

Efecto de las condiciones de hidrólisis alcalina en las fibras de PET y su impacto en el refuerzo del concreto

Effect of alkaline hydrolysis conditions on PET fibers and their impact on concrete reinforcement

E. Sánchez-Ramírez ^a, J. Reyes-Miranda ^b, G. García-Domínguez ^a, C. O. Hernández-Chávez ^b, A. Garrido-Hernández ^{b*}

^a Universidad Tecnológica de Tecámac. Carretera Federal México-Pachuca Km. 37.5 Predio Sierra Hermosa, Tecámac, Estado de México. C.P. 55740. México.

^b Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Departamento de Materiales, Av. San Pablo No.420 Col. Nueva el Rosario C.P. 02128, Alcaldía Azcapotzalco, CDMX.

Resumen

Con la finalidad de evaluar el impacto en la resistencia a la compresión de probetas de concreto reforzado con fibras de PET sin tratar y tratadas mediante hidrólisis alcalina, se reporta el comportamiento de probetas de concreto estandarizadas bajo la norma ASTM C31. La caracterización de los agregados se realizó usando procesamiento de imágenes con ImageJ, obteniendo partículas de tamaños pequeños de arena, grava y microfibras de PET. El diseño experimental factorial 3^2 incluyó variaciones en la longitud de las fibras (1, 2 y 3 cm) y en sus porcentajes (0.15%, 0.25%, y 0.35%). Los ensayos de compresión indicaron un incremento significativo en la resistencia de las probetas con fibras de 3 cm, con un aumento significativo del 10% comparado con el blanco. Se realizó un tratamiento de hidrólisis alcalina, siguiendo el diseño experimental Taguchi, mostrando que variables como la concentración de NaOH, la temperatura y el tiempo de exposición afectan la pérdida de peso de las fibras PET, lo que impacta en su adherencia en el concreto. Las micrografías de las fibras tratadas revelaron una mayor rugosidad y un aumento en la adherencia del cemento, evidenciando la efectividad del tratamiento. Destacando que en las fibras tratadas el módulo de Young disminuyó respecto a las fibras de PET sin tratar.

Palabras Clave: Fibras de PET, Taguchi, hidrólisis alcalina, método hidrotermal.

Abstract

In order to evaluate the impact on the compressive strength of concrete samples reinforced with untreated PET fibers and treated by alkaline hydrolysis, the behavior of standardized specimens under the standard ASTM C31 is reported. The characterization of the aggregates was carried out using image processing with ImageJ, obtaining small size particle for sand, gravel, and PET microfibers. The 3^2 factorial experimental design included variations in fiber length (1, 2, and 3 cm) and their percentages (0.15%, 0.25%, and 0.35%). Compression tests indicated a significant increase in the strength of specimens with 3 cm fibers, with a significant increase of 10% improvement compared to the control. An alkaline hydrolysis treatment, following the Taguchi experimental design, showed that variables such as NaOH concentration, temperature, and exposure time affect the weight loss of PET fibers, impacting in their adhesion to the concrete. Micrographs of the treated fibers revealed increased surface roughness and enhanced cement adhesion, demonstrating the effectiveness of the treatment. Highlighting that in the treated fibers the Young's Modulus decreased compared to untreated PET fibers.

Keywords: PET fibers, Taguchi, alkaline hydrolysis, hydrothermal method.

1. Introducción

En los últimos años, el uso de plásticos ha aumentado significativamente debido a sus diversas aplicaciones, su bajo costo, flexibilidad y alta durabilidad. Como resultado, los residuos plásticos se han convertido en el segundo tipo más común de

residuos sólidos. La durabilidad de los plásticos, derivados de la industria petroquímica y de naturaleza sintética, plantea un problema ambiental considerable. Se estima que para el año 2030, la cantidad de residuos plásticos alcanzará los 12,000 millones de toneladas solo del Polietileno Tereftalato (PET) (Lee *et al.*, 2019; Vargas., 2020). Hace dos décadas, en México se recuperaba el 8%

*Autor para la correspondencia: agh@azc.uam.mx

Correo electrónico: rsanchezeduardo.11@gmail.com (Eduardo Sánchez-Ramírez), joremi@azc.uam.mx (Joan Reyes-Miranda), garciagiovanni1311@gmail.com (Giovanni García-Domínguez), coh@azc.uam.mx. (Christian Omar Hernández-Chávez), agh@azc.uam.mx (Aristeo Garrido-Hernández)

de los envases de PET; hoy en día se recupera alrededor del 60 % es decir 547 mil toneladas (ECOCE). Por ello, se propone utilizar el residuo de PET como material reciclado para el reforzamiento del concreto. El PET ofrece una amplia gama de aplicaciones debido a sus propiedades mecánicas, baja densidad, facilidad de procesamiento y resistencia química (Askar *et al.*, 2023). Estas características hacen que el PET sea particularmente adecuado para mejorar el concreto. Investigaciones recientes han demostrado que las fibras de PET pueden mejorar significativamente las propiedades mecánicas del concreto, ofreciendo resultados positivos en términos de resistencia y durabilidad. El PET en forma de microfibras como reforzamiento para concreto permiten reducir el agrietamiento debido a la contracción plástica, reducción permeable y mayor resistencia al desgaste y a los golpes. (Meza & Antonio, 2023). Se ha realizado un refuerzo de microfibras PP, LDPE, HDPE, PVC y PET en concreto hidráulico (Colchon Esquivés & Llanos Ortiz, 2024). Donde se determinó que aumenta la resistencia del concreto hidráulico en un 21%, 20%, 16% 12% y 10%, respectivamente (Salazar & Wilfredo, 2023).

