

Performance Assessment of Agave americana L. Fiber-Reinforced Concrete Slabs under a Humanitarian Engineering Approach in Peru

Tema general: Humanitarian, Peace, and Service-Learning Engineering

Formato: Full Paper (FP): general

Jorge Luis Nishihara Alcocer²  , Luis Alex Alzamora de los Godos Urcia¹  , Jully Pahola Calderón Saldaña³ 
, Fiorella Sthefany Valladolid Marcos¹  , Ceferino Condorchoa Anculle⁴  , Moisés Roldán Medina⁵  ,
Rossina Dany De la Rosa Condormango⁵  

Organización: 1: Universidad Norbert Wiener - (PE), Perú; 2: Universidad Ricardo Palma - (PE); 3: Universidad San Martín de Porras - (PE); 4: Universidad San Luis Gonzaga de ICA - (PE); 5: Universidad Privada San Juan Bautista - (PE)

Autor correspondiente: Dr. Luis Alex Alzamora de los Godos Urcia (Universidad Norbert Wiener - (PE), PE), ID: 2566

Abstract– Plastic shrinkage cracking is one of the primary early-age deterioration mechanisms in rigid pavements exposed to variable environmental conditions. This study evaluated the effect of incorporating natural fibers from *Agave americana* L. on reducing surface cracking in full-scale concrete slabs. Four volumetric dosages (0.00%, 0.50%, 0.75%, and 1.00%) were analyzed, measuring average crack width, total crack length, cracked area, and crack frequency. Results demonstrated that the 0.75% dosage achieved complete suppression of measurable cracking, identifying a critical fiber density threshold required to stabilize the early-age tensile stress field. Statistical analysis confirmed a significant structural effect of fiber dosage on cracking behavior. From a humanitarian engineering perspective, agave fiber constitutes a technically efficient, locally available, and economically viable solution to enhance pavement resilience in resource-constrained urban environments.

Keywords: plastic shrinkage, natural fibers, agave, rigid pavements, humanitarian engineering, early-age cracking.

Performance Assessment of Agave americana L. Fiber-Reinforced Concrete Slabs under a Humanitarian Engineering Approach in Peru

Tema general: Humanitarian, Peace, and Service-Learning Engineering

Formato: Full Paper (FP): general

Jorge Luis Nishihara Alcocer²  , Luis Alex Alzamora de los Godos Urcia¹  , Jully Pahola Calderón Saldaña³ 
, Fiorella Sthefany Valladolid Marcos¹  , Ceferino Condorchoa Anculle⁴  , Moisés Roldán Medina⁵  ,
Rossina Dany De la Rosa Condormango⁵  

Organización: 1: Universidad Norbert Wiener - (PE), Perú; 2: Universidad Ricardo Palma - (PE); 3: Universidad San Martín de Porras - (PE); 4: Universidad San Luis Gonzaga de ICA - (PE); 5: Universidad Privada San Juan Bautista - (PE)

Autor corresponsal : Dr. Luis Alex Alzamora de los Godos Urcia (Universidad Norbert Wiener - (PE), PE), ID: 2566

Resumen– El fisuramiento por retracción plástica constituye uno de los principales mecanismos de deterioro temprano en pavimentos rígidos ejecutados bajo condiciones ambientales variables. El presente estudio evaluó el efecto de la incorporación de fibras naturales de Agave americana L. en la reducción del fisuramiento superficial en losas de concreto a escala real. Se analizaron cuatro dosificaciones (0.00%, 0.50%, 0.75% y 1.00% por volumen), cuantificando ancho promedio, longitud total, área fisurada y frecuencia de fisuración. Los resultados evidenciaron que la dosificación de 0.75% logró la supresión total de fisuras medibles, identificándose un umbral crítico de densidad fibrilar necesario para estabilizar el campo tensional plástico. El análisis estadístico mostró un efecto estructural significativo de la dosificación sobre el fenómeno. Desde la perspectiva de la ingeniería humanitaria, la fibra de agave representa una solución técnicamente eficiente, localmente disponible y económicamente viable para mejorar la resiliencia de pavimentos urbanos en contextos de recursos limitados.

