

Validación De Fibras De PEAD Para Hormigones Proyectados Para Trasvases

Validation Of HDPE Fibers For Shotcrete For Transfers

Autores

David Rufin-Alvarado¹, Vladimir León-Vázquez², Yosvany Díaz³, Fernando Martirena⁴

¹Estudiante de Ingeniería Civil 3^{er} Año, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, druvin@uclv.cu

²Estudiante de Ingeniería Civil 3^{er} Año, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Palmira, vlvazquez@uclv.cu

³Dr.C. Ingeniero Civil, CIDEM, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, yosvanyd@uclv.cu

⁴Dr. Cs. Ingeniero Civil, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara, martirena@uclv.cu

RESUMEN

Los trasvases tienen gran importancia económica, social y ambiental en Cuba. En su construcción se emplea hormigón Fibro-Reforzado. En este, el acero es sustituido en su totalidad por la fibra estructural, que evita la retracción y fisuración. El presente trabajo tuvo como objetivo validar el uso de fibras de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) de producción nacional para hormigones proyectados en los canales de trasvases. Se evaluó el impacto de las fibras en las propiedades reológicas y físico-mecánicas de los hormigones, se determinó la dosis más adecuada y su impacto en la retracción y fisuración del hormigón. Como principales variables se definieron el tipo de cemento, la dosis de fibra, el impacto en la retracción y las propiedades en estado fresco y endurecido. La evaluación del impacto de las fibras fue realizada en hormigones de 25 MPa. Se demostró que la incorporación de fibras de PEAD de producción nacional en el hormigón Fibro-Reforzado, es un medio útil para mejorar su capacidad de controlar la propagación de fisuras, aumentar su resistencia y su capacidad de deformación. Para hormigones con cemento Portland P-35, la dosis recomendada es de 5 kg/m³, mientras que, para PP-35 es entre 4-5 kg/m³.

Palabras claves: asentamiento, Cuba, fibras, hormigón, retracción.

ABSTRACT

Water transfers have great economic, social and environmental importance in Cuba. Fiber-reinforced concrete is used in its construction. In this, the steel is completely replaced by the structural fiber, which prevents shrinkage and cracking. The objective of this work was to validate the use of High-Density Polyethylene (HDPE) fibers of national production for shotcrete in transfer channels. The impact of the fibers on the rheological and physical-mechanical properties of the concrete was evaluated, the most appropriate dose and its impact on the shrinkage and cracking of the concrete will be determined. The main variables were defined as the type of cement, the fiber dosage, the impact on shrinkage and the properties in the fresh and hardened state. The evaluation of the impact of the fibers was performed in 25 MPa concrete. It is demonstrated that the incorporation of HDPE fibers of national production in Fiber-Reinforced concrete is a useful means to improve its ability to control the propagation of cracks, increase its resistance and its deformation capacity. For concrete with P-35 Portland cement, the recommended dose is 5 kg/m³, while for PP-35 it is between 4-5 kg/m³.

Keywords: concrete, Cuba, fibers, slump, transfers, shrinkage.

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón proyectado es una técnica de hormigonado que consiste en proyectar el hormigón por medio de impulsión neumática. Este proceso se realiza con una manguera de aire comprimido que proyecta el hormigón a alta velocidad sobre la superficie del elemento que se va a hormigonar, ya sea vertical, horizontal o una estructura curva. Su composición y dosificación son semejantes a cualquier mezcla de hormigón clásico (cemento, árido fino, grueso, agua y aditivos). La diferencia está dada en que los áridos que se utilizan deben tener un tamaño máximo inferior a 10 mm, lo cual está determinado por las dimensiones del dispositivo de control utilizado como válvula en la punta de la manguera. Se utiliza entre otras razones, por su alto nivel de impermeabilidad, tanto en obras de pequeño tamaño, como en otras mucho más complejas. Tal es el caso de revestimientos de túneles, sistemas de contención o estabilización de taludes, puentes y trabajos de sellado de filtraciones en tanques para almacenar líquidos, presas o canales [1].

Con el objetivo de mejorar las prestaciones de estos hormigones se pueden utilizar fibras, ya sean artificiales o naturales. Según la ASTM C1116 se pueden clasificar según su materialidad en fibras de acero, de vidrio o sintéticas. Estas últimas pueden ser fabricadas a partir de diferentes materiales, tales como polietileno, polipropileno, nylon, poliéster, entre otros. Por otra parte, según su funcionalidad pueden clasificarse en microfibras o macrofibras. La incorporación de residuos de plásticos reciclados en la fabricación de hormigón es una de las soluciones ecológicas y económicamente sostenibles en las tendencias actuales para disminuir el agotamiento de los recursos naturales en todo el mundo [2].