Las fibras de PET dentro del concreto crearan interfaces ya que la naturaleza del concreto y el polímero son diferentes. Para superar estos problemas, es necesario emplear un método que modifique la superficie del PET. La modificación química es una de las técnicas más utilizadas para transformar grandes cantidades de PET rápidamente y a bajo costo. Entre estas técnicas esta la hidrólisis alcalina que se realiza comúnmente con hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH) en concentraciones del 4% al 20% en peso y temperaturas superiores a 100°C por más de 1 o 2 horas, es uno de los métodos preferidos. La modificación de la superficie de las fibras de PET, que mejora significativamente su rendimiento en aplicaciones industriales y así la fibra de adhiera al concreto (Čorak *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2013).

Silva *et al.* (2024) explican que la hidrólisis de las fibras de PET puede producirse a través de la degradación de la superficie en un medio acuoso, lo cual puede conducir a la despolimerización total del polímero en sus monómeros constituyentes. Este proceso de degradación se acelera en condiciones alcalinas, utilizando agentes como el hidróxido de sodio (NaOH), que actúa facilitando la ruptura de las cadenas poliméricas mediante la formación de enlaces con los óxidos metálicos presentes

Algunos de los factores o variables que se estudian en la hidrólisis alcalina es la temperatura, la concentración de NaOH, el tiempo de reacción y la relación peso/volumen entre la disolución y las fibras de PET. Los factores o variables anteriores pueden provocar que un aumento en la temperatura y en la concentración de NaOH acelera la degradación de las fibras, incrementando la pérdida de masa y afectando sus propiedades mecánicas. Un mayor tiempo de reacción también promueve una degradación más profunda, mientras que la relación peso/volumen afecta la uniformidad del proceso (Tricker *et al.*, 2022; Babaei *et al.*, 2024).

La fibra de PET actualmente es muy estudiada para poder aplicarse en diferentes campos como lo son en el sector textil, donde se investiga su uso en la fabricación de tejidos reciclados para ropa y tapicería, promoviendo un uso más sostenible (Čorak *et al.*, 2022). Asimismo, en el ámbito automotriz, la fibra de PET reciclada se explora para la producción de componentes ligeros y resistentes, como alfombras y paneles interiores (Hamad *et al.*, 2013). Además, en el área de la impresión 3D, se evalúa su potencial para fabricar piezas funcionales y ecológicas (Peña Aedo & Tufino Alvarado, 2023). Finalmente, en la construcción, se utiliza para reforzar el concreto, mejorando su resistencia a la tracción y durabilidad (Askar *et al.*, 2023). Se han realizado numerosos estudios con resultados diversos sobre su impacto en

las propiedades de resistencia. Se ha observado que la incorporación de fibra mejora el comportamiento a la flexión (Castro, 2024; Peña Aedo & Tufino Alvarado, 2023).

Como se mencionó anteriormente, el estudio de la modificación superficial implica numerosas variables, lo que incrementa el número de experimentos necesarios para comprender el fenómeno en detalle. Por ello, en ciencias es crucial utilizar diseños de experimentos que optimicen los recursos al analizar variables de respuesta. Uno de los métodos más interesantes es el diseño Taguchi, ya que permite reducir el número de ensayos necesarios al evaluar la interacción entre diferentes factores.

Aunque existen trabajos que han investigado el uso de hidrólisis alcalina para la modificación de la superficie de fibras de PET, algunos factores como: el diámetro y la composición de las fibras, el uso de fibras tejidas o el método utilizado pueden contribuir a la variabilidad en los resultados. Este trabajo se reporta un diseño experimental para evaluar la resistencia del concreto de fibras de PET variando concentración y el largo de las fibras, y después se enfoca en el tratamiento superficial con la finalidad de mejorar las propiedades del concreto mediante el refuerzo con fibras de PET, con el fin de lograr una mejora significativa en su desempeño y durabilidad, así como en su resistencia a largo plazo.

2. Metodología

2.1. Caracterización de los agregados de concreto

La grava y la arena se cribaron con la finalidad de remover partículas de tamaño muy grande, posteriormente se esparció una muestra de arena y grava, se colocó una referencia de medición (un vernier) y se tomaron fotografías para posteriormente usar un procesador de imágenes (ImageJ). Finalmente se realizó una distribución del tamaño de la grava y la arena. En el caso de las fibras de PET se realizó un procedimiento similar.

2.2. Elaboración y compresión de las probetas

Se realizó un diseño factorial 3², donde los factores fueron porcentaje de carga, 0.15, 0.25 y 0.35% respecto a la masa del cemento y 1, 2 y 3 cm respecto a la longitud de la fibra de PET. Las probetas de ensayo se realizaron usando la norma ASTM C31 y los ensayos a la compresión se realizaron bajo la norma ASTM C39. Las pruebas de resistencia se realizaron en una máquina de ensayos universal marca Shimadzu.

Para realizar ensayos de compresión en cilindros de 3 x 6 pulgadas con fibras de PET, siguiendo la norma ASTM C39, primero se prepararon y curaron las muestras asegurando que los extremos fueran paralelos entre sí y estuvieran lisos. Se colocó el cilindro centrado en la máquina universal Shimadzu, garantizando una alineación adecuada. Se aplicó la carga de compresión a una velocidad controlada y constante hasta que la muestra fallara.

2.3. Hidrólisis alcalina y diseño experimental

El diseño experimental Taguchi se utilizó con el propósito de evaluar el efecto de las distintas variables, como la temperatura, la concentración de NaOH, el tiempo de reacción y la relación peso/volumen entre la disolución y las fibras de PET. En la siguiente sección se presentan la metodología aplicada la cual se

divide en 2 partes, ya que primero se da el tratamiento de superficie a las fibras de PET mediante hidrólisis alcalina, y la preparación de las pruebas mecánicas para el concreto reforzado.