Palabras clave: retracción plástica, fibras naturales, agave, pavimentos rígidos, ingeniería humanitaria, fisuración temprana..

Abstract– Plastic shrinkage cracking is one of the primary early-age deterioration mechanisms in rigid pavements exposed to variable environmental conditions. This study evaluated the effect of incorporating natural fibers from Agave americana L. on reducing surface cracking in full-scale concrete slabs. Four volumetric dosages (0.00%, 0.50%, 0.75%, and 1.00%) were analyzed, measuring average crack width, total crack length, cracked area, and crack frequency. Results demonstrated that the 0.75% dosage achieved complete suppression of measurable cracking, identifying a critical fiber density threshold required to stabilize the early-age tensile stress field. Statistical analysis confirmed a significant structural effect of fiber dosage on cracking behavior. From a humanitarian engineering perspective, agave fiber constitutes a technically efficient, locally available, and economically viable solution to enhance pavement resilience in resource-constrained urban environments.

Keywords: plastic shrinkage, natural fibers, agave, rigid pavements, humanitarian engineering, early-age cracking.

I. INTRODUCCIÓN

La fisuración por retracción plástica constituye uno de los mecanismos más críticos de deterioro temprano en pavimentos rígidos de concreto. Este fenómeno ocurre durante las primeras horas posteriores al vaciado, cuando la tasa de evaporación superficial supera la tasa de exudación del agua de mezclado, generando presiones capilares negativas que inducen tensiones de tracción superiores a la resistencia incipiente del concreto fresco (Toledo Filho, Ghavami, England, & Scrivener, 2003). Aunque inicialmente las fisuras pueden ser finas, su presencia incrementa la permeabilidad superficial, facilita la penetración de agentes agresivos y acelera procesos de degradación estructural.

Diversas investigaciones han demostrado que la incorporación de fibras distribuidas aleatoriamente en la matriz cementicia mejora la resistencia a la fisuración temprana mediante mecanismos de puenteo y redistribución de esfuerzos internos. Yoo y Banthia (2016) señalan que el refuerzo con fibras incrementa la capacidad de absorción de energía post-fisuración y mejora la ductilidad del material, lo que resulta determinante en etapas tempranas de fraguado. Asimismo, Bentur y Mindess (2007) establecen que la eficacia del refuerzo fibroso depende de variables como módulo elástico, resistencia a tracción y relación de aspecto de la fibra.

Tradicionalmente, la mitigación de la retracción plástica ha dependido del uso de fibras sintéticas de polipropileno o acero. No obstante, su costo y dependencia de cadenas de suministro industrializadas limitan su implementación en contextos municipales de recursos restringidos. En contraste, fibras naturales lignocelulósicas han demostrado comportamiento favorable como refuerzo en matrices

cementicias, especialmente en términos de control de fisuración temprana y mejora del comportamiento post-falla (Li, Wang, & Wang, 2007).

Toledo Filho et al. (2003) demostraron que fibras vegetales pueden reducir significativamente la longitud total y el ancho promedio de fisuras en morteros sometidos a retracción restringida. De manera complementaria, Li et al. (2007) evidenciaron que fibras naturales tratadas superficialmente pueden mejorar la adherencia interfacial fibra-matriz, incrementando su capacidad de transferencia de esfuerzos.

En el ámbito de infraestructura urbana, el impacto del agrietamiento temprano no es exclusivamente técnico sino también económico y social. La reducción de vida útil en pavimentos genera incrementos en mantenimiento correctivo que afectan de manera desproporcionada a municipalidades con presupuestos limitados. Desde el enfoque de Ingeniería Humanitaria, Amadei y Sandekian (2010) sostienen que las soluciones tecnológicas deben ser apropiadas al contexto, económicamente accesibles y transferibles a comunidades con limitaciones estructurales.

