

# Mejoramiento de las propiedades mecánicas de la lechada de cemento hidráulico con polietilén-tereftalato (PET)



## Colaboración

Raúl Enrique Contreras Bermúdez; Stefany Pamela Villegas Zenil, Universidad Veracruzana / Zona Poza Rica-Tuxpan; Heriberto Esteban Benito, Instituto Politécnico Nacional de México / CIIEMAD; Alejandra Velasco Pérez; Tania García Herrera, Universidad Veracruzana / Zona Orizaba-Cordoba

Fecha de recepción: 04 de junio de 2024

Fecha de aceptación: 22 de noviembre de 2024

**RESUMEN:** El uso de partículas de polietileno tereftalato (PET) para mejorar las propiedades del concreto hidráulico es un tema de interés para la industria de la construcción. El PET aporta varias características al concreto hidráulico, como una mejor resistencia térmica, cambios en la viscosidad, resistencia a la compresión, entre otras. Estas características del concreto son adecuadas para abordar los desafíos de la construcción moderna. En el presente trabajo se utilizó un porcentaje de 10, 20 y 30 % en peso de partículas de PET para modificar las propiedades de la lechada de cemento clase H, a las mezclas resultantes se les determinó viscosidad, contenido de agua libre y resistencia a la compresión. Los resultados demostraron que una lechada de cemento modificada con 20% en peso de PET presentó las características más idóneas para ser usado en la cementación de pozos petroleros.

**PALABRAS CLAVE:** PET, cemento, reciclado, propiedades mecánicas.

**ABSTRACT:** The use of polyethylene terephthalate (PET) particles to improve the properties of hydraulic concrete is a topic of interest to the construction industry. PET contributes several characteristics to hydraulic concrete, such as improved thermal resistance, changes in viscosity, compressive strength, among others. These characteristics of concrete are suitable to address the challenges of modern construction. In the present work, a percentage of 10, 20 and 30 wt.% of PET particles were used to modify the properties of class H cement slurry, the resulting mixtures were determined for viscosity, free water content and compressive strength. The results showed that a cement slurry modified with 20% by weight of PET had the most suitable characteristics for use in oil well cementing.

**KEYWORDS:** PET, cement, recycling, mechanical properties.

## INTRODUCCIÓN

Los plásticos constituyen una preocupación primordial debido a que son materiales poliméricos derivados del petróleo, cuya estructura, formada por largas cadenas de monómeros, dificultan su biodegradación, la cual puede tardar entre 450 y 1,000 años en condiciones ambientales [1]. Esto genera un daño significativo a los ecosistemas marinos al acumularse en ellos, y al mismo tiempo representan una amenaza para la salud pública. Se estima que entre el 10% y el 15% de los residuos plásticos

terminan en los océanos, y durante el proceso de degradación el tereftalato de polietileno (PET) libera microplásticos que entran a la cadena alimentaria.

Por otro lado, el PET que pertenece a la familia de los poliésteres, se han convertido en un material ampliamente utilizado en la vida cotidiana debido a su versatilidad y múltiples aplicaciones. Su creciente demanda ha impulsado un aumento en su producción en los últimos 65 años; se estima que actualmente se producen alrededor de 30 millones de toneladas de plásticos anualmente, con un incremento del 4% anual [2], [3]. El PET se utiliza comúnmente en la fabricación de botellas, envases para alimentos, bebidas y productos de cuidado personal. Este material destaca por su excelente capacidad de formar una barrera contra el oxígeno y dióxido de carbono, lo que lo hace ideal para prolongar la vida útil de los productos envasados. Entre sus principales características se encuentra su gran ligereza y excelente resistencia mecánica, se produce a partir del petróleo crudo (64%), derivados líquidos del gas natural (23%) y aire (13%) [4].

El PET ha sido objeto de diversas investigaciones y avances tecnológico con el propósito de disminuir su impacto ambiental [2]. En el proceso de reciclaje, este termoplástico se somete a un proceso de limpieza, trituración y fundición para obtener una resina con características fisicoquímicas adecuadas para la fabricación de nuevos productos. En el ámbito de la ingeniería de pavimentos, se está explorado el potencial del PET y la implementación de técnicas innovadoras para prolongar la durabilidad de los pavimentos a bajo costo [5]. Este tema es de gran interés en ámbito de la construcción sostenible. Al-Hadithi et al. [6] reportaron la modificación de losas de concreto mediante la adición de diferentes porcentajes de fibras plásticas, con el objetivo de incrementar la resistencia a la compresión y a la flexión.