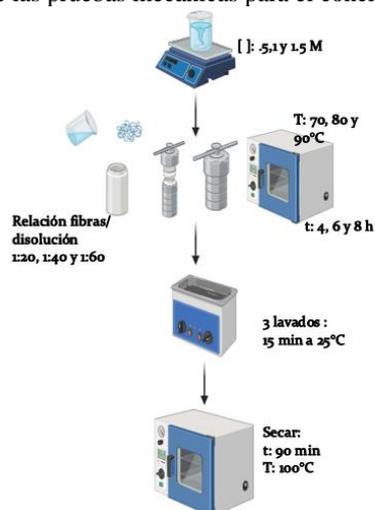


Figura 1: Metodología para tratar la superficie de la fibra de PET

En la Figura 1 se muestra el proceso que se siguió para llevar a cabo los experimentos de Taguchi. Se comenzó con el tratamiento de hidrólisis alcalina en una autoclave con capacidad de 45 mL se colocaron 35 mL de solución de NaOH (Meyer, 97%) de acuerdo con las condiciones de la Tabla 1. La autoclave se colocó en el horno a la temperatura y tiempo correspondiente según el diseño experimental, pasado el tiempo se dejó enfriar a temperatura ambiente, después las fibras se lavaron 3 veces en baño ultrasónico con agua desionizada durante 15 min para eliminar restos de NaOH y finalmente se secaron en el horno a 80 °C durante 90 min.

Para el diseño experimental Taguchi se utilizó un arreglo ortogonal L9 (3⁴), este arreglo consta de nueve experimentos y cuatro variables o factores, donde a cada variable se le asignan tres valores llamados niveles los cuales fueron establecidos según Ćorak et al (2022) y Zhang et al (2013). En la Tabla 1 se puede ver las variables que se utilizaron

Tabla 1: Variables de los diferentes niveles del diseño experimental Taguchi.

Concentración (M)	Temperatura (°C)	Relación Disolución:fibras	Tiempo (h)
0.5	70	1:20	4
0.5	80	1:40	6
0.5	90	1:60	8
1	70	1:60	6
1	80	1:20	8
1	90	1:40	4
1.5	70	1:40	8
1.5	80	1:60	4
1.5	90	1:20	6

2.3. Prueba de adherencia de azul de metileno.

66

El azul de metileno (C₁₆H₁₈ClN₃S) es uno de los colorantes más empleados en la industria, utilizado para teñir algodón, lana y papel. Al ser un colorante catiónico, se disocia en el agua, dejando el pigmento con carga positiva, lo que le permite interactuar con grupos cargados negativamente y formar enlaces. Para el proceso de adsorción, se colocaron 0.573 g de fibras en una autoclave de 45 mL, a la que se añadieron 35 mL

de una disolución de azul de metileno a 10 ppm. La autoclave se calentó a 80°C durante 8 horas. Después de este tiempo, se dejó enfriar a temperatura ambiente. Las fibras se lavaron luego en un baño ultrasónico durante 15 min. con 50 mL de agua desionizada, repitiendo este proceso hasta que el agua de enjuague estuvo completamente limpia para todas las muestras.

3. Resultados

La caracterización de los agregados se obtuvo a partir de una distribución de tamaño de diámetro, basada en 300 conteos realizados con el software ImageJ. Los resultados, mostrados en la Figura 1, indican que las microfibras de PET presentan un diámetro de 0.13±0.03 mm, la grava de 1.25 ±0.35 cm, y la arena de 0.5 ±0.12 cm.

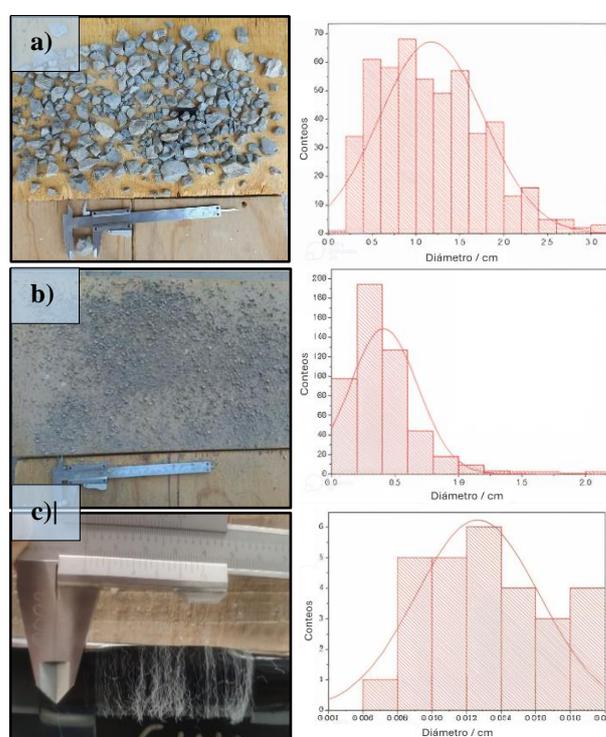


Figura 2: Distribución de tamaño de diámetro de a) grava, b) arena, c) fibras de PET

3.1. Resultados de ensayo a la compresión

Los experimentos realizados en las probetas siguiendo un diseño experimental 3², donde se evaluaron longitudes de 1, 2 y 3 cm y porcentajes de fibras de PET de 0.15%, 0.25% y 0.35%, con una resistencia inicial de 150 kg/cm², revelaron resultados significativos. Específicamente, los tratamientos F, H e I mostraron un incremento de al menos un 10% en comparación con el espécimen blanco. Se observó una tendencia a un aumento en la resistencia a la compresión al utilizar fibras de 3 cm de longitud, lo cual es consistente con lo reportado en el estudio "Diseño de un concreto con fibras de polietileno tereftalato (PET) reciclado para la ejecución de losas en el asentamiento humano", donde la tendencia positiva se mantiene hasta los 6 cm. Sin embargo, a partir de esa longitud, las fibras tienden a enredarse, lo que reduce la efectividad en la resistencia a la compresión.

El análisis de varianza y la prueba de Tukey indicaron que los tratamientos F, H e I son significativamente diferentes en comparación con el espécimen blanco, lo que confirma que tanto el porcentaje como la longitud de las fibras influyen en la resistencia a la compresión del concreto. En términos de resistencia promedio, los valores obtenidos para el espécimen blanco y para los tratamientos con 0.15%, 0.25%, y 0.35% de fibras fueron de 126.1, 134.8, 132.6 y 142.2 kg/cm², respectivamente.

