

INCORPORACIÓN DE FIBRAS DE COCO EN HORMIGÓN PARA PAVIMENTOS

Graciela Giaccio, Francisco Hours, María Celeste Torrijos, Juan Carlos Vivas, Ronald Cruz y Raúl Zerbino

Facultad de Ingeniería UNLP, calle 1 y 47 La Plata, LEMIT-CIC; zerbino@ing.unlp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

Mayor durabilidad, buena respuesta en servicio y un bajo costo de su ciclo de vida se destacan entre las ventajas que poseen los pavimentos de hormigón, sin embargo y especial en climas cálidos y áridos, son susceptibles a la fisuración temprana, dada su gran relación superficie-volumen. En tiempo caluroso la alta temperatura, combinada con las elevadas velocidades del viento y baja humedad, generan condiciones críticas para el desarrollo de la fisuración por contracción plástica [1-2]. Estas fisuras superficiales prematuras pueden aumentar el riesgo de agrietamiento por contracción por secado, o acelerar el ingreso de agentes nocivos y afectar la durabilidad, la capacidad de servicio y la estética del pavimento. El control de esta fisuración prematura, a un costo mínimo, es crucial para el logro de un pavimento de buena calidad. Como soluciones habituales aparecen el uso de membranas de curado y/o la incorporación de microfibras poliméricas. Esta última opción podría ser particularmente beneficiosa en el caso de caminos rurales con bajos volúmenes de tránsito, donde los cuidados respecto del curado y el control de calidad no siempre son adecuados. La efectividad de las fibras varía según sus características, las microfibras poliméricas, incluso en pequeñas dosis, pueden eliminar la fisuración plástica [3, 4], las fibras largas adicionalmente transfieren esfuerzos en el hormigón endurecido al ejercer un efecto de costura de las fisuras [5, 6].

Las principales limitaciones de las fibras sintéticas son el costo y su contribución a las emisiones de CO₂, las que podrían reducirse empleando fibras naturales adecuadas [7, 8]. La incorporación de fibras naturales para refuerzo de materiales frágiles se ha empleado desde la antigüedad; diversas fibras pueden usarse en hormigón como alternativas más económicas, sustentables y de fácil acceso en algunas regiones del mundo como reemplazo de las fibras o microfibras sintéticas. Entre las fibras naturales más empleadas en ingeniería civil aparecen las de coco, yute y sisal, en especial para uso en capas de subrasante o terraplenes como mallas de geotextil. Para tales aplicaciones se prefieren fibras con longitud mayor a 50 mm, las fibras más cortas suelen desecharse o incinerarse. El uso de fibras cortas en pavimentos de hormigón sería una forma racional de promover la sostenibilidad en el sector vial. En India la fibra de coco conocida como *cocos nucifera* representa una prometedora alternativa considerando su amplia disponibilidad y propiedades mecánicas [9, 10].

En el Indian Institute of Technology de Madras (IITM) se estudiaron diversas formas de incorporación al hormigón de estas fibras cortas; se encontró que debido a su mayor absorción de agua, su menor densidad, su textura superficial rugosa y naturaleza hidrofílica pueden reducir la trabajabilidad de las mezclas, en especial si se emplean grandes dosis de fibras de 40 mm de longitud. También se verificó la aptitud de las fibras para controlar la exudación y generar efectos positivos en la retención de agua lo que podría disminuir el asentamiento plástico y/o el alabeo de las losas. A la vez las dosis de fibras de 0,4 % en volumen fueron efectivas para controlar la contracción plástica lo que fue comprobado en mezclas elaboradas con diferentes tipos de cemento. Sin embargo, en algunos casos los hormigones mostraron reducciones en la resistencia a compresión con respecto a las mezclas sin fibras [11].

Como parte de un programa de cooperación entre la Facultad de Ingeniería UNLP y el IITM, se planteó una investigación para valorar las propiedades mecánicas de hormigones para pavimentos cuando se incorporan en la matriz fibras de coco de distinta longitud, empleadas en distintas dosis. Como referencia también se evaluaron las propiedades del mismo hormigón sin fibras y de otro que incorpora una dosis típica de microfibras sintéticas de amplio uso. Este trabajo analiza principalmente el comportamiento en estado endurecido incluyendo la respuesta estática en compresión y en flexión y el desempeño frente a impactos repetidos.

