definirá conceptos básicos que influyen en esta problemática como la erosión, socavación y

la generación de vórtices. Los problemas estructurales en los pilares de puentes en nuestro país son mayores que los ocurridos en otros países del mundo debido a factores como el fenómeno del Niño [3] y la exacerbación del cambio climático, por lo tanto, el análisis no solo debe limitarse a realizar una comparativa entre las distintas soluciones encontradas en la revisión bibliográfica, por eso se propondrá una solución a partir de dicho análisis.

El Perú es un país con abundantes recursos hídricos, es el octavo país del mundo por volumen de agua dulce y el tercero de América Latina [65], por ende, la presencia de puentes es algo que se aprecia en cada rincón del país, pero a su vez, muchos de estos puentes se ven expuestos a diversos agentes perjudiciales, estos agentes pueden ser antrópicos como también naturales, diversos estudios señalan de un modo general que entre las causas más comunes de fallas de puentes están principalmente el choque de cuerpos extraños (palizadas, embarcaciones), la socavación y diversas manifestaciones de la dinámica fluvial, acción del viento y los sismos [62].

Los pilares y estribos son elementos extraños dentro de la corriente, el choque del flujo contra ellos produce corrientes vorticosas que causan la erosión local [62], este vendría ser un problema recurrente para la ingeniería hidráulica, por otro lado, visto desde un enfoque estructural, también sería un tema delicado, ya que los pilares son soportes de los puentes, eso significa que ante la falla independiente de cualquiera de ellos, la estructura se vería totalmente comprometida y el colapso sería algo inminente. Ante esta problemática, se han tomado diversas medidas. Hay varios tipos de medidas de protección que pueden considerarse contra la socavación, una de ellas podría ser impedir o disminuir el desarrollo de vórtices, que son la causa de la erosión local [62], para ellos sería viable realizar el diseño de estribos con sección hidrodinámica o para los puentes ya ejecutados, se podría colocar una carcasa con forma hidrodinámica, en ambos casos lo que se buscaría es evitar la formación de vórtices. En algunos proyectos también se ha intentado disminuir la erosión mediante la colocación de barreras aguas arriba del pilar [62]. Por tanto, se entiende que

existen diversas formas de mitigar la erosión en los pilares de puentes.

### Antecedentes

Gamboa y Quintanilla [59] en su tesis plantean el uso de pilas de sacrificio que permitan la reducción de la socavación para pilares circulares y rectangulares, para ello realizaron un modelamiento numérico hidrodinámico en el software Iber. Entre sus resultados se puede visualizar que para el pilar con forma circular se obtuvo una reducción del 45.32% de la socavación y para el pilar con forma rectangular un porcentaje de reducción de la socavación de 60.75%, concluyendo que esta propuesta de pilas de sacrificio es efectiva y más en pilares con forma rectangular.

Encalada [60] realizó una evaluación de la socavación local en los pilares del puente Ramis en Puno. La investigación tiene un enfoque cuantitativo. Para realizar la evaluación tomó los datos medidos en la estación hidrométrica Puente Ramis para luego de su análisis obtener el caudal de diseño máximo probable, finalmente, a través de distintos métodos como el de Larras, Encalada determinó que la socavación en los pilares puede alcanzar hasta 1m de profundidad, esto viene ser un dato preocupante ya que esto compromete la funcionalidad estructural de los pilares.

En la tesis titulada “Demostración experimental de la evolución temporal en la erosión local en pilas de puentes circulares mediante el uso de paneles sumergidos” [1], Zevallos (2019) se realiza una demostración experimental la erosión hidráulica y mediante paneles sumergidos se busca demostrar la protección y disminución del impacto generado por el descenso elevado en el lecho fluvial alrededor de la pila, debido a la remoción del material del fondo lo cual ocasiona erosión de acción localizada.

Rojas (2015) en su tesis titulada “Modelamiento hidráulico para el estudio de la socavación en pilares de puentes y análisis de los métodos para su cálculo” [2] realiza 60 ensayos en pilares circulares y alargados, relacionando el tiempo y la socavación, con esto se recomienda la aplicación de métodos que brinden mejor resultado para tener la mayor efectividad de estimación a la hora de realizar el diseño adecuado de la cimentación de puentes ubicado sobre un río ajustado a datos en puentes hidráulicos en la vida real.

### Formulación del problema

En el contexto del cambio climático y de la inminente ocurrencia de un fenómeno de niño global, se espera el incremento de los caudales en varios ríos del país, generando problemas de socavación en pilares. En tal sentido, el presente trabajo busca comparar los sistemas capaces de mitigar la erosión local en pilares de puente de modo que no genere la socavación de sus cimientos y con ello el colapso de la

estructura. Se busca proteger las decenas de puentes ya construidos en nuestro país, ya que gran parte de ellos no cuenta con un mecanismo que permita reducir la eventual erosión y póstuma socavación ante un incremento inusual del caudal del río. Ante esto nos formulamos las siguientes interrogantes:

¿Qué tipo de mecanismo de defensa de pilar es el más efectivo? ¿Cuál es el factor determinante en la generación de flujo vorticoso que provoca la erosión?

### A. Objetivos

- 1) Buscar la aplicabilidad de los conceptos y principios de sección hidrodinámica y generadores de vórtices.
- 2) Comparar los tipos de defensa de pilares mediante una revisión sistemática de literatura e identificar la más eficiente.
- 3) Proponer un mecanismo de defensa para pilares de puentes que evite la generación de vórtices para así mitigar la erosión del fondo de los pilares.