Tabla 2: Resultado de la prueba de compresión del concreto con refuerzo de fibras de PET

Tratamiento	Condiciones	Promedio ± DE
Blanco	Sin fibra	121.6±7.67
A	0.15%, 1 cm	122.3±11.5
B	0.25%, 1 cm	123.4±15.1
C	0.35%, 1 cm	127.7±9.79
D	0.15%, 2 cm	123.2±13.8
E	0.25%, 2 cm	128.1±24.5
F	0.35%, 2 cm	134.8±11.9
G	0.15%, 3 cm	123.8±15.2
H	0.25%, 3 cm	132.6±5.8
I	0.35 % 3 cm	142.2±12.9

3.2. Hidrólisis alcalina del PET

La variable de respuesta para observar la interacción de los factores fue el porcentaje de pérdida de peso de las fibras de PET, que se calculó usando la ecuación 1.

$$\% \text{ pérdida de peso } (W) = \left(\frac{D-T}{D} \right) * 100 \dots\dots\dots (1)$$

donde D es el peso de la fibra antes del tratamiento y T es el peso de la fibra después del tratamiento, ambos pesos son completamente secos. Las muestras con el menor y mayor porcentaje de pérdida de peso correspondieron a aquellas en las que las variables de concentración y temperatura fueron de 0.5 M a 70°C y 1.5 M a 90°C, respectivamente. La pérdida de peso observada en las muestras de PET bajo diferentes condiciones de concentración y temperatura sugiere que tanto la concentración del reactivo como la temperatura del medio juegan un papel crucial en la degradación del polímero. Según Silva *et al.* (2024), la hidrólisis de los polímeros es altamente dependiente de estos parámetros, donde un incremento en la concentración de la solución alcalina y en la temperatura tiende a acelerar la degradación del material. Esto es evidente en el tratamiento de 1.5 M a 90°C, que mostró la mayor pérdida de peso del 45.657%, en comparación con condiciones de menor concentración y temperatura.

Tabla 3: Resultados del porcentaje de pérdida de peso.

Muestra	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Pérdida de peso (%)
0.5M/90°C/1:60/8h	0.583	0.457	21.612
1M/90°C/1:40/4h	0.875	0.703	19.657
1.5M/90°C/1:20/6h	1.75	0.951	45.657
0.5M/70°C/1:20/4h	1.75	1.72	1.714
1M/70°C/1:60/6h	0.583	0.543	6.861
1.5M/70°C/1:40/8h	0.875	0.691	21.028
0.5M/80°C/1:40/6h	0.875	0.871	0.457
1M/80°C/1:20/8h	1.75	1.328	24.114
1.5M/80°C/1:60/4h	0.573	0.478	16.579

Este comportamiento coincide con los hallazgos de Hamad *et al.* (2013), quienes encontraron que la tasa de degradación de polímeros como el PET aumenta significativamente con condiciones más agresivas de tratamiento. De manera similar, la investigación de Sustaita-Rodríguez, (2019) sobre la degradación térmica de polímeros encontró que la pérdida de peso es más pronunciada a temperaturas más altas, dado que la energía térmica adicional facilita la ruptura de los enlaces moleculares dentro del polímero. De este resultado se obtiene que la modificación hace que exista mayor área superficial y que los grupos funcionales que se crean puedan interactuar con el material a depositar formando enlaces y por lo tanto mejorando su adherencia. Es crucial tener una pérdida de peso controlada ya que también su resistencia mecánica varía.

La Figura 3 de la gráfica de efectos principales para relación señal-a-ruido (SN), que se utiliza comúnmente en el diseño de experimentos para identificar el efecto de diferentes factores en una respuesta en este estudio los factores son concentración (M), Temperatura (°C), Tiempo (h) y la relación PET:disolución.

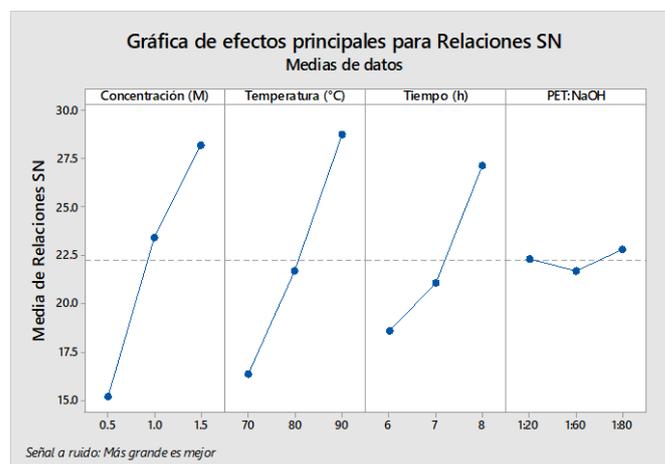


Figura 2: Gráfica de efectos, en la relación de las variables principales.

Según Taguchi *et al* (1986) y Montgomery *et al* (2017) la gráfica de efectos principales muestra cómo diferentes factores influyen en la relación señal-ruido (SN) en el contexto del tratamiento de fibras de PET. Según el análisis presentado, la concentración de la solución (NaOH), la temperatura, y el tiempo de exposición tienen un impacto significativo y positivo en la relación SN. A medida que la concentración aumenta de 0.5 M a 1.5 M, la temperatura de 70°C a 90°C, y el tiempo de 6 a 8 horas, la media de las relaciones SN incrementa considerablemente. Esto sugiere que estos factores están directamente relacionados con una mayor eficiencia del proceso de degradación. Los resultados muestran que la relación PET-disolución presenta un efecto menos pronunciado sobre la media de la relación SN, lo que sugiere que, aunque influye en el proceso, su impacto es menos significativo en comparación con los otros factores.