Por su parte, Ojeda et al. [7], incorporaron fibras de PET como componente en el mortero de cemento, logrando un mejor desempeño mecánico tanto en la compresión como en resistencia a la flexión, en comparación con fibras comerciales de nailon. Además, el PET ha sido utilizado como sustituto de la arena y, también combinado con fibras de polipropileno, como material aditivo en las mezclas de hormigón [2]. También, se han reportado estudios en los que la modificación del concreto hidráulico con sílice obtenida por calcinación de cascarilla de arroz ha demostrado mejoras significativas en sus propiedades mecánicas [8].

En la industria petrolera, las mezclas de cemento tipo lechada desempeñan un papel fundamental para garantizar la estabilidad del pozo petrolero, revestir tuberías, recubrir las formaciones rocosas expuestas y aislar zonas para prevenir la comunicación de fluidos entre distintas zonas [9]. No obstante, cuando la le-

chada no cumple adecuadamente con tales funciones, pueden surgir diversos problemas relacionados con su desempeño y eficiencia, tales como pérdida de hidrocarburos, filtración de fluidos inyectados, pérdida de circulación cuando la lechada se filtra hacia la formación poroso o fracturada, y contaminación de mantos freáticos.

Cada pozo presenta condiciones específicas de presión, temperatura y composición del subsuelo, lo que hace que el diseño de una lechada sea un desafío técnico considerable en términos de estabilidad y adherencia. Además, las variaciones en la calidad de los materiales empleados, como el cemento Portland y los aditivos, pueden alterar significativamente las propiedades esperadas de la mezcla y su rendimiento a condiciones de operaciones reales.

El control de la viscosidad y el tiempo de fraguado de la lechada son esenciales para un adecuado bombeo y evitar problemas de sedimentación de partículas y endurecimiento prematuro. En este trabajo se reporta el aprovechamiento del tereftalato de polietileno (PET) recolectado de los Residuos Sólidos Urbanos de la ciudad de Poza Rica de Hidalgo, Veracruz, para mejorar las propiedades mecánicas de la lechada de cemento con potencial aplicación en los pozos de perforación.

## MATERIAL Y MÉTODOS

En la Figura 1 se muestra un esquema general de la metodología utilizada para la preparación de la lechada de cemento tipo H. Este tipo de cemento ha sido seleccionado debido a sus propiedades, entre las que se incluyen su alta resistencia a la compresión, elevada resistencia al ataque químico, fundamentalmente para aplicaciones en cementación de pozo; su capacidad de lograr un rápido sellado hidráulico entre las capas del subsuelo que evita la filtración de fluidos y su bajo requerimiento de aditivos que facilita la simplicidad del proceso de preparación.



Figura 1. Metodología para preparación de la lechada de cemento tipo H.

Fuente: Elaboración propia.

La lechada de cemento se llevó a cabo mezclando 700 g de cemento tipo "H" con 46% de agua destilada a 4,000 rpm durante 15 segundos. A continuación, se añadieron partículas de PET, previamente lavadas y secadas, con tamaños entre ¼ y ½ pulgadas, en proporciones de 10, 20 y 30% p/p respecto al cemento. La mezcla se continuó mezclando a 12,000 rpm por 35 segundos para garantizar una homogeneización completa.

La lechada obtenida, con diferentes porcentajes de aditivo, se caracterizaron para determinar su densidad utilizando una balanza de lodos (marca FANN). Las propiedades reológicas se evaluaron mediante un consistómetro atmosférico y un viscosímetro rotacional, operado a la temperatura de interés durante 20 min. El contenido de agua libre se calculó depositando una cantidad conocida de lechada de cemento en una probeta de 250 mL, dejándola en reposo durante 120 min y se procedió a medir la cantidad de agua libre separada. Finalmente, la pérdida por filtración se determinó depositó la lechada de cemento en una celda estática, aplicando una presión de 1,000 PSI sobre un filtro de prensa con malla 325 durante 30 min.