## II. METODOLOGÍA

En la metodología se presentará el proceso seguido para el desarrollo de la investigación. En base a los objetivos se ha elaborado un framework que muestra el proceso del desarrollo de la metodología. Se inició definiendo el enfoque a utilizar, que sería cualitativo, luego por medio de la revisión de investigaciones, ya realizadas sobre el tema, se recopiló información sobre propuestas y métodos para disminuir la erosión en pilares de puentes. Con los datos obtenidos se realizó un análisis que concluirá con una comparación y discusión de resultados; finalmente se realizó la propuesta de solución, tal como se evidencia en la Fig. 1.



Fig. 1: Framework  
Nota: Elaboración propia

## A. Base teórica

### 1) Vórtices forzados

Como se menciona en [10], el vórtice forzado se genera por el contacto entre un fluido real en movimiento y un obstáculo que puede ser una pared fija u otro fluido cuya velocidad sea contraria a la del primero, o simplemente cuya velocidad sea sensiblemente distinta a la del mencionado fluido real. Este caso se presenta cuando una corriente de agua se aproxima a una transición o a cualquier obstáculo que, debido al contacto con este cuerpo sólido, genera una rotación que provoca la formación del fenómeno tal como se visualiza en la Fig. 2.

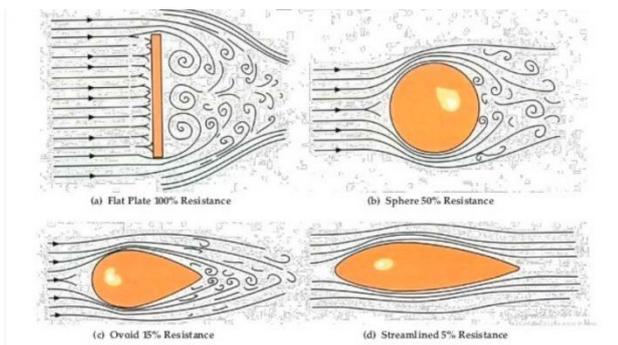


Fig. 2: Formación de vórtices  
Nota: Adaptado de [ 12]

### 2) Generador de vórtices

Los generadores de vórtices se suelen emplear con mucha frecuencia sobre componentes aerodinámicas, como menciona el Grupo de Investigación Green Energy Taldea [64] “la función de un generador de vórtices es crear un vórtice que energice la capa límite introduciendo aire de la corriente exterior a gran velocidad en esta, y retrase el desprendimiento de esta, retrasando, consecuentemente, de forma considerable la entrada en pérdida aerodinámica para una misma velocidad incidente del viento”.

Bajo esta premisa se trata de incorporar este mecanismo en las secciones de pilares bajo acción de fluidos, para reducir la generación de vórtices que desencadena la erosión y la posterior socavación. 3) Erosión en pilares

La erosión hidráulica la definiremos como un fenómeno causado por el movimiento de materiales del cauce, existen muchos tipos de erosión y para esta investigación nos centraremos en la erosión local de los pilares de puentes, esta se produce principalmente por el choque del flujo contra la pila produciendo corrientes vorticosas que causan el fenómeno [61]. En la fig. 3 podemos ver la erosión local en un pilar.

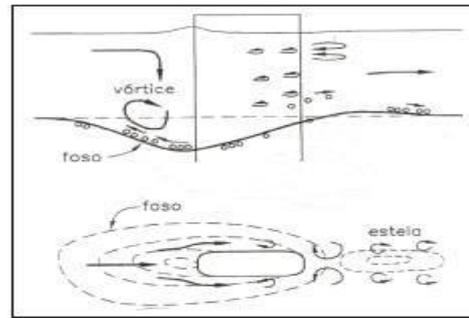


Fig. 3: Erosión local en pilares de puentes  
Nota: Adaptado de [61]

Pero ¿qué causa la erosión?, la erosión es causada por el flujo vorticoso que se genera por la pérdida de energía en la interacción del flujo con la sección del pilar, he ahí la importancia del diseño de los pilares con sección hidrodinámica, ya que de esta manera no se perderá demasiada energía que se termine transformando en vórtices. De no haber un correcto diseño de pilares nos encontraríamos numerosas fallas ocurridas [60]. También debemos conocer cuáles son las causas más significativas en las fallas de los pilares de puente, a través de la investigación de D.W. Smith podemos ver el número de fallas ocurridas para cada una de las causas en un pilar, ver Fig. 4.



Fig. 4: número de fallas, de acuerdo a su origen, ocurridas en 143 recuperado de “Bridge failures” que realizó D. W. Smith  
Nota: Adaptado de [37]

### 4) Socavación en pilares hidráulicos

La socavación es la excavación profunda causada por el flujo del río [51], en este caso nos enfocaremos en las socavaciones locales ubicadas al pie del pilar, en la cimentación o alrededor de estas, ya que puede causar el desplome del pilar.