PARTE EXPERIMENTAL

Adoptando proporciones de hormigón representativas de las habitualmente utilizadas en la construcción de pavimentos se elaboraron seis mezclas: un hormigón simple como referencia, cuatro hormigones reforzados con fibras (HRF) de coco considerando dos dosis (1 y 4 kg/m³, que implican cerca de 0,1 y 0,4 % en volumen) y de distinta longitud (10 mm y 50 mm), y una sexta mezcla a la que se incorporó al mismo hormigón de base una dosis típica de microfibras poliméricas (0,6 kg/m³). Se emplearon como materiales cemento portland CP40 (350 kg/m³), arena sílicea natural (700 kg/m³), arena de trituración (175 kg/m³) y dos fracciones de piedra granítica de trituración (1000 kg/m³) resultando un tamaño máximo de 20 mm. Todas las mezclas tuvieron una relación agua/cemento 0,50. Se utilizaron un plastificante convencional y un aditivo superfluidificante de base naftalénica, ajustando ligeramente la dosis de este último con el propósito de obtener en todos los casos asentamientos iguales a 140 ± 40 mm. La temperatura de los hormigones fue igual a 19 ± 1 °C.

La Figura 1 muestra imágenes de la etapa de elaboración y caracterización en estado fresco de las mezclas. La Tabla 1 presenta la identificación adoptada y las propiedades del hormigón fresco; se evaluaron el asentamiento (As), el número de golpes en el ensayo de remoldeo de Powers (NP), el contenido de aire empleando el aparato de Washington y el peso unitario (PUV); también se evaluaron la capacidad (C), velocidad (V) y duración (D) de la exudación para comparar el efecto que ejercen las diferentes dosis y tipos de fibras. La Figura 2 muestra los resultados obtenidos en los ensayos de exudación donde se verifica que la incorporación de fibras de coco genera efectos comparables a los que producen las microfibras poliméricas. Se moldearon cilindros de 100x200 mm para ensayos de compresión, discos de 60x150 mm para un ensayo de impacto y prismas de 75x105x430 mm para ensayos de flexión. Las probetas fueron desmoldadas a las 24 horas y curadas en cámara húmeda durante 28 días.



Figura 1. Elaboración y caracterización del hormigón fresco.

Tabla 1. Proporciones y propiedades en estado fresco de los hormigones.

Mezcla	Fibras		As mm	NP golpes	PUV kg/m ³	Aire %	Exudación		
	Tipo	kg/m ³					C %	V m/s 10 ⁻⁸	D Min
C	-	-	160	16	2390	2.1	4.8	11	310
A	coco 10 mm	1	170	10	2380	1.9	3.5	9	310
B	coco 10 mm	4	145	19	2370	1.9	3.2	10	280
D	coco 50 mm	1	155	12	2370	2.1	2.9	12	190
E	coco 50 mm	4	135	19	2380	1.9	2.2	9	220
P	Polimérica	0.6	150	13	2380	2.3	2.4	9	280

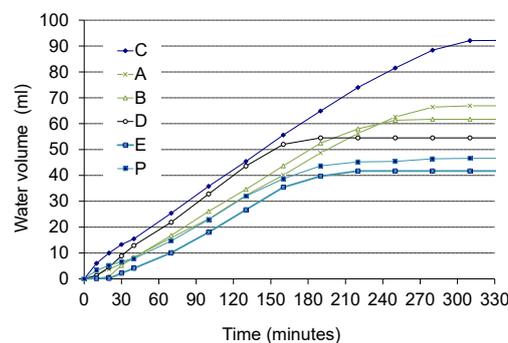


Figura 2. Variación del volumen de agua acumulada durante los ensayos de exudación.

En los ensayos de compresión se determinaron la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad. Los ensayos de flexión se realizaron siguiendo las pautas generales de la norma EN14651 [12] determinando las curvas carga vs apertura de la boca de fisura (CMOD); se adoptó una luz de 350 mm y una entalladura central aserrada de 17 mm para mantener igual relación altura/luz y entalladura/altura que la citada norma; las cargas se aplicaron usando un sistema de lazo cerrado usando un extensómetro tipo clip sobre la entalladura como señal de control; se calcularon la resistencia a primera fisura f_L y la capacidad de resistencia residual para CMOD iguales a 0,33 y 1,67 mm, de forma de estimar las tensiones f_{R1} y f_{R3} [13].