**RESULTADOS**

La Tabla 1 muestra un resumen de las propiedades físicas de la lechada de cemento modificada con 10, 20 y 30% p/p de partículas de PET. La densidad de estas lechadas prácticamente se mantuvo constante, lo que sugiere que la adición del polímero no afectó significativamente el comportamiento del fluido en estado fresco antes del fraguado. Cabe mencionar, que la densidad de las lechadas modificadas fueron ligeramente menores en comparación con la lechada sin modificar, debido a la relación del sistema PET-cemento tipo "H", lo que resulta en mezclas más ligeras y también adecuada para aplicaciones en estructuras sometidas a bajas cargas, donde una densidad reducida puede ser ventajosa. Estos resultados son similares a los reportados previamente por Alesmar et al. [4], quienes también observaron que la incorporación de partículas de PET contribuye a una menor densidad sin comprometer las propiedades fisicoquímicas del material.

Cabe mencionar que un aspecto importante es la correlación entre la densidad, la viscosidad plástica (Vp) y el punto de cedencia de las lechadas. Los datos de la tabla muestra que el punto de cedencia disminuyó de 111 lb/100ft-2 a 16.3 lb/100 ft-2, este comportamiento indica que las partículas de PET reducen las fuerzas interparticulares dentro de la mezcla. Por otro lado, al aumentar el porcentaje del polímero, también la Vp aumento proporcionalmente su valor, atribuido a la interacción física entre las partículas de PET y la matriz del cemento dando como resultado una mezcla pastosa con mayor hermeticidad ideal para minimizar la filtración de fluidos.

Una densidad controlada permite mantener una presión hidrostática adecuada en el pozo petrolero, una Vp optimizada mejora proporciona un flujo uniforme de la lechada y evita la formación de segregaciones. Finalmente, un punto de cedencia bajo facilita el bombeo inicial. Estos parámetros físicos son de suma importancia para diseñar lechadas de cemento para pozos petroleros que operan a diferentes condiciones de presión, temperatura y composición de subsuelo.

Tabla 1. Resultados de las pruebas de la lechada realizados a temperatura y presión atmosférica.

	Aditivo PET (% p/p)			
	0	10	20	30
<b>Peso (g)</b>	--	0.7	1.05	1.75
<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1.84	1.20	1.20	1.20
<b>Viscosidad plástica (cp)</b>	63.4	183.2	215.7	277.6
<b>Punto de cedencia (lb/100 ft<sup>2</sup>)</b>	111	16.3	19.9	30.8
<b>Pérdida por filtración (mL)</b>	37	32	36	34

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 2 se muestra el resultado de las pruebas reológicas de la lechada de cemento modificada a diferentes concentraciones de PET. La naturaleza no lineal de este comportamiento sugiere que la lechada exhibe características de un fluido no Newtoniano, una característica típica del cemento Apasco Clase "H". Por otra parte, la muestra modificada con un 10% peso de PET presenta una reducción en el esfuerzo cortante, a medida que aumenta la tasa de corte, este comportamiento indica un potencial ahorro de energía al momento de realizar el bombeo de la lechada. Por el contrario, a concentraciones más altas de PET 20 y 30% peso los puntos 100 y 200 rpm muestran un esfuerzo cortante mayor, por lo que se requerirá mayor energía de bombeo inicial.

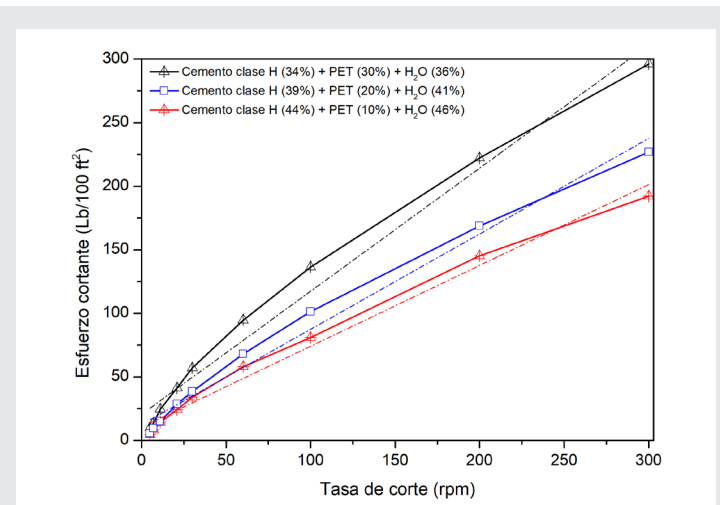


Figura 2. Pruebas reológicas de la lechada.