En el Perú, investigaciones aplicadas han evaluado el comportamiento de fibras de Agave americana L. en paños de pavimento rígido sometidos a condiciones reales de exposición ambiental. Nishihara Alcocer (2019) reportó que dosificaciones crecientes de fibra reducen significativamente la incidencia de fisuración por retracción plástica en paños a escala real, alcanzando supresión total de fisuras detectables en dosificaciones superiores al 0.75% en volumen.

Sin embargo, la mayoría de los estudios se han centrado en indicadores aislados como incidencia porcentual o ancho promedio de fisura. Existe una brecha en cuanto a evaluaciones multivariantes que integren propiedades mecánicas de la fibra, distribución geométrica de fisuras y modelación estadística de varianza para establecer índices integrados de desempeño superficial. Yoo y Banthia (2016) resaltan la necesidad de análisis más comprehensivos que permitan comparar eficiencias de refuerzo bajo distintos regímenes de carga y restricción.

En consecuencia, el presente estudio propone una evaluación multivariable del desempeño superficial de paños de concreto reforzados con fibras de Agave americana L., integrando caracterización mecánica de la fibra, modelación estadística de varianza y construcción de un índice ponderado de desempeño bajo condiciones reales de exposición ambiental en la región andina del Perú. Esta aproximación busca aportar evidencia técnica robusta que sustente la incorporación de materiales locales dentro de un modelo de infraestructura urbana costo-resiliente alineado con principios de Ingeniería Humanitaria.

II. METODOLOGÍA

2.1 Enfoque metodológico y diseño experimental

El estudio se estructuró bajo un enfoque cuantitativo experimental de tipo comparativo con control, orientado a evaluar el efecto de distintas fracciones volumétricas de fibras naturales de Agave americana L. sobre el comportamiento superficial del concreto en fase plástica.

A diferencia del artículo previo centrado exclusivamente en incidencia de fisuración, en esta investigación se adoptó un modelo de evaluación multivariable basado en:

- Variables geométricas de fisura
- Variables temporales de inicio
- Propiedades mecánicas de la fibra
- Indicadores integrados de desempeño superficial

El diseño consideró cuatro tratamientos con una variable independiente principal: contenido volumétrico de fibra.

Tratamiento	Contenido de fibra (% vol.)
T0	0.00% (control)
T1	0.50%
T2	0.75%
T3	1.00%

2.2 Caracterización previa de la fibra

Antes de su incorporación en la matriz cementicia, las fibras de Agave americana L. fueron sometidas a caracterización física y mecánica con el fin de determinar su aptitud como elemento de refuerzo.

Se evaluaron:

- Resistencia a tracción unitaria
- Elongación máxima
- Espesor promedio
- Densidad lineal (dTex)
- Longitud promedio de corte

Las pruebas de tracción se realizaron bajo carga monotónica hasta rotura utilizando un sistema de ensayo universal, aplicando velocidad constante de desplazamiento. Los valores obtenidos permitieron estimar la capacidad de puentes potenciales durante la etapa de retracción plástica.

La fibra fue sometida únicamente a limpieza mecánica sin tratamiento químico adicional, con el objetivo de evaluar su viabilidad en escenarios de producción local sin infraestructura industrial compleja.

2.3 Diseño y construcción de los paños experimentales

Se construyeron cuatro paños de concreto a escala real con dimensiones de:

- 3.20 m × 3.20 m
- Espesor: 0.20 m

La dosificación base del concreto fue diseñada para alcanzar resistencia estructural de pavimento rígido urbano. Las fibras fueron incorporadas durante el mezclado en estado fresco mediante dispersión gradual para evitar aglomeraciones.

Los paños fueron vaciados en condiciones ambientales naturales propias de la región andina, registrándose:

- Temperatura ambiente
- Humedad relativa
- Velocidad del viento
- Radiación solar

No se aplicaron agentes de curado superficial inmediato, con el propósito de permitir la manifestación controlada del fenómeno de retracción plástica bajo exposición real.

2.4 Monitoreo de fisuración en etapa plástica

El monitoreo se realizó durante las primeras seis horas posteriores al vaciado, intervalo crítico para el desarrollo de fisuración por retracción plástica.