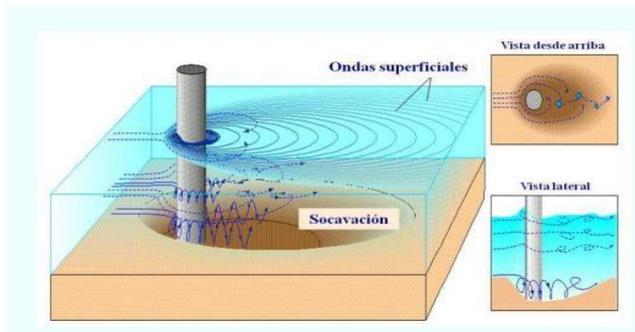


Fig.5: socavación local, puede causar la caída del pilar. S.f.  
Nota: Adaptado de [37]

En la Fig. 5 se evidencia la socavación que veremos en esta investigación es la causada por la acción de los vórtices descritos, pero también hay que tener en cuenta que puede ser causada por el incremento del caudal ya que en una avenida aumenta la velocidad del flujo [56], también puede darse por la interrupción de cuerpos ajenos como la basura, por el estrechamiento del cauce que da paso a la profundización del canal, por el flujo en curva o por los pilares.

### Perfiles NACA

Los perfiles NACA (Comité Asesor Nacional de Aeronáutica) son perfiles aerodinámicos que se crearon a principios de la década de los 30, fueron desarrollados de manera racional y sistemática con el objetivo de desarrollar perfiles eficientes y predecibles para aeronaves. Estos usan una nomenclatura en forma de serie de números, antecidos por el sobrenombre NACA, que determina las características propias de cada perfil. Así se pueden clasificar en perfiles de 4, 5 o 6 cifras y en perfiles serie 1, 6, 7 y 8 [39]. A continuación, se muestra un típico perfil NACA con sus respectivas partes.

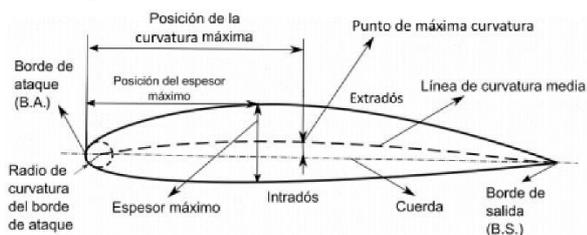


Fig. 6 : Perfil aerodinámico NACA típico y sus partes  
Nota: adaptado de [40]

Los perfiles se pueden dividir en simétricos y asimétricos, el primero es un perfil sin combadura, es decir, la línea de combadura media y la cuerda aerodinámica coinciden; asimismo, el extradós es simétrico al intradós con respecto a la línea de combadura media [39]. Debido a esta condición geométrica, el perfil simétrico tiene un bajo costo y es de fácil construcción con respecto a un perfil asimétrico. Por otra parte, los perfiles asimétricos tienen mayores ventajas aerodinámicas con respecto a la generación de sustentación y ante su eventual entrada en pérdida. La generación de la fuerza de sustentación aerodinámica se explica gracias a la existencia

de una zona de alta presión en la superficie del intradós y una zona de baja presión en la superficie del extradós. Este desequilibrio neto de la distribución de presión es producido por la diferencia de velocidades del viento relativo en el extradós e intradós del perfil aerodinámico [39].

## III. RESULTADOS

### A. Carcaza

Se recurrió al análisis y utilización de perfiles aerodinámicos NACA de 4 cifras, en tal sentido por medio de un ejemplo se explica el perfil NACA de 4 cifras, que dicho sea de paso es de nuestro interés. Si analizamos el perfil NACA 0025, obtendremos que la primera cifra específica que la combadura es el 0% de la cuerda aerodinámica, la segunda indica que la combadura es máxima en la posición 0 y las 2 últimas cifras indican que el espesor máximo del perfil es el 25% de la cuerda [39]. Cabe resaltar que justamente cuando las 2 primeras cifras son 0, se trata de un perfil simétrico. Seguidamente se adjunta la ecuación que modela la forma de un perfil simétrico de 4 cifras [39]:

$$y_t = 5t[0.2969\sqrt{x} - 0.1260x - 0.3516x^2 + 0.2843x^3 - 0.1015x^4] \quad (1)$$

Donde  $c$  es la longitud de la cuerda aerodinámica,  $x$  es la posición a lo largo de la cuerda aerodinámica, desde 0 hasta  $c$ ,  $t$  es la relación del ancho máximo con la longitud de la cuerda y  $y_t$  es la mitad del espesor en función del valor de  $x$  [39].

Seguidamente, presentamos la secuencia de pasos que se siguió para diseñar el perfil a proponer. En primer lugar, debemos de tener en cuenta que los perfiles aerodinámicos son capaces de generar sustentación por medio de una fuerza de sustentación, esta se produce debido a la asimetría del perfil. Motivo por el cual necesitamos usar un perfil simétrico, lo que automáticamente definirá los 2 primeros números de nuestro perfil NACA, que serán 0 y 0.