Se implementaron dos procedimientos para evaluar el comportamiento de impacto, el método del Comité ACI 544 [14] y un nuevo método basado en la aplicación de Cargas Crecientes de Impacto (GIL) recientemente desarrollado [15]. En el primero se aplican golpes de un martillo compactador Proctor (4,54 kg de masa y 457 mm de altura de caída) sobre una esfera de acero (63,5 mm de diámetro) colocada sobre la cara de moldeo de un disco de 150 mm de diámetro y 63 mm de altura ubicado sobre una placa rígida de acero con cuatro placas laterales. Se registra el número de impactos (N1) hasta que aparece la primera fisura y luego se aplican impactos adicionales hasta que la muestra toca tres de las cuatro placas (N2). La Figura 3 muestra la máquina utilizada para la prueba GIL. El dispositivo consta de dos rieles que guían el movimiento vertical y permiten variar la altura de caída del proyectil (5 kg) y el sistema de apoyo con un soporte fijo y otro móvil donde se ubica la probeta simplemente apoyada. Se utilizaron prismas de 75x105 mm de sección y luz entre apoyos igual a 160 mm, con una entalladura en el centro de la cara de tracción de 17 mm de profundidad. En la Fase 1 de la prueba GIL se determina la energía acumulada hasta que se produce la primera fisura (E_C) y en la Fase 2 se valora la energía que demanda la propagación de la fisura (E_P) hasta alcanzar una determinada apertura (COD), sumadas ambas se calcula la energía total (E_T). Después de cada impacto, se mide la COD mediante un microscopio digital con una precisión de 0,0001 mm. La Figura 3 representa la energía acumulada (E^*) vs los valores COD. La velocidad (V_C) de crecimiento de la fisura se calcula a partir de las energías acumuladas y las aperturas correspondientes para COD de 0,5 y 2,5 mm.

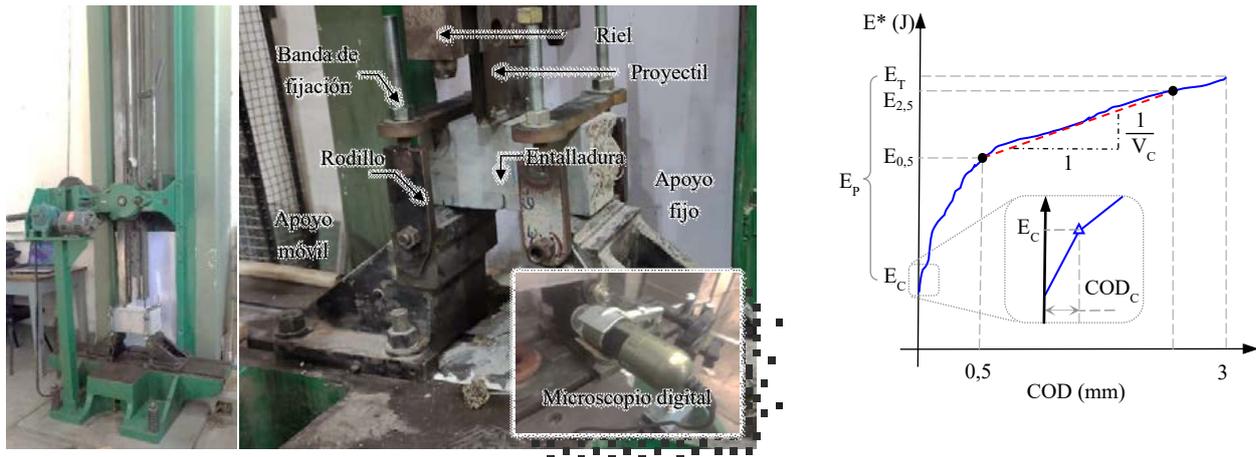


Figura 3. Máquina y dispositivos utilizados para el ensayo GIL y curva de evolución de la apertura de fisura (COD).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sobre el hormigón fresco se observaron aumentos en la energía de remoldeo (número de golpes en el ensayo de Powers) que indican que las fibras de coco mejoraron la cohesión de modo similar a las microfibras sintéticas. No se encontraron variaciones significativas en el contenido de aire, pero sí una pequeña reducción en el peso unitario en los hormigones con ambos tipos de fibras. Los efectos de las fibras de coco sobre la exudación fueron consistentes con lo antes observado [11] y similares a los que generaron las microfibras sintéticas.