El uso de las fibras como potenciadores en el campo de la ingeniería, contribuyen en la mejora de las características mecánicas de los elementos estructurales como la resistencia a la compresión y el control de la fisuración [3]. Además, los hormigones fibro-reforzados poseen una gran capacidad de resistencia a la flexión, una ductilidad mejorada y una gran suficiencia para absorber energía, más que el hormigón convencional frente a cargas dinámicas [4]. De igual forma, debido a su naturaleza hidrófoba y la forma, por lo general, estrecha y alargada de las fibras, estas permiten una mejor hidratación de la matriz en edades tempranas, pues el agua de amasado percola con mayor facilidad a través de ellas y garantiza llegar a más lugares donde haya cemento sin hidratar. Al reaccionar más cemento, se origina una mayor expansión, y cuando ocurre el encogimiento se produce una compensación, que finalmente reduce las tensiones de retracción [5], [6]–[7]. Una vez que la matriz está endurecida, las fibras comienzan a tomar esfuerzos, en especial a edades tempranas.

En este sentido, se han realizado varios estudios que corroboran lo planteado anteriormente. Por ejemplo, Al-Hadithi et al. [3] estudió el efecto de las fibras de tereftalato de polietileno (PET) con una relación de aspecto de 28 en el hormigón proyectado. Como resultado, demostró que en dosis entre 0 y 2% la fibra aumenta la resistencia a la compresión y flexión del hormigón, alcanzando el mayor valor para 1.5%. Similar tendencia fue obtenida para el módulo de elasticidad, el cual aumentó en un 17% para un mismo contenido de fibras. Sin embargo, se registró una disminución de la laborabilidad, con un asentamiento más bajo de 648 mm para un 2% de adición de fibras. Por otra parte, Faraj et al. [8] investigó la influencia de las fibras de polipropileno reciclado (PP) en las propiedades mecánicas y en la durabilidad de hormigones proyectados de alta resistencia. A diferencia del estudio anterior, se obtuvo que el uso de las fibras tuvo un impacto negativo en la resistencia a tracción y flexión del hormigón ya que, para un aumento de la fracción de fibra, se registró una disminución de ambas propiedades.

De igual forma, en la literatura científica consultada [9] se refieren los beneficios potenciales de las fibras de polietileno de alta densidad (PEAD), las cuales al ser incorporadas en el hormigón con una fracción de volumen entre el 0.40 y el 1.25%, obtienen mejoras en la ductilidad a la flexión después de la fisuración y mejoran las propiedades de servicio del hormigón, como la reducción de la fisuración por contracción plástica, la contracción por secado y la permeabilidad al agua. Estas capacidades se deben en gran medida al módulo de elasticidad, ya que esta toma tensión a medida que se produce la deformación del hormigón bajo flexión. A pesar de ello, hasta el momento no se encontraron informes científicos sobre el uso e influencia de las fibras de PEAD en hormigones proyectados.

En Cuba, las fibras utilizadas para este fin en los hormigones proyectados del Trasvase Este-Oeste Mayarí, son de importación. Una alternativa para su sustitución podría ser el empleo de fibras sintéticas de fabricación nacional obtenidas a partir de desechos de la producción de tubos de Polietileno de Alta Densidad (PEAD). A pesar de que el comportamiento del hormigón proyectado reforzado con fibras de PEAD ha sido estudiado por varios autores en diferentes países [10]–[11], en Cuba, los estudios aún son incipientes. Atendiendo a la importancia del hormigón proyectado para las obras de ingeniería como los trasvases, donde la fisuración y el agrietamiento son aspectos críticos para los fines que se persiguen, se requiere una evaluación de la compatibilidad entre los materiales que componen la mezcla de hormigón y las fibras [12]–[13]. El objetivo de este trabajo fue validar el uso de las fibras de PEAD de producción nacional para hormigones proyectados.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales Utilizados

Para el trabajo de investigación se utilizaron como materias primas:

- Cemento Portland P 35 y Cemento Portland Puzolánico PP 35 (con un % de adición activa natural entre 6% y 20%), producidos en la fábrica Karl Marx de la provincia de Cienfuegos, de acuerdo con la (NC:1340, 2020).
- Aditivo Dynamon SR-356, de factura nacional, base acrílica, modificada, de alta viscosidad, específico para el hormigón premezclado, perteneciente al sistema MAPEI. Posee un alto efecto plastificante (reducción de $\geq 25\%$ del agua de amasado), endurecedor (aumenta resistencia en 5-15% en todas las edades) y retardador (posee un alto poder retardador incluso en dosis bajas). Se utilizó debido a que fue necesario trasladar el hormigón en camiones hormigoneras hasta el lugar de la obra, el cual quedaba a varios kilómetros de la planta dosificadora.
- Áridos utilizados en la producción de hormigones del Tránsito Este-Oeste, granito Mayarí, arena Mayarí y arena Sagua (Tabla 1) (Figura 1). Ambos áridos cumplen con las especificaciones de las normativas.
- Fibras de PEAD fabricadas mediante extrusión y cuya caracterización fue realizada en los laboratorios de la empresa SAREX (Tabla 2) en el municipio de Santa Clara, Villa Clara.