3.3. Micrografías del tratamiento superficial de las fibras de PET.

Las micrográficas de las fibras de PET obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (MEB), es importante destacar las observaciones clave que reflejan los cambios en la superficie de las fibras bajo diferentes condiciones de tratamiento del diseño experimental Taguchi. En la Figura 4 se puede observar que la micrografía de la fibra de PET sin tratar muestra una superficie lisa y continua con abultamientos hacia el exterior resultado del proceso de fabricación.

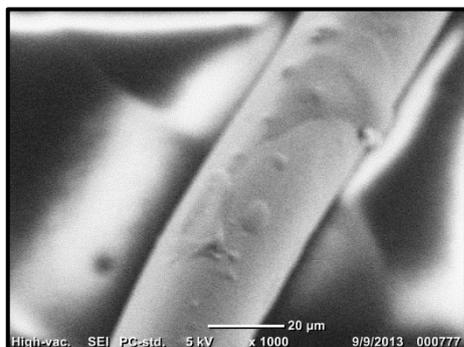


Figura 3: Micrografía del PET Blanco

En la Figura 5 se observa las micrográficas de la fibra tratada a una concentración de 0.5 M. Para la muestra a) (0.5M/70°C/1:20/4h), la micrografía revela que la fibra ha sufrido una degradación mínima, la pérdida fue de 1.714%. Este resultado es consistente con otros estudios que indican que bajas concentraciones de NaOH y temperaturas moderadas no provocan cambios significativos en la estructura superficial del PET. En la muestra b) (0.5M/80°C/1:40/6h) no se observan cambios significativos en comparación con el tratamiento previo. Este tratamiento experimento la pérdida de peso más baja el 0.47 %. Este hallazgo coincide con la literatura que sugiere que un pequeño aumento de temperatura, sin un incremento considerable en la concentración de NaOH, no es suficiente para causar una degradación visible en las fibras de PET (Hamad *et al.*, 2013). En la muestra c) (0.5M/90°C/1:60/8h) se observa un aumento en el daño superficial de la fibra, con una superficie más rugosa y signos de desgaste esta observación se sustenta con la pérdida de peso del 21.61%. Estudios previos han demostrado que una mayor temperatura y tiempo de exposición causan daño superficial. (Babaei *et al.*, 2024; Khairul, 2017).

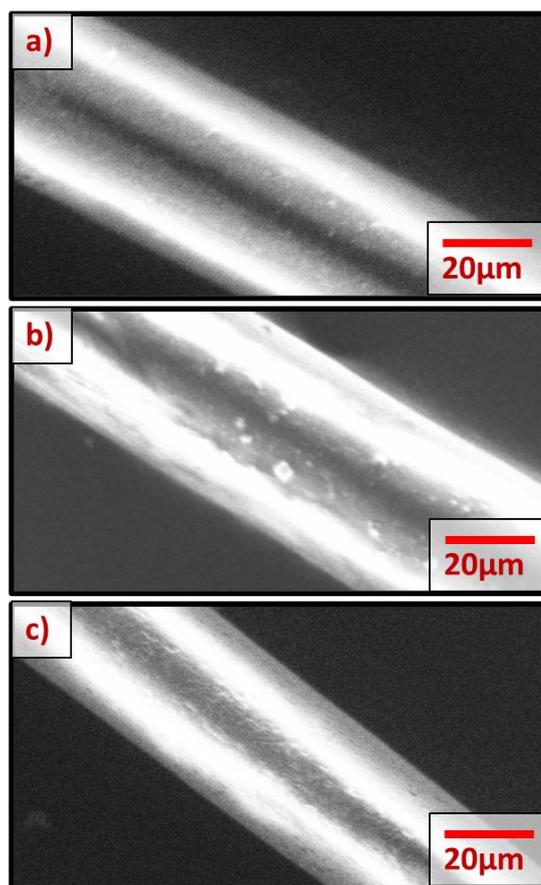


Figura 5: a) 0.5M/70°C/1:20/4h. b) 0.5/80°C/1:40/6h. c) 0.5M/90°C/1:60/8h.

En la figura 6 se observa las micrográficas de la fibra tratada a una concentración de 1M. La muestra a) (1M/90°C/1:40/4h) experimentó la mayor disminución de pérdida de peso 19.657 % a la concentración de 1M. En la superficie se observa una alta rugosidad. La rugosidad indica que las condiciones más agresivas de mayor concentración y temperatura están acelerando la degradación química de la fibra de PET. La muestra b) (1M/70°C/1:60/6h) presenta una pérdida de 8.861 %, experimentado la menor pérdida de peso a las condiciones de 1 M. La muestra c) (1M/80°C/1:20/8h) presenta un gran aumento en la degradación; la fibra exhibe una estructura altamente porosa y degradada.

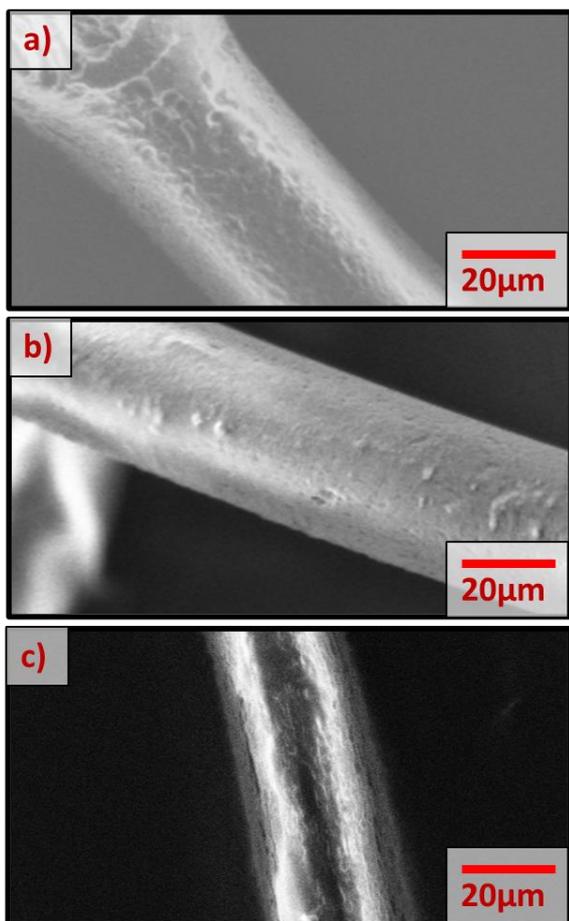


Figura 6: a) 1M/90°C/1:40/4h. b) 1M/70°C/1:60/6h. c) 1M/80°C/1:20/8h.