En segundo lugar, definimos la relación que tendrá el ancho máximo de nuestro perfil en comparación con su largo ( $t$ ), que, por motivos de viabilidad económica y factibilidad de construcción en la realidad, será de 1/4. Lo que supondría que, si se quiere revestir un pilar de 2 m de ancho, la carcasa hidrodinámica llegaría a medir aproximadamente 8 m. A su vez, si expresamos  $t$  en porcentaje, 25%, nos definirá las 2 últimas cifras de nuestro perfil, que finalmente tendría por nombre: NACA0025

En tercer lugar, obtendremos la ecuación que modele nuestro perfil reemplazando  $t$  en la ecuación general para perfiles de 4 cifras y asumiendo un  $c = 1$  (solo para modelar), de modo que nuestras ecuaciones finales para la formación de la sección transversal de la carcasa:

$$y_1 = + \frac{0.25}{0.2} [0.2969\sqrt{x} - 0.1260x - 0.3516x^2 + 0.2843x^3 - 0.1015x^4]$$

$$y_2 = - \frac{0.25}{0.2} [0.2969\sqrt{x} - 0.1260x - 0.3516x^2 + 0.2843x^3 - 0.1015x^4]$$

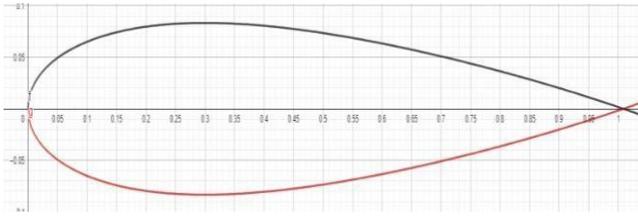


Fig. 7: Modelamiento de nuestro perfil "NACA0025"  
Nota: Elaboración propia

De este modo obtendremos la geometría de la sección que deberá tener nuestra carcasa hidrodinámica, ahora si se quisiera aplicar a un pilar en concreto, solo haría falta que se escale hasta que se logre envolver a dicho pilar. Además de considerar la altura necesaria para que lo cubra

### B. Enrocado de los pilares de puentes

Galvez y Guillen [13] evaluaron la socavación de pilares en puentes según el diámetro medio del enrocado a utilizar como se puede observar en la tabla I:

Tabla I  
Socavación de pilares en distintos proyectos

Proyecto	Socavación del pilar	D50 mm	Caudal
Avalos y Zegarra	1.7	50.44	440.16
Cotrina y Hernandez	5.89	15.61	664.37
Chirinos	5.48	19	360
Galvez y Guillen	3.13	47.25	1235

Nota: Elaboración propia

Almonte y De la cruz [15] plantearon un diseño de enrocado eficiente para combatir la socavación y erosión, este diseño se puede observar en la figura:

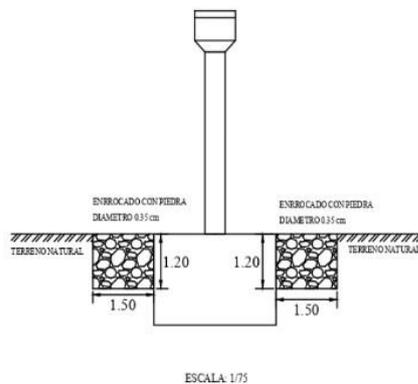


Fig. 8: Modelo de enrocado para los pilotes de puentes  
Nota: Adaptado de 15

En el artículo "Evaluación y diseño de protección frente a la socavación hidráulica del puente Unocolla, Juliaca – Puno" [42] vemos la propuesta del uso del enrocado para evitar la socavación en pilares hidráulicos en la cual se establece

parámetros como la ubicación geográfica, los datos topográficos con un suelo tipo GP, con respecto a los datos hidrológicos se tomaron en cuenta la máxima avenida, finalmente mediante el programa HEC-RAS, se halló la socavación en cuatro pilas del puente las cuales fueron: 1.2m, 2.4, 1.2m y 1.2m [60]. La solución a este tipo de socavación es el enrocado, con un grosor de tres veces el diámetro de dicha piedra, el método para la colocación de rocas es distintas, se puede optar por: Método modificado de Isbash, Método del "Bureau de Reclamación" o el Método gráfico.

Tabla II

Resumen de los resultados de erosión en enrocado

Pilar	Erosión
Primer pilar	1.2 m
Segundo pilar	2.4 m
Tercer pilar	1.2 m
Cuarto pilar	1.2 m

Nota: Elaboración propia

M. Polo, M. Valerio. [28] plantea un nuevo método de protección para estructuras propensas a socavaciones por la acción del fluido a las que está expuesta. Este método se propone a partir de la comparación con otras metodologías ya conocidas, estos resultados los podemos observar en la Tabla III, Tabla IV y Tabla V.

Tabla III:

Esfuerzo cortante en el fondo [28]

Propuesta de reforzamiento	En el fondo			Conclusión
	Esfuerzo actuante (kg/m <sup>2</sup> )	<	Esfuerzo permisible (kg/m <sup>2</sup> )	
No realizar el refuerzo	49.91	C	63.85	Cumple con el criterio de no erosionabilidad
Revestimiento de enrocado	49.91	C	121.54	Cumple con el criterio de no erosionabilidad
Revestimiento con bolsacreto	49.91	NC	9.70	No cumple con el criterio de no erosionabilidad
Encamisado	49.91	C	88700.00	Cumple con el criterio de no erosionabilidad

Tabla IV

Esfuerzo cortante en el talud [28]

Propuesta de reforzamiento	En el fondo			Conclusión
	Esfuerzo actuante (kg/m <sup>2</sup> )	<	Esfuerzo permisible (kg/m <sup>2</sup> )	
No realizar el refuerzo	49.91	NC	14.05	No cumple con el criterio de no erosionabilidad
Revestimiento de enrocado	49.91	C	48.62	Cumple con el criterio de no erosionabilidad
Revestimiento con bolsacreto	49.91	NC	9.70	No cumple con el criterio de no erosionabilidad
Encamisado	49.91	C	88700.00	Cumple con el criterio de no erosionabilidad