La Tabla 2 presenta los resultados promedio y los respectivos coeficientes de variación (COV) de la resistencia (f_c), el módulo de elasticidad (E) obtenidos bajo cargas de compresión y de se la resistencia a primera fisura (f_L) y las tensiones residuales f_{R1} y f_{R3} . La Figura 4 muestra curvas tensión – deformación axial en compresión y curvas tensión – CMOD en ensayos de flexión representativas de cada uno de los hormigones estudiados. Se aprecia que con fibras de coco en dosis de hasta 4 kg/m^3 se pueden elaborar mezclas con similares niveles de trabajabilidad y resistencia que el hormigón sin fibras, así como de la mezcla que incorporó microfibras poliméricas. No se encontraron efectos negativos bajo cargas de compresión, lo que se justifica considerando el pequeño volumen de fibras incorporado, sólo se observó alguna reducción en la resistencia y en el módulo de elasticidad en la mezcla E que incorporó el mayor contenido de las fibras de coco más largas. Bajo cargas de flexión se observó una contribución marginal de las fibras de coco en la resistencia, similar al caso de la mezcla con microfibras sintéticas. Es bien sabido que las microfibras sintéticas no aportan capacidad residual al HRF en estado endurecido. Sin embargo, se midieron pequeños aumentos en las tensiones residuales en los HRF y en especial en la mezcla E (4 kg/m^3 de fibras de 50 mm), la resistencia residual f_{R3} fue mayor a la de la mezcla P con microfibras poliméricas (Tabla 2). Este hecho puede justificar cierta contribución de las fibras de coco bajo cargas de impacto.

Tabla 2. Resultados de ensayos de compresión y flexión, (COV entre paréntesis).

Mezcla	Fibras		f_c MPa	E GPa	f_L MPa	f_{R1} MPa	f_{R3} MPa
	Tipo	kg/m^3					
C	-	-	38,4 (5)	38,0 (4)	5,13 (7)		
A	coco 10 mm	1	39,6 (2)	36,2 (5)	5,20 (9)	1,03 (17)	0,08 (42)
B	coco 10 mm	4	41,2 (3)	37,3 (3)	5,31 (9)	1,26 (18)	0,29 (25)
D	coco 50 mm	1	38,4 (4)	38,0 (4)	5,31 (8)	1,18 (44)	0,06 (25)
E	coco 50 mm	4	36,8 (7)	37,5 (8)	5,36 (8)	1,44 (16)	0,42 (25)
P	polimérica	0,6	40,1 (2)	38,4 (2)	5,31 (5)	1,57 (20)	0,18 (16)

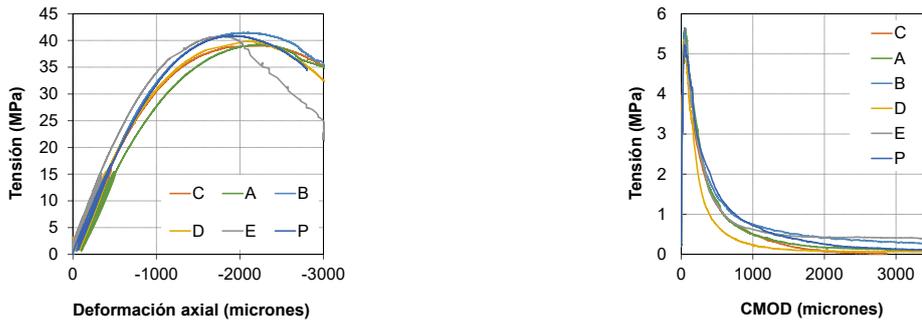


Figura 4. Curvas tensión – deformación axial en compresión y tensión – CMOD en flexión.