Tabla 1: Propiedades de los áridos finos utilizados

Ensayos	Normas	Arena Mayarí	Arena Sagua
Material más fino que el Tamiz No 200 (%)	NC 182:2002 Áridos. Determinación T-200	2,060	1,080
Partícula de Arcilla (%)	NC 179:2002 Áridos. Determinación del contenido de partículas de arcilla. Método de ensayo	0,700	0,600
Peso Específico Corriente (g/cm ³)	NC 186:2002 Arena. Peso Específico y absorción	2,511	2,334
Peso Específico Saturado (g/cm ³)		2,583	2,421
Peso Específico Aparente (g/cm ³)		2,706	2,555
Absorción (%)		2,870	3,700
Peso Volumétrico Suelto (kg/m ³)	NC 181:2002 Áridos. Determinación del peso volumétrico. Método de ensayo	1456	1451
Peso Volumétrico Compactado (kg/m ³)		1741	1618
Módulo de Finura (Adim)	NC 251:2013 Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos	3,320	3,380

Tabla 2: Características de las fibras

Datos Técnicos	PEAD	Mapefibre CN54
Módulo de Elasticidad (GPa)	0.3 - 0.4	> 5.0
Longitud (mm)	40 - 50	54 ± 5%
Diámetro (mm)	0.65 - 0.9	0.32 ± 5%
Densidad (g/cm ³)	0.92 - 0.96	0.91 ± 0.02
Relación l/d (mm)	40 - 60	180
Elongación (%)	≥ 70	< 20
Consumo (kg/m ³)	4 - 5	1 - 6

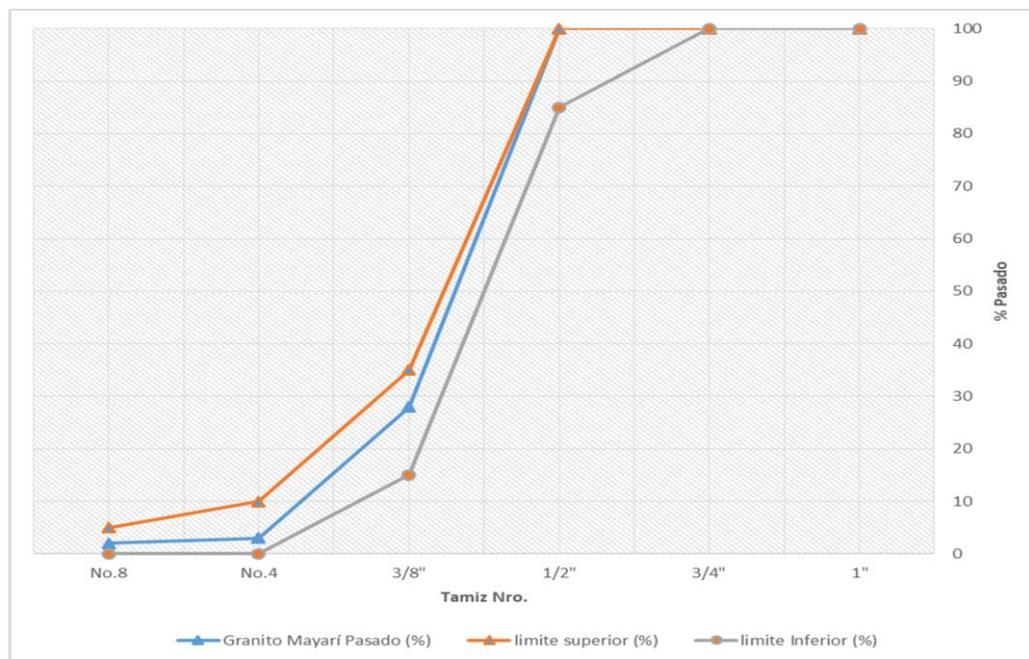


Figura 1: Distribución de tamaño de partículas de los áridos gruesos utilizados.

2.2. Programa Experimental

El programa experimental se concentró en la evaluación del impacto de uso de fibras de PEAD en hormigones de consistencia fluida producidos con cemento P-35 y PP-35, en una dosificación de hormigón de 25 MPa certificada por la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas, ENIA en Holguín. Se midieron las propiedades en estado fresco (asentamiento por el cono de Abrams, NC 120:2014 Hormigón Hidráulico. Especificaciones) (Figura 2b), en estado endurecido (NC 724:2015 Ensayos del hormigón. Resistencia del hormigón en estado endurecido) (Figura 2c), y el impacto en la retracción (canal de retracción en hormigones).