Tabla V  
Esfuerzo cortante en curva [28]

Propuesta de reforzamiento	En el fondo			Conclusión
	Esfuerzo actuante (kg/m <sup>2</sup> )	<	Esfuerzo permisible (kg/m <sup>2</sup> )	
No realizar el refuerzo	37.93	NC	12.65	No cumple con el criterio de no erosionabilidad
Revestimiento de enrocado	37.93	C	43.76	Cumple con el criterio de no erosionabilidad
Revestimiento con bolsacreto	37.93	NC	9.70	No cumple con el criterio de no erosionabilidad
Encamisado	37.93	C	88700.00	Cumple con el criterio de no erosionabilidad

### C. Soluciones alternativas

#### 1) Dispositivo reductor de energía de flujo

Camizan F. Noemi [28] determinó que la distribución de dispositivos de reducción de energía más eficiente es la presentada en la figura 9, donde obtuvo los resultados presentados en la Tabla 6

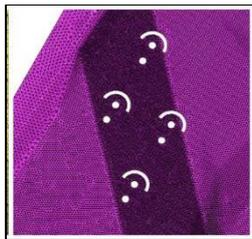


Fig. 9: distribución de dispositivos disipadores de energía y pilares de puente

Nota: Adaptado de [4]

Tabla VI  
resumen de los resultados de socavación [4]

Pilares	Socavación sin dispositivo (m)	Socavación con dispositivo (m)	Reducción de socavación
Pilar 1	2.63	2.34	11%
Pilar 2	2.59	2.52	2.7%
Pilar 3	2.55	2.17	14.9%
Pilar 4	2.30	2.17	5.7%
Pilar 5	2.46	2.11	14.2%
Pilar 6	2.38	2.07	13%
Pilar 7	2.51	2.05	18.3%
Pilar 8	2.52	2.04	19%

Nota: Elaboración propia

#### 2) Muros Guía

Marcela L. [58] propone como solución para mitigar la erosión dada en los estribos a un conjunto de muros que denomina como ‘‘muros guía’’. Para lo cual realizo un conjunto de ensayos donde se tomó en cuenta dos factores importantes, la transparencia y la altura de los muros guía. La

variación de estos dos factores permite reconocer una diferencia en la erosión producida. Los resultados se presentan en la Tabla VII

Tabla VII  
resumen de los resultados de erosión [4]

ENSAYO	DURACIÓN (h)	PROTECCIÓN	CANTIDAD	ALTURA (cm)	PROFUNDIDAD DE EROSIÓN (cm)	REDUCCIÓN DE EROSIÓN
N°1	72	---	---	---	26	0%
N°2	72	PILOTES	37	CTE	4.9	81%
N°3	72	PILOTES	19	CTE	15	42%
N°4	72	PILOTES	18	CTE	18	31%
N°5	72	PILOTES	10	CTE	18.3	30%
N°6	72	PILOTES	5	CTE	23.9	8%
N°7	48	---	---	---	24.2	0%
N°8	48	Geotubos	1	4,4	21.1	13%
N°9	48	Geotubos	2	8	19.5	19%
N°10	48	Geotubos	3	12,9	15.8	35%
N°11	48	Geotubos	4	16,6	7.7	68%
N°12	48	Geotubos	5	20,9	6.1	75%

Nota: Elaboración propia

## IV. DISCUSIONES

Nuestro equipo de investigación aborda la problemática de erosión local en puentes desde un punto de vista hidrodinámico, en donde se atacan los principales factores que propician la generación de vórtices, que finalmente producen la erosión. En virtud de ello, proponemos el diseño de una carcasa hidrodinámica que funcione como mecanismo de defensa del pilar logrando diezmar la erosión local y socavación. Además, que ante la eventual crecida de los ríos sea capaz de evitar la erosión excesiva y la póstuma socavación de los pilares, que generaría el colapso de la estructura.

Entre las distintas propuestas para la solución a la erosión local en pilares de puentes encontramos el enrocado, pero hay que destacar la importancia de considerar diversos aspectos geográficos, topográficos e hidrológicos al abordar el problema de la socavación en pilares hidráulicos. Además, se resalta la necesidad de elegir cuidadosamente el método de colocación de rocas para garantizar una protección efectiva contra la socavación

Por otro lado, los dispositivos de reducción de energía resultaron ser una solución viable para la mitigación de la socavación en los pilares. Camizan F. Noemi [28] demostró que todos los pilares equipados con estos dispositivos presentaron reducción de erosión, sin embargo, los valores de reducción no son uniformes, ya que se puede apreciar valores muy bajos como 2% y por otro lado, valores altos como 19%.

Por último, los muros guía, a diferencia de los dispositivos reductores, presentan valores de mitigación uniformes y proporcionales a la cantidad de muros. Este comportamiento de los resultados nos brinda más seguridad y confiabilidad para con esta propuesta de solución. De ese modo, de entre las propuestas alternas, podemos resaltar a los muros guía por sobre los dispositivos reductores.