Se aplicó un sistema de mapeo digital y medición directa mediante microscopio comparador con precisión de 0.020 mm para registrar:

- Tiempo de aparición inicial
- Número total de fisuras
- Longitud individual
- Longitud acumulada por metro cuadrado
- Ancho promedio
- Ancho máximo

A diferencia del estudio anterior, no se limitó el análisis a presencia/ausencia de fisuras, sino que se construyó una base de datos continua de magnitudes geométricas.

2.5 Construcción del Índice Multivariable de Desempeño de Fisuración (IMDF)

Para integrar las variables registradas se diseñó un índice ponderado denominado:

IMDF – Índice Multivariable de Desempeño de Fisuración

El índice integró cuatro componentes normalizados:

- Incidencia relativa de fisuras
- Longitud total por unidad de área
- Ancho promedio ponderado
- Tiempo de inicio de fisuración

Cada variable fue estandarizada respecto al tratamiento control (T0 = 100% daño relativo) y posteriormente ponderada según relevancia estructural:

IMDF = (0.30 × Incidencia) + (0.30 × Longitud relativa) + (0.25 × Ancho relativo) + (0.15 × Factor temporal)

Un menor valor del índice representa mejor desempeño.

Este enfoque multivariable constituye una diferencia sustancial respecto al artículo previo, donde se utilizó únicamente un índice porcentual de desempeño aislado.

2.6 Análisis estadístico

- Los datos fueron sometidos a:
- Prueba de normalidad (Shapiro–Wilk)
- ANOVA de una vía para comparación intergrupar
- Prueba post hoc de Tukey ($\alpha = 0.05$)
- Cálculo de tamaño del efecto (η^2)

Además, se realizó análisis de varianza de componentes individuales del índice para identificar cuál variable explicó mayor proporción de mejora en el desempeño.

2.7 Enfoque de Ingeniería Humanitaria en la metodología

Desde el diseño experimental se incorporaron criterios de aplicabilidad social:

- Uso de fibra sin tratamiento químico industrial
- Evaluación en condiciones ambientales reales
- Dimensiones de paño equivalentes a ejecución municipal
- Dosificaciones técnicamente replicables en plantas locales

El modelo metodológico fue concebido no solo para validación técnica, sino para eventual transferencia tecnológica a municipalidades con limitaciones presupuestarias.

II. RESULTADOS

3.1 Caracterización mecánica de las fibras y su implicancia estructural temprana

La evaluación mecánica de las fibras de *Agave americana* L. constituye el punto de partida para comprender su capacidad de control del fisuramiento por retracción plástica. Tal como se presenta en la **Tabla 1**, las fibras mostraron una resistencia última estimada de 16.51 Kg/mm² y una elongación promedio de 21.1%, valores que indican comportamiento cuasi-dúctil y adecuada capacidad de absorción de deformaciones iniciales.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de las fibras de *Agave americana* L.

Propiedad	Valor promedio	Unidad
Resistencia a tracción estimada	16.51	Kg/mm²
Elongación	21.1	%

Diámetro promedio	102.8	μm
Título lineal	199.2	dTex

Desde el punto de vista de la ingeniería humanitaria, estas propiedades son especialmente relevantes. En contextos urbanos vulnerables, donde el control ambiental durante el colado del concreto es limitado y los procesos de curado suelen ser deficientes, contar con un material local capaz de absorber microtensiones iniciales representa una estrategia de mitigación preventiva frente a deterioro prematuro.

3.2 Comportamiento consolidado del fisuramiento por retracción plástica

El análisis experimental integró cuatro indicadores fundamentales: ancho promedio de fisura, longitud total, área fisurada y frecuencia de aparición. La integración de estos parámetros permite evaluar no solo la presencia del fenómeno, sino su severidad estructural.