Fuente: Elaboración propia

La Figura 3 muestra el comportamiento reológico de la lechada obtenido a partir de la aplicación del modelo de ley potencias, el cual describe el comportamiento de los fluidos de perforación base polímero. Además, en la Tabla 2 se presenta la ecuación de regresión exponencial, que facilita el estudio de la variabilidad de la viscosidad. Esta ecuación y su correlación permite realizar un pronóstico más preciso de la relación entre partículas de PET, agua y cemento.

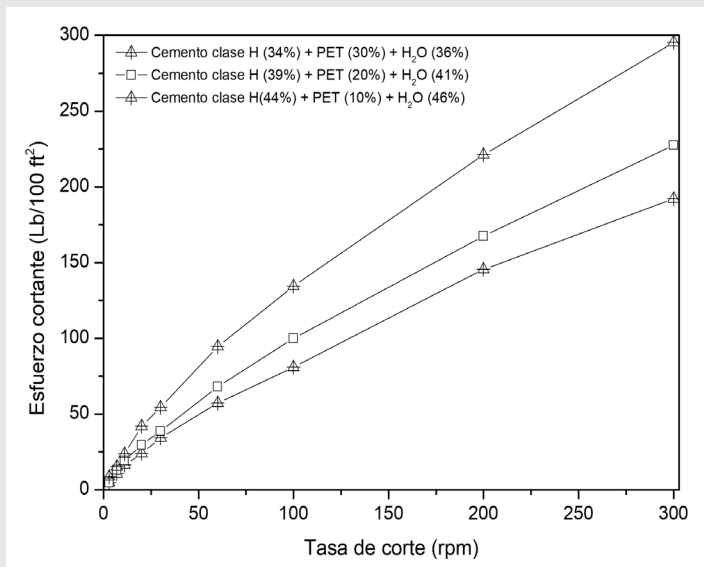


Figura 3. Pruebas reológicas de la lechada modificada con PET a partir de la ley de potencia.  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Modelos exponenciales calculada por la ley de potencias.

Mezcla	Modelo	Correlación
34% cemento + 30%PET + 36% H <sub>2</sub> O	$y = 4.359x^{0.7436}$	0.9962
39% cemento + 20%PET + 41% H <sub>2</sub> O	$y = 2.5496x^{0.7954}$	0.9990
44% cemento + 10%PET + 46% H <sub>2</sub> O	$y = 2.2131x^{0.789}$	0.9992

Fuente: Elaboración propia.

El valor de la  $V_p$  de la lechada de cemento aumentó de manera significativa con el contenido de PET, pasando de 183.2 cp con un 10% a 277.6 cp con un contenido de 30% de PET (ver Figura 4). El aumento de la  $V_p$  se atribuye principalmente a dos factores. En primer lugar, al aumenta la concentración de partículas de PET en la lechada, se produce una mayor interacción molecular entre las cadenas del polímero, lo que provoca una mayor resistencia al flujo y, por consiguiente, un aumento en la viscosidad de la mezcla de cemento. En segundo lugar, es debido al tamaño y distribución de partículas de PET: a mayor tamaño de partículas, hay mayor obstrucción del fluido y resistencia al movimiento, lo que resulta una mayor viscosidad de la mezcla.