Figura 2: Protocolos de ensayo en hormigones

El canal de retracción (Figura 2a) está compuesto por un perfil de acero inoxidable en forma de U que mide un metro de longitud con un ancla fija en cada uno de sus extremos y un ancla móvil que se desplaza sobre tres ruedas. El movimiento de esta última se registra por una sonda transductor de desplazamiento lineal variable (LVDT) de alta sensibilidad. Para evitar la fricción entre el material y las paredes del canal se utiliza una lámina de goma de neopreno. Los datos recibidos son registrados y almacenados por un datalogger como archivos estándar ASCII, que posteriormente pueden ser manejados a través de Microsoft Excel. Las variaciones de la contracción en el tiempo se determinaron a partir de las diferencias entre las deformaciones medidas y la dilatación por temperatura [14]. Se cubrieron las muestras con una película de polietileno (nylon) para evitar su desecación. Debido a que la temperatura varió solo durante el período de fraguado rápido del cemento (durante las 24 h) y posteriormente fue igual a la temperatura ambiente, su influencia fue considerada solo en las primeras 24 horas.

Para la implementación de los objetivos se mantuvo como parámetros de estado la relación agua/cemento y el porcentaje de aditivo. Como variables independientes se definió el contenido de fibra de PEAD, a partir de los datos de consumo proporcionados por la empresa SAREX y el tipo de cemento (Tabla 3). Además, se estableció una dosis de 2 kg/m³ de fibra importada de la firma MAPEI como variable de control.

Tabla 3: Variables independientes y sus niveles

Variables	Niveles	
	Bajo	Alto
Cantidad de fibra PEAD (kg/m ³)	2	5
Tipo de cemento	P-35	PP-35

2.3. Dosificaciones Utilizadas

Para el estudio se trabajó con dos dosificaciones de hormigón de 25 MPa a los 28 días (tabla 4).

Tabla 4: Dosificaciones de hormigón de 25 MPa a los 28 días.

Tipo de mezclas	Diseño del Hormigón								
	Cemento Portland (kg)	Aditivo (kg)	Árido Fino Sagua (kg)	Árido Fino Mayarí (kg)	Granito (kg)	Agua (L)	Fibras (kg)	Relación a/c	% de aditivo (r.c.)
Cemento P-35									
MP-1 (no fibra)	420	2.1	229	434	451	225	0	0.54	0.50
MP-2 (2 kg/m ³ MAPEI)	420	2.1	229	434	451	225	2	0.54	0.50
M-1 (2 kg/m ³ PEAD)	420	2.1	229	434	451	225	2	0.54	0.50
M-2 (5 kg/m ³ PEAD)	420	2.1	229	434	451	225	5	0.54	0.50
Cemento PP-35									
MP-1 (no fibra)	420	2.1	229	434	451	225	0	0.54	0.50
MP-2 (2 kg/m ³ MAPEI)	420	2.1	229	434	451	225	2	0.54	0.50
M-1 (2 kg/m ³ PEAD)	420	2.1	229	434	451	225	2	0.54	0.50
M-2 (5kg/m ³ PEAD)	420	2.1	229	434	451	225	5	0.54	0.50

Nota: r.c. (en relación al peso del cemento)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Impacto Del Empleo De Fibras PEAD En Las Propiedades Del Hormigón En Estado Fresco

Se estableció un asentamiento mínimo por proyecto de 200 mm (la NC 463:2009 Guía del hormigón proyectado establece un margen de asentamiento para hormigones proyectados por vía húmeda de 160 a 220 mm), con el fin de que el hormigón fuera proyectado por la máquina de proyección. De igual forma, esta norma plantea que el tiempo máximo de entrega del hormigón es de 30-45 min, por lo que el asentamiento se comprobó a la salida y a la llegada del camión hormigonera a la obra. Como resultado, se evidenció que a pesar de presentar un ligero decrecimiento producto de la absorción de los áridos, el asentamiento alcanzó valores similares para las diferentes dosis de fibras (Figuras 3-4). Aunque diferentes autores coinciden en que el uso de las fibras decrece notablemente la laborabilidad (asentamiento) del hormigón [2]-[17], el resultado anterior confirma que pequeñas adiciones de fibras no la afectan [11], ya que, debido a su forma uniforme, estrecha y alargada, así como su propiedad de no absorber el agua (hidrofobicidad), permite que se produzca una mayor hidratación del cemento y da como resultado una mejor interacción entre las fibras y la matriz cementicia [14].

De igual forma, las mezclas con ambos tipos de cementos Portland, tanto el P35 como el PP35, cumplieron con los parámetros de asentamiento establecidos para hormigones fluidos (200 mm), inclusive para los valores más altos de adición de fibras de PEAD.