En la Figura 7 se observan las microfografías correspondientes a las diferentes condiciones de tratamiento con una concentración de 1.5 M de NaOH. La muestra a) (1.5 M/80 °C/1:60/4 h) presenta una superficie degradada, lo que se refleja con una pérdida de masa del 16.579%. Este nivel de degradación es consistente con estudios previos que indican que concentraciones elevadas de NaOH, incluso a temperaturas moderadas, pueden causar una degradación significativa de las fibras poliméricas. En la muestra B (1.5 M/90 °C/1:20/6 h) también se observa una superficie totalmente degradada, que se puede correlacionar con una pérdida de masa del 45.657%. La degradación de la superficie es más heterogénea. Finalmente, la muestra c) (1.5 M/70 °C/1:40/8 h) muestra una alta rugosidad y signos evidentes de degradación superficial. Tal como lo señala Tricker *et al.* (2022), la combinación de alta concentración de NaOH y tiempos prolongados de exposición puede provocar una pérdida significativa de masa y deterioro de las propiedades mecánicas, incluso a temperaturas bajas.

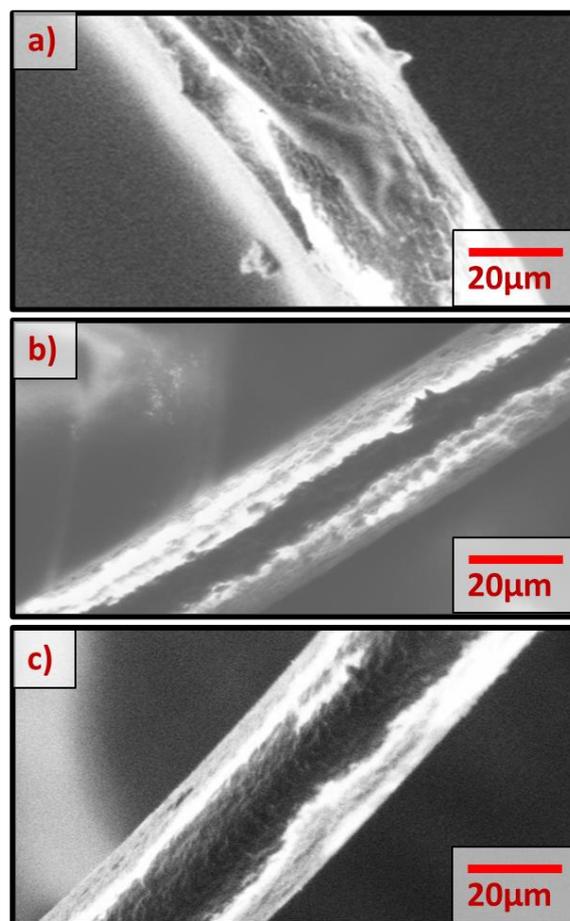


Figura 7: a) 1.5M/80°C/1:60/4h. b) 1.5M/90°C/1:20/6h. c) 1.5M/70°C/1:40/8h

Para comprobar la presencia de radicales en la superficie de las fibras después de la modificación de la superficie se realizó un proceso de adsorción utilizando azul de metileno. Las muestras utilizadas fueron: 0.5M/90°C/1:60/8h y 1M/70°C/1:60/6h, también se utilizaron fibras sin tratar. La Figura 8 muestra una comparación de la adsorción de las fibras tratadas y sin tratar donde se puede observar que las fibras tratadas adsorben más que las fibras sin tratar no se adsorbe en la superficie en las fibras formaron enlaces para anclar el fotocatalizador.

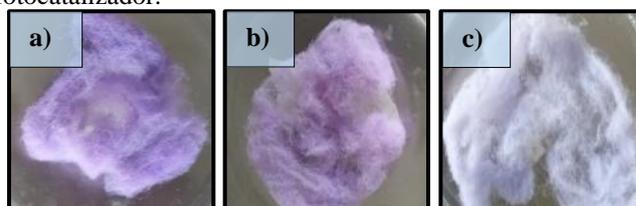


Figura 8: Comparación del teñido de las fibras tratadas a) 1M/70°C/1:60/6h b) 1M/80°C/1:20/8, c) no tratada.

3.4. Pruebas de adherencia de las fibras de PET en el concreto.

En la Tabla 3 se proporcionan datos sobre el estudio de la adherencia del cemento a fibras de PET tratadas bajo el diseño experimental Taguchi, debido a que las condiciones de manejo de las concentraciones de 1.5 M la degradación era muy agresiva se retiró de esta prueba, el peso final se obtuvo después de pasar por un shaker dejando todas las muestras durante 5 minutos.

Tabla 4: Resultados del porcentaje de pérdida de peso de fibras con cemento después del shaker.

Muestra	PI	PF	(PI-PF)/PI
PET/ST	1.955	0.966	0.51
0.5M/70°C/1:20/4h	2.195	1.462	0.33
0.5M/80°C/1:40/6h	2.027	1.244	0.39
0.5M/90°C/1:60/8h	1.854	0.895	0.52
1M/90°C/1:40/4h	2.011	1.031	0.49
1M/70°C/1:60/6h	2.753	2.518	0.09
1M/80°C/1:20/8h	2.025	1.785	0.12

Comparar el peso de las fibras en el concreto antes y después del proceso permite evaluar la cantidad de cemento que se ha adherido a cada tipo de fibra PET tratada. Cuando el peso final (PF) es muy similar al peso inicial (PI), esto puede atribuirse a factores como la rugosidad de la fibra, que mejora el anclaje del cemento (Yin & Zhang, 2018). Esta observación se relaciona con la rugosidad observada en las micrografías fibra-cemento, que evidencia una mejor adherencia (Muringayil *et al.*, 2024).