## V. CONCLUSIÓN

La erosión local en pilares de puentes representa un desafío crítico para la integridad y seguridad de infraestructuras vitales. Este fenómeno, que debilita la base de los pilares y compromete la estabilidad estructural, se identifica como una amenaza significativa a la capacidad de carga y, por ende, a la funcionalidad de los puentes. La investigación enfatiza la urgencia de abordar este problema mediante el desarrollo y aplicación de soluciones efectivas, destacando la importancia de la prevención y el mantenimiento proactivo. La necesidad de medidas preventivas se hace más apremiante en áreas propensas a eventos climáticos extremos, los cuales pueden intensificar la erosión y aumentar el riesgo de fallos estructurales. Este estudio confirma que, además de implementar estrategias para mitigar la erosión, es fundamental adoptar un enfoque holístico que incluya la evaluación continua y el mantenimiento de los pilares para asegurar la longevidad y la seguridad de los puentes. En resumen, la combinación de prevención, diseño innovador y mantenimiento adecuado emerge como la estrategia más efectiva para proteger estas estructuras críticas contra los impactos adversos de la erosión local.

## VI. REFERENCIAS

- [1] Cevallos Rivera, W. Z. (2019). Demostración experimental de la evolución temporal en la erosión local en pilas de puentes circulares mediante el uso de paneles sumergidos (Bachelor's thesis, Quito, 2019.).  
<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19959>
- [2] Rojas G., W. T. (2015). Modelamiento hidráulico para el estudio de la socavación en pilares de puentes análisis de los métodos para su cálculo.
- [3] Seaurz, A. (2006). Dimensionamiento hidráulico optimizado de puentes con terraplenes. Piura, Peru: Universidad de Piura. Recuperado de:  
<https://www.pepevasquez.com/HidraulicaPuentes.pdf>
- [4] José Vásquez. 17 de noviembre de 2003. RIOS. PepeVasquez.com. Recuperado de: <https://www.pepevasquez.com/rios.html>
- [5] G. G. Arriola Carrasco, "Influencia del proceso de acorazamiento en la socavación de los pilares del puente Reque", *ICTI*, vol. 4, n.º 2, diciembre 2017
- [6] Gómez-Cunya, Luis-Angel. "Socavación alrededor de pilares de puentes en lechos granulares no cohesivos", GM tesis, UNI, Lima, Perú, 2010.
- [7] L. Teixeira, F. Vilaseca, y C. Chreties, "Avances para el estudio del efecto de la viscosidad en el dimensionado de enrocado de protección de pilas de puentes", *AQUA-LAC*, vol. 8, n.º 1, pp. 5861, 1.
- [8] Arbulú, R. J. "Socavación en pilares de puentes: Análisis comparativo de metodologías predictivas", UNPRG, Lambayeque. Perú, 2009.
- [9] Arneson L.A., Zevervengen L.W., Lagasse P.F & Clopper P.E, Evaluation Scour at Bridges. Estado de Virginia. Estados Unidos. Publicaciones de la Universidad del Estado de Virginia, 2012
- [10] Gardea-Villegas, "Conceptos básicos sobre la formación y teoría de los vértices", *Ingeniería Investigación y Tecnología* (México), 02, 81-87, abril, 2001.
- [11] Berezowsky V.M.& Jiménez C.A. "Método Simplificado para calcular el Proceso de Acorazamiento en Cauces". Publicaciones de la Universidad Autónoma de México, UNAM, Ciudad de México. México,1995.
- [12] Egúsqiza, C. "Tratamiento de los efectos de la socavación en los estribos del Puente Matachico carretera La Oroya – Huancayo", Tesis, UNI, Lima, Perú, 2010.
- [13] Guillen, A. H., & Gálvez A, C. "Evaluación de la socavación producida en pilares y estribos del puente Libertad causado por el fenómeno el niño distrito de Guadalupe", Trabajo de investigación, UPN, Trujillo, Perú, 2019
- [14] Enriquez Soto, Amador. "Modelo De Socavación En La Base Del Pilar Del Puente Mariscal Cáceres", Tesis pregrado, UNCP, Huancayo, Perú, 2013.
- [15] Cotrina C. y Hernandez G. "Estudio de la socavación del proyecto del puente el Inca ubicado en el río Chorobal del distrito de Chao mediante simulación numérica unidimensional", Tesis pregrado, UPAO, Trujillo, Perú, 2017.
- [16] Felipe, E. "Socavación producida por el río Huallaga al puente Colpa Alta en la provincia de Huánuco, utilizando los Métodos de Artamanov, Straub y Maza, en el HEC-RAS", Tesis de Máster, Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Lima, Perú, 2016.
- [17] Avalos Castro, Carlos Miguel, y Julio Cesar Zegarra Tordoya. "Evaluación De La Socavación Que Producirá En Pilares Y Estribos Del Puente Moche, La Derivación Del Caudal De La Quebrada San Idelfonso", Tesis de grado, UPN, Perú, 2018.
- [18] D. Zicle, "Estudio de la socavación en las pilas de un puente y medidas de protección". *Caso del puente Coatán, Chiapas*". Tesis de Bachillerato, Tesis de Bachillerato, UNAM, México, 2023.
- [19] A. Juárez. R. Ruiz Y Zurvia, E. Tovar, E. Catana, A. Ramirez, "Reducción de la socavación al pie de pilas de puentes". No. de Registro SIP: 20082519, 2009.
- [20] P. Jaramillo, "Evaluación del Efecto de la Geometría de Pilares en la Socavación del Cauce" Tesis de Bachillerato, Universidad de Piura, Piura, 2017.
- [21] F. Von Quednow Debry, "Métodos de Protección contra Erosión en Estribos de Puentes Fluviales". Tesis de Bachillerato, Universidad del Valle Guatemala, Guatemala, 2012.
- [22] A. Manforte, "Socavación local en pilas". Tesis de Maestría, UNAM, México, 1980.
- [23] J. A. Maza, "Socavación en cauces naturales". Instituto de Ingeniería de la UNAM, México, 1968.