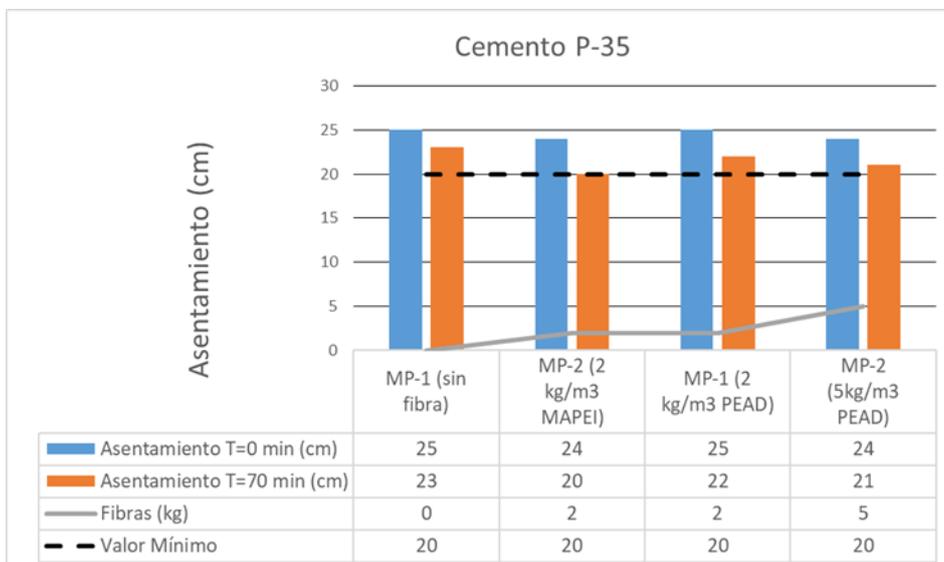


Figura 3: Resultados del ensayo en el Cono de Abrams para hormigón Fibro-Reforzado (P-35) con fibras de PEAD

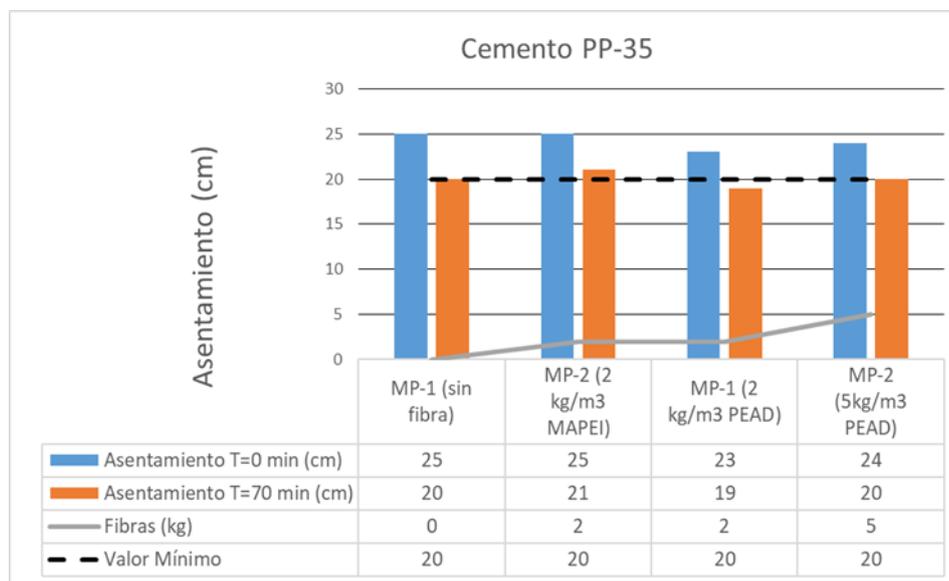


Figura 4: Resultados de ensayo en el Cono de Abrams para hormigón Fibro-Reforzado (PP-35) con fibras de PEAD

3.1.1. Impacto Del Empleo De Fibras PEAD En Las Propiedades Del Hormigón En Estado Endurecido

Aunque en la literatura consultada [2], se comenta que la adición de fibras de PEAD hasta 1.25% tiene efectos negativos en la resistencia a compresión del hormigón, las muestras elaboradas con cementos P-35 y PP-35 no manifestaron diferencias entre ellas en cuanto a esta propiedad para porcentos similares de adición, pero sí con respecto a la muestra patrón (sin fibras) (Figura 5). Si se comparan con las muestras sin fibras se aprecia un incremento aproximado de 1,2 veces la resistencia a la compresión, lo que está en concordancia con lo planteado de que las fibras pueden aumentar la resistencia a la compresión, del hormigón [11]. Este incremento se debe al fuerte vínculo entre la matriz cementicia y las fibras, las cuales, al distribuirse uniformemente en la mezcla disminuyen los vacíos en la superficie, lo que contribuye a mejorar la cohesión del hormigón [8]. Además, para las diferentes edades donde se utilizaron las fibras de PEAD, se superaron los valores establecidos en el diseño de 25 MPa a los 28 días, lo cual corrobora que su uso mejora el rendimiento del hormigón a largo plazo [16]. En este sentido, estos resultados demostraron que la utilización de fibras de PEAD, garantizan las resistencias mecánicas especificadas por proyecto.