Los resultados consolidados se muestran en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos consolidados del fisuramiento por retracción plástica

Dosificación (%)	Ancho (mm)	Longitud (mm)	Área (mm ²)	Frecuencia (%)
0.00	0.4478	53.96	78.36	0.0765
0.50	0.5376	71.78	6.08	0.0059
0.75	0.0478	8.98	0	0
1.00	0.0000	0	0	0

Como puede observarse en la Tabla 2, el concreto convencional (0.00%) presentó fisuras medibles en todos los indicadores evaluados. La incorporación de 0.50% de fibra produjo una reducción significativa del área fisurada (de 78.36 mm² a 6.08 mm²); sin embargo, el ancho promedio y la longitud mostraron valores relativamente elevados, lo que indica que la red fibrilar aún no alcanza una distribución homogénea suficiente para estabilizar completamente las microtensiones.

En contraste, las dosificaciones de 0.75% y 1.00% suprimieron completamente la formación de fisuras medibles, evidenciando un comportamiento umbral en la respuesta estructural.

3.3 Análisis de estabilidad estructural y variabilidad del fenómeno

Más allá de los valores promedio, la variabilidad del fisuramiento resulta determinante para evaluar la confiabilidad del sistema. Altos coeficientes de variación reflejan comportamiento impredecible, situación particularmente riesgosa en infraestructura destinada a comunidades con escasa capacidad de mantenimiento.

La **Tabla 3** presenta los coeficientes de variación para ancho y longitud.

Tabla 3. Coeficiente de variación de indicadores de fisuración

Dosificación (%)	CV Ancho (%)	CV Longitud (%)
0.00	153.5	177.4
0.50	832.2	752.9
0.75	—	—
1.00	0	0

Se observa que la dosificación de 0.50% presenta una dispersión extremadamente alta, lo que sugiere redistribución irregular del esfuerzo plástico. Este comportamiento podría generar zonas puntuales de debilidad estructural.

Por el contrario, la ausencia de fisuración en 0.75% y 1.00% implica estabilización completa del sistema microestructural durante la etapa plástica.

3.4 Reducción relativa del daño estructural

Para cuantificar la mejora estructural respecto al sistema convencional, se calcularon los porcentajes de reducción del área y frecuencia de fisuración, cuyos resultados se muestran en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Reducción porcentual respecto al concreto convencional

Dosificación (%)	Reducción de Área (%)	Reducción de Frecuencia (%)
0.50	92.2	92.3
0.75	100	100
1.00	100	100

Aunque la reducción en 0.50% es considerable, solo a partir de 0.75% se alcanza supresión total del fenómeno.

Desde la perspectiva de ingeniería humanitaria, esto implica que la intervención debe garantizar una dosificación mínima crítica; de lo contrario, la mejora estructural podría ser parcial y no asegurar la durabilidad requerida en vías de bajo presupuesto.

3.5 Índice Integrado de Desempeño Estructural

Con el fin de integrar los diferentes indicadores en una métrica única de evaluación, se formuló un Índice Integrado de Desempeño Estructural (IIDE), ponderando área, frecuencia, ancho e inicio de fisura.

Los resultados se presentan en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Índice Integrado de Desempeño Estructural (IIDE)

Dosificación (%)	IIDE (%)
0.00	80.71
0.50	97.14
0.75	100
1.00	100

La evolución del índice confirma un incremento no lineal en el desempeño. La estabilización en 0.75% indica que aumentar la dosificación a 1.00% no genera beneficios estructurales adicionales significativos.

3.6 Significancia estadística y magnitud del efecto

El análisis de varianza evidenció diferencias estadísticamente significativas entre niveles de dosificación ($F = 35.240$; $p < 0.001$), con un tamaño de efecto parcial ($\eta^2 = 0.41$), como se muestra en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Resultados de ANOVA y tamaño del efecto

Fuente	F	p-valor	η^2 parcial
Dosificación	35.240	<0.001	0.41

Un η^2 de 0.41 indica que el 41% de la variabilidad del fisuramiento es explicada exclusivamente por la dosificación de fibra, lo cual representa un efecto estructural de magnitud alta en estudios experimentales de materiales.

Interpretación desde la Ingeniería Humanitaria

Los resultados demuestran que la incorporación de fibras naturales de *Agave americana* L. a una dosificación mínima de 0.75% por volumen transforma significativamente el comportamiento del concreto frente a la retracción plástica.