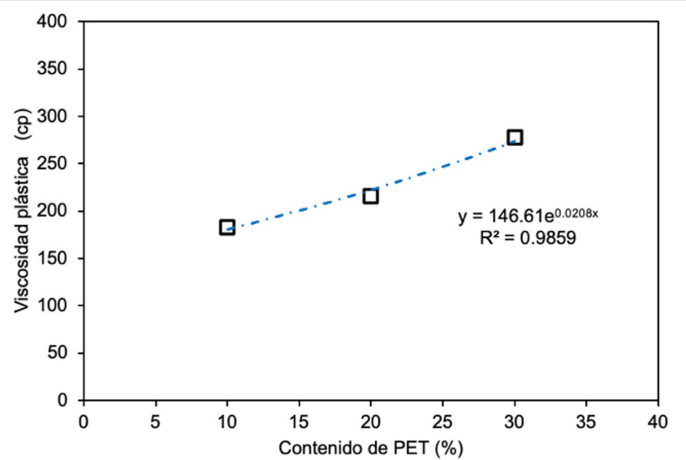


Figura 4. Variación de la  $V_p$  de la lechada en función del contenido de PET.

Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

La lechada de cemento modificada con 10% de PET presente menor resistencia al flujo debido a que su punto de cedencia es bajo, lo que resulta en una cantidad mínima de fuerza sobre área superficial y permite cambiar de flujo laminar a turbulento. Sin embargo, cuando se requiere una mayor permeabilidad y un flujo estable para bombear cemento en flujo laminar, es adecuado utilizar un cemento polimérico con mayor concentración de PET, el cual es adecuado para la industria de la construcción.

Por otra parte, el cemento clase "H" modificado con partículas de PET resultó adecuado para la industria de la construcción y petrolera, ya que el polímero modifica la permeabilidad del cemento, aumenta la resistencia a la compresión, al ataque químico y bacteriológico. Además, de acuerdo al porcentaje de polímero, puede desarrollar flujos estables o turbulentos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. C. Zambrano Sánchez, G. B. Lacorte Castro, and B. J. Carrillo Anchundia, "Materiales Poliméricos y el impacto ambiental: Una revisión," *Polo de conocimiento*, vol. 7, no. 6, pp. 596-614, 2022, doi: 10.23857/pc.v7i6.4092.
- [2] A. Ramhormozy, E. Kazeminezhad, and S. Safakhah, "Effect of polyethylene terephthalate (PET) and polypropylene (PP) fibers on the shear behavior of RC deep beams," *Revista de la Construcción*, vol. 22, no. 1, pp. 223-241, 2023, doi: 10.7764/RDLC.22.1.223.
- [3] G. Castañeta, A. F. Gutiérrez, F. Nacaratte, and Carlos A. Manzano, "Microplastics: a Contaminant That Grows in All Environmental Areas, Its Characteristics and Possible Risks To Public

Health From Exposure,” *Revista Boliviana de Química*, vol. 37, no. 3, pp. 160–175, 2020, doi: 10.34098/2078-3949.37.3.4.

[4] L. Alesmar, N. Rendon, and M. E. Korody, “Diseños de mezcla de tereftalato de polietileno (PET)-cemento,” *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, vol. 23, no. 1, pp. 76–86, 2008, [Online]. Available: [https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0798-40652008000100006&lang=es](https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652008000100006&lang=es).

[5] M. E. Murillo Chacón, M. Carballo Rojas, and M. del C. Gallardo Mejía, “Análisis de una base granular estabilizada con cemento y adición de fibras de PET reciclado,” *Infraestructura Vial*, vol. 25, no. 44, pp. 1–9, 2023, doi: 10.15517/iv.v25i44.54855.

[6] A. I. Al-Hadithi, A. T. Noaman, and W. K. Mosleh, “Mechanical properties and impact behavior of PET fiber reinforced self-compacting concrete (SCC),” *Compos Struct*, vol. 224, p. 111021, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111021.

[7] J. P. Ojeda, I. T. Mercante, and N. H. Fajardo, “Design and test of recycled plastic fibers for mortar reinforcement,” *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 36, no. 1, pp. 55–62, 2020, doi: 10.20937/RICA.2020.36.53423.

[8] N. R. Camargo Pérez and C. H. Higuera Sandoval, “Concreto hidráulico modificado con sílice obtenida de la cascarilla del arroz,” *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 27, no. 1, pp. 91–109, 2017, doi: 10.18359/rcin.1907.

[9] M. T. Maagi, S. D. Lupyana, and G. Jun, “Nanotechnology in the petroleum industry: Focus on the use of nanosilica in oil-well cementing applications - A review,” *J Pet Sci Eng*, vol. 193, p. 107397, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.petrol.2020.107397.