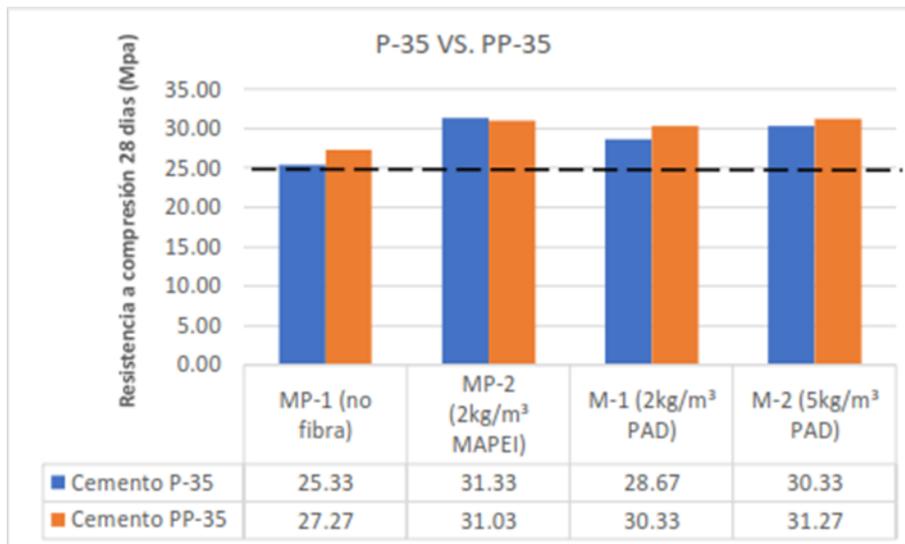


Figura 5: Valores de resistencia a compresión en los hormigones estudiados

3.1.2. Control De La Retracción En Hormigones

Los resultados en el ensayo del canal de retracción (Figuras 6 y 7) mostraron el mayor valor de deformación en el cemento P-35 con la dosis de 2 kg/m³ de fibra importada (Mapefibre CN54) a las 8 h de iniciada la medición. Con la fibra de PEAD, para una dosis similar y superior (5 kg/m³) no se alcanzó dicha deformación (Figura 6) y los valores máximos se obtuvieron a las 10 h. Esto puede deberse a que el alto contenido de clínker del cemento P-35 limita una mejor hidratación para la relación agua/cemento utilizada [5]. Además, ambas fibras tienen diferente módulo de elasticidad (Mapefibre > PEAD), lo cual podría repercutir en el efecto de la retracción. Este es un parámetro importante que influye en el valor resultante de la retracción en los hormigones fibro-reforzados. La retracción autógena es la reducción macroscópica de volumen del cemento durante la hidratación temprana en el momento del fraguado inicial [18]. En hormigones las máximas deformaciones se registran entre las 2 y 6 horas [14] lo cual se corroboró en este trabajo.