- [24] M. Huiza, D. Ventura, (2020). "Estructuras Fluviales de Concreto para la Reducción de Socavamiento en el Cauce del río Ichu". Tesis de Bachillerato, Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica, 2020.
- [25] W. Condori, "Análisis y Alternativas de Protección contra la Socavación en los Puentes Central y Ramana de la Localidad de Putina". Tesis de Bachillerato, Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez, 2018.
- [26] R. Jiménez. M. Roldán. D. Uribe, (2006). "Reducción de la socavación local en Pilas Circulares mediante el uso de Rugosidades Artificiales". Tesis de Bachillerato, Instituto Politécnico Nacional, 2006.
- [27] M. Caminati, "El método del Índice de erodabilidad en el cálculo de la erosión local en pilares de Puentes". Tesis de Bachillerato, Universidad de Piura, Piura, 2003.
- [28] M. Polo Campos. M. J Valerio Arrieta. (2022). "Propuesta de encamisado para el reforzamiento de estribos con el fin de evitar la socavación del puente Morón en Chaclacayo". Tesis de Bachillerato, Universidad Peruana Los Andes, Lima, 2020.
- [29] Camizan Flores, M. N. (2021). Modelamiento hidráulico para el estudio de la socavación local en los pilares del Puente San Martín mediante la aplicación de un dispositivo reductor de energía de flujo, Río Chillón, Lima, 2021. Recuperado de: <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/27713/CamizanFlores%20Marjorie%20Noemi.pdf>
- [30] Rubio García, J. L. (2019). Determinación de la socavación local en los pilares del puente sobre el río Cabaña (Doctoral dissertation, Departamento de Geología). Recuperado de: <https://ninive.ismm.edu.cu/bitstream/handle/123456789/3760/RubioGarcia2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [31] Cotrina Cano, J. W., & Hernández Genovez, I. W. (2018). Estudio de la socavación del proyecto del puente el Inca ubicado en el río Chorobal del distrito de Chao mediante simulación numérica unidimensional. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/20.500.12759/4171>
- [32] Bazan Ravines, M. J., & Coronado Vargas, J. D. Control de erosión fluvial en la curva externa, haciendo uso de paletas sumergidas en los sectores La Perla-Florida y Cantagallo en el Río Rímac aplicando modelamiento numérico. Recuperado de: [https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/654947/BazanR\\_M.pdf?sequence=3](https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/654947/BazanR_M.pdf?sequence=3)
- [33] Valenzuela Saavedra, M. A. (2010). Refuerzo de puentes existentes por cambio de esquema estático. Aplicación al puente San Luís en Chile (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya). Recuperado de: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/11943/Valenzuela%20Saavedra%20Tesis%20Master.pdf>
- [34] Moreno Calderón, J. Á. (2019). Evaluación del estado del arte de los paneles sumergidos para el control fluvial (Doctoral dissertation). Recuperado de: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/76522/1013576896.2019.pdf?sequence=1>
- [35] Farroñan Inoñan, R. W. (2022). Defensa en pilas y estribos para puentes debido a los efectos de erosión local y socavación. Recuperado de: [https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1184/ICI\\_106.pdf](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/1184/ICI_106.pdf)
- [36] Scacchi, G. B. (2003). Erosión en estribos de puentes ubicados en valles de inundación (Doctoral dissertation, Tesis de Maestría en Ingeniería de los Recursos. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe. Argentina).
- [37] Felices, A. R. (2013). Erosión en Pilares y Estribos de Puentes. AR Felices, Introducción a la Hidráulica de las Obras Viales. Recuperado de:
- [38] Monge-Aguilar, A. J. (2007). Sistemas de control de erosión en la subestructura de puentes. Recuperado de: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/6178/sistemasdecontroldeerosionenpuentes.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [39] Patiño Bazaldúa, A. F. (2017). Caracterización del vórtice de salida de un ala rectangular mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León). Recuperado de: <https://eprints.uanl.mx/17854/1/1080252121.pdf>
- [40] De La Cruz Mayorga, G. J., & Sharif Rafique, M. T. (2021). Estudio, simulación y optimización de un perfil alar (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya). Recuperado de: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/357240/delaCruzSharifTfeEstudioSimulacionyOptimizaciondeunPerfilAlar.pdf?sequence=1>
- [41] R. W. Farroñan, "Defensa en pilas y estribos para puentes debido a los efectos de erosión local y socavación", Trabajo de investigación para optar el grado académico de bachiller, Lambayeque, UCSTM, Chiclayo, Perú, 2022.
- [42] W. Herbas, "Análisis de la influencia de la socavación en las pilas para el puente Pairumani, implementando nuevos conceptos", Tesis Doctoral, Pahirumani, UMSS, Bolivia, 2022.
- [43] N. A. Pilco, S. Vega, "Evaluación y diseño de protección frente a la socavación hidráulica del puente Unocolla, Juliaca-Puno" Rev de Invt Cient Tayacaja, diciembre, 2021.
- [44] J. S. Fajardo & Y. F. Sierra, "Análisis del efecto que tiene las formas de las pilas en el comportamiento hidrodinámico y en el transporte de sedimentos de fondo para un tramo del río Magdalena en el departamento de Bolívar-Colombia, mediante la modelación en iber", Trabajo de grado, UCC, Bolivar, Colombia, 2021.
- [45] J. Llantoy, "Evaluación y diseño de estructuras hidráulicas para mejorar la defensa ribereña de los estribos del puente Chanchara empleando el algoritmo SFM-DMV en el centro poblado de compañía, distrito de Pacaycasa", Trabajo de grado, ULADECH, Ayacucho, Perú, 2021.