La Figura 5 muestra las curvas energía acumulada vs COD de las pruebas de impacto con el ensayo GIL, las que resultaron similares entre el hormigón simple y los HRF a excepción de la mezcla E. Cabe señalar que una mayor pendiente en las curvas significa una menor tasa de crecimiento de fisuras. La Tabla 3 resume los valores medios de las energías de fisuración (E_C), la tasa de apertura de fisura (V_C) y la energía total (E_T) en dicho ensayo. Los resultados según el método ACI-544 se comparan en la figura en términos de la energía acumulada.

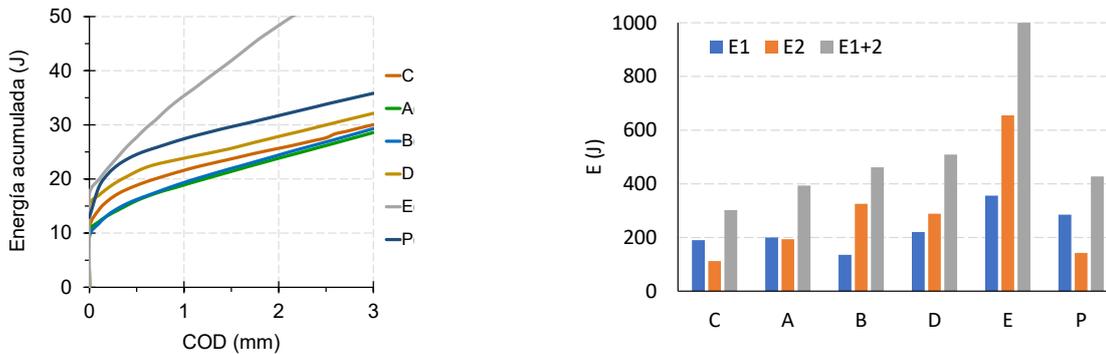


Figura 5. Resultados de impacto: energía acumulada vs COD (GIL) y método ACI-544.

Tabla 3. Resultados de los ensayos de impacto.

Mezcla	Fibras		GIL			ACI-544	
	Tipo	kg/m ³	E_C J	E_T J	V_C mm/J	N_1	N_{1+2}
C	-	-	17 (19)	32 (14)	238 (21)	9 (65)	15 (51)
A	coco 10 mm	1	16 (22)	30 (18)	214 (36)	10 (64)	19 (25)
B	coco 10 mm	4	15 (22)	31 (20)	203 (32)	7(43)	23 (31)
D	coco 50 mm	1	19 (<1)	30 (11)	306 (58)	11 (51)	25 (27)
E	coco 50 mm	4	24 (27)	63 (14)	79 (25)	18 (82)	50 (36)
P	Polimérica	0,6	19 (23)	37 (21)	221 (17)	14 (73)	21 (55)

Bajo impactos repetidos las mezclas con fibras solo mejoraron marginalmente el rendimiento en comparación con el hormigón simple. En el ensayo GIL las fibras de coco, a diferencia de las poliméricas, no redujeron el ancho de la primera fisura. En el caso de las fibras cortas, para ambas dosis, no hubo cambios ni en la velocidad ni en la energía. No obstante, al considerar la tasa de fisuración (V_C) en estado fisurado con 4 kg/m³ de fibras largas se produjo una reducción de la V_C de más de 200 %, esto indica que, para estas dosis, el crecimiento de las fisuras fue controlado por las fibras de coco. Según el método del ACI 544 todos los HRF mejoraron el comportamiento al impacto en comparación con el del hormigón simple, incluso en mezclas que incorporaban fibras de 10 mm, confirmando que a mayores dosis de fibras de coco mejora la respuesta frente al impactos; esto se observó principalmente al utilizar fibras

de 50 mm en mayor dosis (hormigón E), con un incremento de energía total mayor al 200 %. Comparando las energías pre y postfisuración (E1, E2), y al contrario de lo observado con las microfibras poliméricas, las fibras de coco también mejoraron la respuesta en estado fisurado, siendo siempre $E2 > E1$. Esto se justifica ya que, después de romper la matriz, las fibras de coco no se rompen ni se arrancan tan rápido, como sucede con las microfibras sintéticas. Los valores de energía estimados a partir del método del ACI 544 fueron menores a los del método GIL lo que era de esperar ya que la prueba ACI 544 conduce a mayores pérdidas de energía.