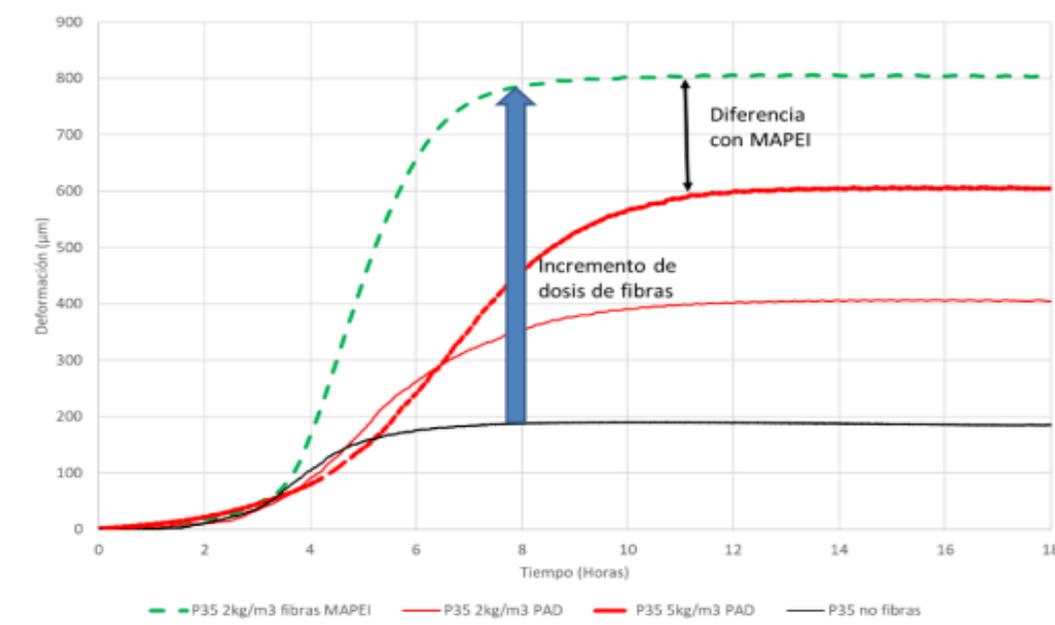


Figura 6: Impacto de fibras PEAD en la retracción. Hormigón con P-35

Por otra parte, el hormigón producido con cemento PP-35, alcanzó el máximo valor de deformación con una dosis de 5 kg/m³ de fibra nacional a las 8 h de iniciada la medición. En este caso, los valores iniciales de expansión son altos, debido al efecto de dilución, que provoca una mejor hidratación del cemento, y por ende una más alta expansión inicial [19]. Además, al utilizar cemento PP-35 se logra disminuir el tiempo en el que las fibras soportan las tensiones internas del hormigón con respecto a la fibra importada y la muestra patrón

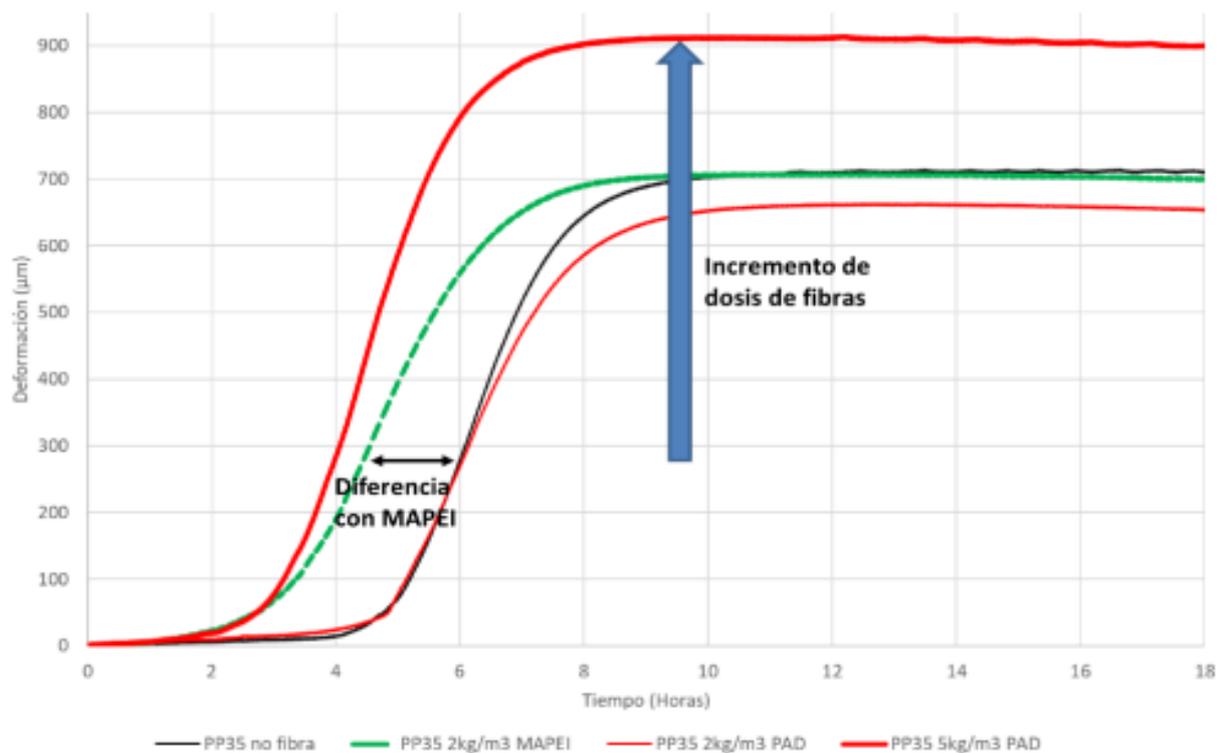


Figura 7: Impacto de las fibras en retracción. Hormigón con PP-35

4. CONCLUSIONES

- Las fibras de producción nacional a partir de PEAD reciclado cumplen con los requisitos establecidos para su uso en el control de retracción de hormigones proyectados.
- Con el empleo de cemento PP-35 y dosis de 5 kg/m³ se superan los valores de deformación alcanzados por la fibra importada para 2 kg/m³ de dosis.
- Al emplear cemento PP-35 se logra disminuir el tiempo en el que las fibras comienzan a soportar las tensiones internas del hormigón.
- Las mezclas con cemento P-35 con la máxima dosis de fibra nacional evaluada (5kg/m³), aunque cumplen con los parámetros de asentamiento y resistencia a la compresión, no alcanzaron las deformaciones alcanzadas por las fibras importadas para 2 kg/m³.