Los resultados muestran que las fibras sometidas a tratamientos térmicos más altos experimentan una mayor pérdida de peso. Esto se debe a que su resistencia mecánica disminuye, lo que provoca que se rompan durante la agitación, como se observó al separar las fibras del cemento desprendido, que contenía trazas de fibras de PET. Las mejores condiciones fueron aquellas que sus pesos inicial y final son similares esto fue para la prueba de 1M/70°C/1:60/6h y 1M/80°C/1:20/8h, respectivamente.

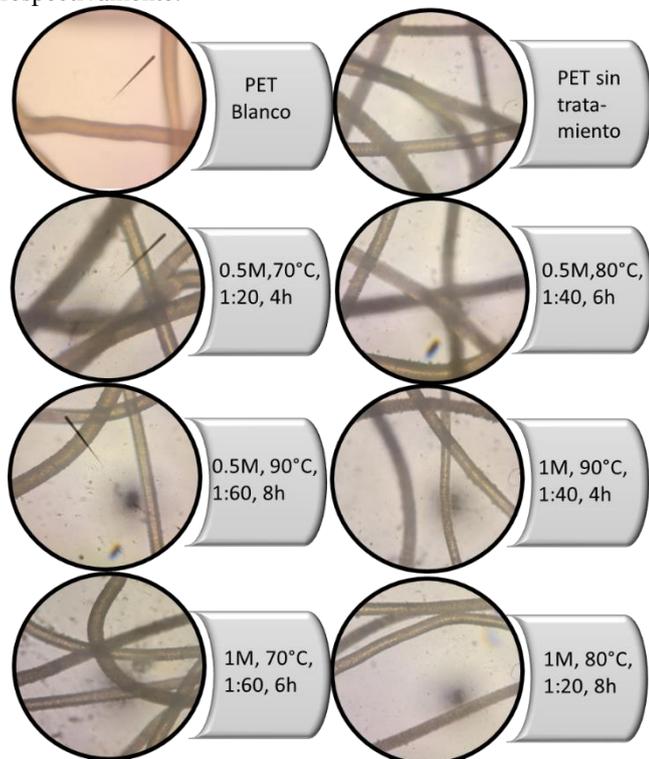


Figura 9: Fibras de PET tratadas y sin tratar después de inmersión en cemento.

En la figura 9 se pueden ver las micrografías de la tabla 3 mediante un microscopio óptico en los cuales se observa la diferencia de las fibras tratadas con concreto y la fibra sin tratar y sin concreto. En la micrografía A, muestra una fibra de PET sin tratamiento, sirviendo como muestra de control. Se puede

que la adherencia de la muestra PET blanco sin tratamiento es baja respecto a las otras muestras.

Se realizó una prueba de compresión en probetas de 2x4 pulgadas utilizando una mezcla de arena y cemento. Los resultados muestran que la resistencia a la compresión aumenta alrededor del 10%. Este resultado es consistente con los hallazgos presentados en la sección del diseño experimental 3², donde la máxima resistencia se observó en las probetas que contenían fibras tratadas a 1M/70°C/1:60/6h. Esto tiene sentido, ya que el aumento de temperatura generalmente disminuye la propiedad mecánica de las fibras debido a su degradación. En comparación, las fibras tratadas a 1M/80°C/1:20/8h presentaron un mayor porcentaje de pérdida, lo que se correlaciona directamente con una menor resistencia de las fibras (Figura 10).

Se ha reportado que el módulo de Young disminuye al agregar fibras poliméricas, como se observa en este estudio, con valores de 21.18, 18.9 y 18.27 para las probetas sin PET, con PET tratado a 1M/70°C/1:60/6h y con PET tratado a 1M/80°C/1:20/8h, respectivamente. La disminución del módulo de Young resulta en un material más flexible, lo que permite una mayor deformación sin fracturación durante la elongación.

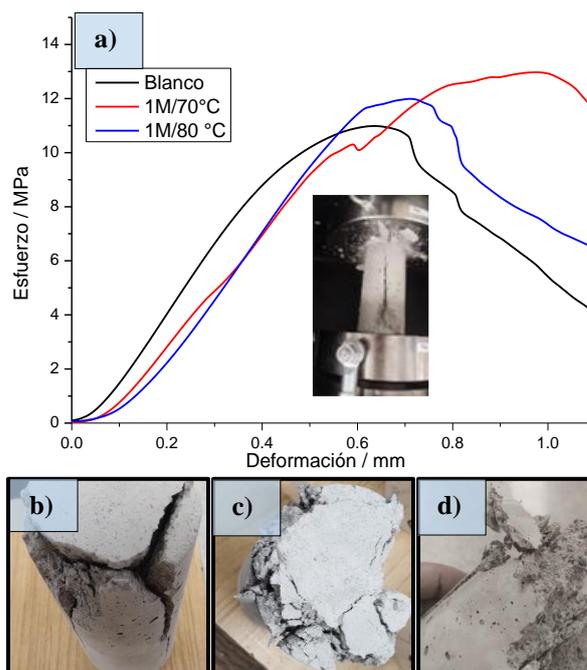


Figura 10: a) Ensayo a la compresión de probetas de concreto, fracturas de probetas b) blanco c) 1M/70°C/1:60/6h d) 1M/80°C/1:20/8h.

4. Conclusiones

Los resultados del estudio confirman que la incorporación de fibras de PET en concreto, especialmente aquellas tratadas mediante hidrólisis alcalina, mejora la resistencia a la compresión del concreto. Las fibras de PET con longitudes de 3 cm demostraron un incremento del 10% en comparación con el espécimen blanco, indicando una mejora en la resistencia. El análisis de varianza y la prueba de Tukey corroboraron la influencia significativa de la longitud y el porcentaje de fibras en

la resistencia del concreto. El tratamiento de hidrólisis alcalina, optimizado a través del diseño experimental Taguchi, mostró que la concentración de NaOH y la temperatura son cruciales para la degradación de las fibras PET, afectando su capacidad de adherencia. Las fibras tratadas exhibieron una mayor rugosidad y una mejor adherencia al cemento, lo que se traduce en una mayor efectividad en el refuerzo del concreto.