- [46] M. N. Camizan, "Modelamiento hidráulico para el estudio de la socavación local en los pilares del Puente San Martín mediante la aplicación de un dispositivo reductor de energía de flujo", Trabajo de grado, UPN, Lima, Perú, 2021. <http://www.revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/2137>
- [47] F. E. Matamoros, "Diseño Hidráulico y Estructural de Espigones Frente a la Socavación de los Estribos del Puente Matapuquio-Pariahuanca-Junín", Trabajo de grado, UPLA, Junin, Perú, 2022.
- [48] G. B. Scacchi, "Interacción entre el flujo turbulento y los procesos de erosión junto a estribos de puentes protegidos. Estudio experimental", Tesis de Bachillerato, Universidad de Piura, Piura, 2017.
- [49] N. A. Pilco, S. Vega, "Evaluación y diseño de protección frente a la socavación hidráulica del puente Unocolla, Juliaca-Puno" *Rev de Invt Cient Tayacaja, diciembre, 2021.*
- [50] G. Carrasco, "Influencia del proceso de acorazamiento en la socavación de los pilares del puente Reque", *Rev Científica de Ingeniería, Vol 4, Núm 2, diciembre, 2017.*
- [51] N. Pilco, De la Cruz Vega, S. A. Evaluación y diseño de protección frente a la socavación hidráulica del puente Unocolla, Juliaca-Puno. *LLamkasun: Revista de Investigación Científica y Tecnológica (2022), Pag 74-78.* <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8510592>
- [52] G. Caballero, G. Alcalde, C. B. Evaluación de la socavación producida en pilares y estribos del puente Libertad causado por el fenómeno del niño distrito de Guadalupe, La Libertad 2019. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/22298>
- [53] L. Pérez. Evaluación del diseño hidráulico y estructural de las defensas ribereñas en la margen izquierda del puente comuneros. (2022) [https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/11559/4/IV\\_FIN\\_105\\_TE\\_Perez\\_Silva\\_2022.pdf](https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/11559/4/IV_FIN_105_TE_Perez_Silva_2022.pdf)
- [54] W. Castañeda. Diseño estructural-hidráulico de defensa ribereña del río Chicama tramo puente San Polo-banos Chimú, 2019. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/1680971>
- [55] T. Oviden, E. Quiroz. Propuesta hidráulica entre gavión y enrocado del río Chuquillanqui en el tramo que limita los caseríos Chuquillanqui y Pinchaday-distrito de Lucma-departamento La Libertad. (2019). <https://repositorio.upao.edu.pe/handle/20.500.12759/5927>
- [56] M. Párraga. Estudio de la factibilidad para el encausamiento con enrocado para proteger el puente ubicado sobre el Río Congo en el recinto La Carlota del cantón Balzar (Bachelor's thesis, Guayaquil: ULVR, 2015.). <http://repositorio.ulvr.edu.ec/handle/44000/1525>
- [57] M. Guevara. Socavación en puentes. Popayán, Colombia: Lemoine Editores y Editorial Universidad del Cauca. 2016
- [58] Reynares, M., Scacchi, G., Possi, M. L., Schreider, M., & Spais, A. MUROS GUÍA COMO MEDIDA DE PROTECCIÓN CONTRA LA EROSIÓN EN ESTRIBOS DE PUENTES. INFLUENCIA DE LA TRANSPARENCIA Y ALTURA.
- [59] Gamboa Melgarejo, J. L., & Quintanilla Rios, V. S. Modelamiento numérico hidrodinámico para reducir la socavación local en pilares cilíndricos y rectangulares de puentes de ríos.
- [60] Encalada Rojas, M. K. (2022). Evaluación de la socavación local en los pilares de concreto del puente Ramis Puno 2020.
- [61] A. Felices. Erosión en Pilares y Estribos de Puentes. AR Felices, Introducción a la Hidráulica de las Obras Viales. 2013
- [62] M Caminati. El método del índice de erodabilidad en el cálculo de la erosión local en pilares de puentes. 2012 [https://pirhua.udel.edu.pe/bitstream/handle/11042/1184/ICI\\_106.pdf](https://pirhua.udel.edu.pe/bitstream/handle/11042/1184/ICI_106.pdf)
- [63] A. Rocha, "Erosión en pilares y estribos de puentes", IV Congreso Internacional de la Construcción-ICG, Lima, 2008, pp. 3-4.
- [64] . Grupo de Investigación Green Energy Taldea, "Modelado Fluidodinámico de Generadores de Vórtices", [Online]. Available. : Lineas de Investigación - Grupo de Investigación Green Energy - UPV/EHU [Accessed: October. 26, 2023]
- [65] T. Burstein. "Reflexiones sobre la gestión de los recursos hídricos y la salud pública en el Perú", *Rev Peru Med Exp Salud Publica*, pp, 398, 2018.