1. J. Wang, D. Niu, S. Ding, Z. Mi, and D. Luo, "Microstructure, permeability and mechanical properties of accelerated shotcrete at different curing age," *Construction and Building Materials*, vol. 78, pp. 203-216, 2015.
2. S. Abeysinghe, C. Gunasekara, C. Bandara, K. Nguyen, R. Dissanayake and P. Mendis, "Engineering Performance of Concrete Incorporated with Recycled High-Density Polyethylene (HDPE)—A Systematic Review," *Polymers*, vol. 13, no 11, p. 1885, 2021.
3. A. I. Al-Hadithi; A. T. Noaman, W. K. Mosleh, "Mechanical properties and impact behavior of PET fiber reinforced self-compacting concrete (SCC)." *Composite Structures*, 2019, vol. 224, p. 111021.
4. Y. I. Olivera Pérez, S. P. Guevara Saravia, and S. P. Muñoz Pérez, "Revisión sistemática de la literatura sobre la mejora de las propiedades mecánicas del hormigón con fibras de origen artificial-natural," *Ingeniería*, vol. 27, no. 2, 2022.
5. A. Guo, Z. Sun, and J. Satyavolu, "Impact of modified kenaf fibers on shrinkage and cracking of cement pastes," *Construction and Building Materials*, vol. 264, p. 120230, 2020.
6. N. Yousefieh, A. Joshaghani, E. Hajibandeh, and M. Shekarchi, "Influence of fibers on drying shrinkage in restrained concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 148, pp. 833-845, 2017.
7. R. Babaie, M. Abolfazli, and A. Fahimifar, "Mechanical properties of steel and polymer fiber reinforced concrete," *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, vol. 28, no 1, pp. 119-134, 2020.
8. R. H. Faraj, A. F. Sherwani, A. Daraei, "Mechanical, fracture and durability properties of self-compacting high strength concrete containing recycled polypropylene plastic particles." *Journal of Building Engineering*, 2019, vol. 25, p. 100808.
9. N. Pesie, S. Zivanovic, R. Garcia, and P. Papastergiou, "Mechanical properties of concrete reinforced with recycled HDPE plastic fibres," *Construction and Building Materials*, vol. 115, pp. 362-370, 2016.
10. M. M. Rao, S. K. Patro, and S. S. Basarkar, "Mechanical and post-cracking performance of recycled high-density polyethylene fiber reinforced concrete," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, vol. 103, no 2, pp. 519-530, 2022
11. T. Rahman and J. Nurdiana, "The effect of HDPE plastic fibres on concrete performance", 2020.
12. Y. K. Hidalgo Yáñez, "Evaluación de Parámetros Incidentes en la Respuesta Post-Agrietamiento del Hormigón Reforzado con Fibra," Universidad de Chile, 2018.
13. E. Poveda and G. Ruiz, "Dosificación de hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero basado en el estudio de la reología de la pasta," presented at the V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales, Valencia, 2018.
14. L. R. Torres, "Influencia de los cementos mezclados PP35 y LC3 en las propiedades de los morteros." Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, 2019.
15. A. Poonyakan, M. Rachakornkij, M. Wecharatana, and W. Smittakorn, "Potential Use of Plastic Wastes for Low Thermal Conductivity Concrete," *Materials*, vol. 11, no 10, p. 1938, 2018.
16. Tamrin; J. Nurdiana, "The effect of recycled HDPE plastic additions on concrete performance," *Recycling*, vol. 6, no 1, p. 18, 2021.
17. A. Balea, E. Fuente, M. C. Monte, A. Blanco, and C. Negro, "Recycled fibers for sustainable hybrid fiber cement-based material: A review," *Materials*, vol. 14, no 9, p. 2408, 2021.
18. M. Abu-Saleem, et al. "Evaluation of concrete performance with different types of recycled plastic waste for kerb application." *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 293, p. 123477.
19. G. Yao, Q. Liu, J. Wang, P. Wu, and X. Lyu, "Effect of mechanical grinding on pozzolanic activity and hydration properties of siliceous gold ore tailings," *J. Clean. Prod.*, vol. 217, pp. 12–21, 2019