CONCLUSIONES

Este trabajo muestra los resultados que corresponden a un programa de cooperación entre la Facultad de Ingeniería UNLP y el IIT Madras (India), sobre el aprovechamiento de fibras cortas de coco en hormigones para pavimentos. De los mismos surge que:

- Al igual que las microfibras poliméricas, las fibras de coco mejoran la cohesión del hormigón fresco. Para asentamientos similares, se redujo la energía de remoldeo para bajos contenidos de fibras (0,1 % en volumen) en comparación con hormigón simple y aumentó ligeramente para un volumen de fibras de 0,4 %. Las fibras de coco poseen un efecto positivo en el control de la fisuración plástica, a la vez que controlan la exudación y favorecen la retención de agua.
- Utilizando bajos contenidos de fibras de coco (< 0,4 % en volumen) no son de esperar efectos negativos sobre la resistencia y rigidez en compresión. En el caso de flexión, incluso pueden aparecer ligeras mejoras en la capacidad residual postfisuración, respecto a las observadas con microfibras sintéticas, que pueden justificar cierta contribución de las fibras de coco de mayor longitud en la respuesta al impacto.
- Se midió una mejor respuesta frente a impactos repetidos al incorporar 4 kg/m^3 de fibras de coco de 50 mm, con incrementos de energía total y reducciones en la tasa de fisuración (V_c).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Calo D; Souza E, Marcolini E (2014) Manual de Diseño de Pavimentos ICPA
- [2] CIRSOC 201-2005 Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón. INTI (2005) 666 p
- [3] Naaman AE, Wongtanakitcharoen T, Hauser G, (2005) Influence of different fibers on plastic shrinkage cracking of concrete, *ACI Materials J* 102 (1):49-58.
- [4] Sirajuddin M, Gettu R, (2018) Plastic shrinkage cracking of concrete incorporating mineral admixtures and its mitigation, *Materials and Structures* 51 (2):1-10.
- [5] Najm H, Balaguru, PJMJ, (2003) Effect of large-diameter polymeric fibers on shrinkage cracking of cement composites, *ACI Materials J* 99 (4):345-351.
- [6] Zerbino R (2022) Hormigón reforzado con fibras 2 Ed. Revisada y ampliada AATH, Serie Hormigones Especiales, Buenos Aires, ISBN 978-987-47035-1-4, 370 p.
- [7] Joseph PV, Joseph K, Thomas S (1999) Effect of processing variables on the mechanical properties of sisal-fiber-reinforced polypropylene composites, *Comp Sc Tec* 59 (11):1625-40.
- [8] Toledo Filho RD, Ghavami K, England GL, Scrivener K, (2003) Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability, *Cem Concr Comp* 25 (2):185-196.
- [9] Satyanarayana KG, Sukumaran K, Mukherjee PS, Pavithran C, Pillai SG (1990) Natural fibre-polymer composites. *Cem Concr Comp* 12 (2): 117-136.
- [10] Munawar SS, Umemura K, Kawai S (2007) Characterization of the morphological, physical, and mechanical properties of seven nonwood plant fiber bundles, *J of Wood Science* 53 (2):108-113.
- [11] Khute S, Singh S, Zerbino R, Gettu R. (2022) Fresh-state behavior of paving concrete reinforced with discarded coconut coir fibres, *The Indian Concrete Journal* 96 (12): 5-13.
- [12] Technical Committee CEN/TC 229 EN 14651 (2005) Test method for metallic fibered concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual).
- [13] Giaccio G, Tobes JM, Zerbino R. (2008) Use of small beams to obtain design parameters of fibre reinforced concrete, *Cem Conc Comp* 30, 297-306.
- [14] ACI 544.9R-17 (2017) Report on measuring mechanical properties of hardened fiber reinforced concrete. American Concrete Institute, USA
- [15] Vivas JC, Zerbino R, Torrijos MC, Giaccio G (2021). A test procedure for evaluating the impact behaviour of fibre reinforced concrete. *Materials and Structures* 54 (208), 1-17.