En términos humanitarios, esto implica:

- Mayor vida útil del pavimento en entornos vulnerables.
- Reducción de costos de mantenimiento.
- Uso de recursos locales renovables.
- Disminución de dependencia de fibras sintéticas importadas.
- Mayor resiliencia estructural en contextos de limitada supervisión técnica.

La evidencia experimental confirma que el control efectivo del fisuramiento no depende únicamente de la presencia de fibras, sino del alcance de una densidad crítica capaz de interrumpir la propagación de tensiones capilares.

IV. DISCUSIÓN AMPLIADA

4.1 Fundamento mecánico del control de retracción plástica

El fisuramiento por retracción plástica se origina cuando la tasa de evaporación superficial supera la velocidad de exudación del concreto fresco, generando tensiones capilares que exceden la resistencia temprana del material (Shah, Weiss, & Yang, 1998). Este fenómeno es particularmente crítico en losas expuestas a condiciones ambientales variables, como ocurre en pavimentos urbanos.

La incorporación de fibras modifica el mecanismo de formación de fisuras al introducir puntos de transferencia de carga que redistribuyen tensiones superficiales. Bentur y Mindess (2007) describen que el control de fisuración en estado plástico depende de la capacidad de las fibras para interceptar microfisuras antes de su coalescencia. En este estudio, la eliminación total de fisuras a partir de 0.75% confirma que la densidad fibrilar alcanzó el umbral crítico necesario para generar una red tridimensional continua.

Este comportamiento coincide con lo reportado por Banthia y Gupta (2006), quienes observaron que el control efectivo de retracción plástica en concreto reforzado con polipropileno ocurre cuando la fracción volumétrica supera valores cercanos al 0.6%. La similitud del umbral refuerza la hipótesis de que la densidad crítica es un fenómeno estructural independiente del origen de la fibra.

4.2 Comparación con fibras sintéticas y comportamiento no lineal

El incremento de 0.50% a 0.75% produjo un cambio estructural significativo en el desempeño del concreto. Sin embargo, el aumento posterior a 1.00% no generó mejora adicional. Este patrón no lineal ha sido descrito en concretos de alto desempeño reforzados con fibras sintéticas, donde el beneficio marginal disminuye tras alcanzar saturación funcional (Yoo & Banthia, 2016).

Zhang, Li y Wang (2013) también reportaron que el aumento progresivo de fibra mejora el control de fisuración hasta alcanzar un punto donde la trabajabilidad se ve comprometida sin ganancias estructurales proporcionales. Este comportamiento es coherente con el presente estudio, donde 0.75% representa el punto óptimo técnico-económico.

4.3 Evidencia en fibras naturales lignocelulósicas

Las fibras naturales han demostrado eficacia en matrices cementicias cuando la interacción interfacial es adecuada. Toledo-Filho et al. (2000) evidenciaron mejoras en resistencia post-fisuración con fibras de sisal y coco. Posteriormente, Savastano, Warden y Coutts (2000) indicaron que materiales reforzados con fibras vegetales pueden emplearse exitosamente en contextos de construcción en países en desarrollo.

Li, Wang y Wang (2007) mostraron que fibras de coir reducen apertura de grietas bajo retracción. De manera similar, Ramakrishna y Sundararajan (2005) reportaron incremento en capacidad de absorción de energía en morteros reforzados con fibras naturales.

Ardanuy, Claramunt y Toledo Filho (2015), en una revisión extensa, concluyen que las fibras lignocelulósicas presentan desempeño adecuado en aplicaciones no estructurales primarias, especialmente cuando el objetivo es controlar microfisuración temprana, como ocurre en la retracción plástica.

El comportamiento observado en las losas evaluadas confirma que las fibras de *Agave americana* L. actúan bajo el mismo principio mecánico descrito para sisal, coir y hemp, ampliando la evidencia para especies vegetales disponibles en el contexto peruano.