Agradecimientos

Los autores agradecen los recursos e instalaciones proporcionados por la Universidad Autónoma Metropolitana y a la Universidad Tecnológica de Tecámac para llevar a cabo la experimentación y caracterización realizadas en este trabajo.

Referencias

- Askar, M. K., Al-Kamaki, Y. S. S., & Hassan, A. (2023). Utilizing polyethylene terephthalate PET in concrete: A review. *Polymers* 15(15), 3320. DOI: 10.3390/polym15153320
- Silva, R.R.A.; Marques, C.S.; Arruda, T.R.; Teixeira, S.C.; de Oliveira, T.V. (2023). Biodegradation of Polymers: Stages, Measurement, Standards and Prospects. *Macromol* 3, 371-399. DOI: 10.3390/macromol3020023
- Castro, P. J. N. (2024). Estudio experimental de las propiedades mecánicas del mortero reforzado con fibras de PET tratadas térmicamente [Tesis de pregrado, Universidad de Concepción]. http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/11877/1/naipan_c_p_2024_IN_G.pdf
- Čorak, I., Tarbuk, A., Đorđević, D., Višić, K., & Botteri, L. (2022). Sustainable alkaline hydrolysis of polyester fabric at low temperature. *Materials* 15(4), 1530. DOI:10.3390/ma15041530
- Colchon Esquivel, F. J., & Llanos Ortiz, D. H. (2024). Estudio comparativo de la fibra de polipropileno y la fibra de vidrio en las propiedades mecánicas del concreto [Tesis de pregrado, Universidad Señor de Sipán].
- Hamad, K., Kaseem, M., Deri, F., Ko, Y. G., & Kim, B. C. (2013). Recycling of waste from polymer materials: An overview of the recent works. *Polymer Degradation and Stability* 98(12), 2801-2812. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.09.025
- Tricker, A. W., Osibo, A. A., Chang, Y., Kang, J. X., Ganesan, A., Anglou, E., Boukouvala, F., Nair, S., Jones, C. W., & Sievers, C. (2022). Stages and kinetics of mechanochemical depolymerization of poly(ethylene terephthalate) with sodium hydroxide. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 10(34), 11338–11347. DOI: 10.1021/acssuschemeng.2c03376
- Babaei, M., Jalilian, M., & Shahbaz, K. (2024). Chemical recycling of Polyethylene terephthalate: A mini-review. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 12(3), 112507. DOI: 10.1016/j.jece.2024.112507
- Lee, Z. H., Paul, S. C., Kong, S. Y., Susilawati, S., & Yang, X. (2019). Modification of waste aggregate PET for improving the concrete properties. *Advances in Civil Engineering* 2019, 1–10. DOI: 10.1155/2019/6942052
- Sustaita-Rodríguez, J. M., Medellín-Rodríguez, F. J., Olvera-Méndez, D. C., Giménez, A. J., & Luna-Barcenas, G. (2019). Thermal stability and early degradation mechanisms of high-density polyethylene, polyamide 6 (nylon 6), and polyethylene terephthalate. *Polymer Engineering & Science* 59(10), 2016–2023. DOI: 10.1002/pen.25201
- Meza, V., & Antonio, F. (2023). Evaluación del desempeño físico y mecánico del concreto reforzado con fibras de PET reciclado [Tesis de pregrado, Universidad del Norte].
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments* (9th ed.). Wiley.
- Peña Aedo, F., & Tufino Alvarado, J. F. (2023). Análisis comparativo de la influencia de la geometría y la rugosidad de las fibras para concreto en las capacidades mecánicas del concreto y propuesta de empleo de fibras en zigzag y rugosas de PET reciclado [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/671506/Pe%C3%B1a_AF.pdf?sequence=1
- Salazar, Y., & Wilfredo, L. (2023). Concreto con escoria para zapata continua de edificio multifamiliar de 04 niveles [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/129951/Ya_ri_SWL-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Taguchi, G. (1986). *Introduction to Quality Engineering: Designing Quality into Products and Processes*. Asian Productivity Organization.
- Vargas, M. D. (2020). Física, química y biología: Ciencias aliadas para la degradación del plástico. *Revista Pesquisa Javeriana*. <https://www.javeriana.edu.co/pesquisa/fisica-quimica-y-biologia-ciencias-aliadas-para-la-degradacion-del-plastico/>
- Khairul Anuar, N.F.S., Huyop, F., Ur-Rehman, G., Abdullah, F., Normi Y.M., Sabullah, M.K., Abdul Wahab, R. (2022). An Overview into Polyethylene Terephthalate (PET) Hydrolases and Efforts in Tailoring Enzymes for Improved Plastic Degradation. *International Journal of Molecular Sciences* 23(20), 12644. DOI: 10.3390/ijms232012644. PMID: 36293501; PMID: PMC9603852.
- Yin, Y.; Fan, Y. (2018). Influence of Roughness on Shear Bonding Performance of CFRP-Concrete Interface. *Materials* 11, 1875. DOI: 10.3390/ma11101875
- Zhang, H., Song, J.-Y., & Liu, C.-K. (2013). Immobilization of α -Fe₂O₃ nanoparticles on PET fiber by low temperature hydrothermal method. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 52(22), 7403–7412. DOI: 10.1021/ie400019t
- Muringayil Joseph, T., Azat, S., Ahmadi, Z., Moini Jazani, O., Esmaili, A., Kianfar, E., Haponiuk, J., Thomas, S. (2024). Polyethylene terephthalate (PET) recycling: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 9, 100673. DOI: 10.1016/j.cscee.2024.100673