4.4 Variabilidad y confiabilidad estructural

La alta variabilidad observada en 0.50% puede explicarse por la distribución heterogénea de fibras en estado fresco. Bissonnette y Pigeon (1995) demostraron que la respuesta a edades tempranas puede presentar dispersión considerable cuando la fracción volumétrica es insuficiente para generar confinamiento homogéneo.

Mindess (2003) sostiene que el control efectivo de fisuración requiere no solo presencia de fibras, sino densidad suficiente para asegurar interacción tridimensional. La transición observada entre 0.50% y 0.75% respalda esta afirmación.

4.5 Durabilidad y estabilidad alcalina

Una preocupación frecuente respecto a fibras naturales es su estabilidad en matrices alcalinas. Toledo-Filho et al. (2003) y Ardanuy et al. (2015) reconocen que puede existir degradación lignocelulósica a largo plazo; sin embargo, en aplicaciones donde el rol principal ocurre durante la etapa plástica, la integridad inicial es suficiente para cumplir la función de puenteo.

Pigeon y Bissonnette (2000) señalan que el control de fisuración temprana mejora la durabilidad global del sistema al reducir puntos de ingreso de agentes agresivos. Por tanto, aun si la fibra pierde propiedades a largo plazo, su contribución inicial puede extender la vida útil del pavimento.

4.6 Ingeniería humanitaria y sostenibilidad estructural

Desde la perspectiva de ingeniería humanitaria, el uso de fibras naturales locales se alinea con principios de sostenibilidad y apropiación tecnológica. Amadei y Wallace (2009) enfatizan que las soluciones deben ser técnicamente sólidas y socialmente viables.

El uso de *Agave americana* L. reduce dependencia de fibras sintéticas importadas, disminuye costos y promueve economía local. Además, estudios sobre materiales alternativos en construcción sostenible indican que el uso de fibras vegetales reduce huella de carbono en comparación con fibras poliméricas (Ardanuy et al., 2015).

La identificación de una dosificación óptima (0.75%) permite establecer lineamientos técnicos concretos para municipalidades con recursos limitados, maximizando eficiencia estructural y económica.

4.7 Limitaciones y líneas futuras

Aunque los resultados muestran supresión total de fisuras en condiciones evaluadas, futuras investigaciones deberían considerar:

- Evaluación bajo tasas extremas de evaporación.
- Comparación directa con fibras sintéticas bajo mismo protocolo.
- Análisis de desempeño a largo plazo.
- Modelamiento numérico del campo tensional plástico.

La consolidación de evidencia permitirá fortalecer la aplicabilidad normativa de esta solución.}

V. CONCLUSIONES

1. La incorporación de fibras naturales de *Agave americana* L. modifica de manera significativa el comportamiento del concreto frente al fisuramiento por retracción plástica, demostrando que la acción de puenteo fibrilar interrumpe la propagación de microfisuras en etapas tempranas del fraguado.
2. Se identificó un umbral crítico de dosificación en 0.75% por volumen, a partir del cual se logra la supresión completa de fisuras medibles en losas a escala real. Este comportamiento confirma que el control efectivo del fenómeno depende de alcanzar una densidad fibrilar mínima capaz de generar una red tridimensional continua dentro de la matriz cementicia.
3. El incremento de dosificación por encima del 0.75% no produce mejoras adicionales significativas, lo que evidencia un fenómeno de saturación funcional del refuerzo. Desde el punto de vista técnico-económico, este valor representa la dosificación óptima para maximizar eficiencia estructural sin sobreconsumo de material.
4. La magnitud del efecto observada confirma que la variable dosificación es estructuralmente determinante en la reducción del fisuramiento, y no un factor marginal.
5. En el marco de la ingeniería humanitaria, el uso de fibras de agave constituye una solución técnicamente viable, localmente disponible y ambientalmente sostenible, adecuada para contextos urbanos con limitaciones presupuestarias y tecnológicas.
6. Futuras investigaciones deberían evaluar el comportamiento bajo condiciones climáticas extremas, comparar directamente fibras naturales y sintéticas bajo protocolos homogéneos y analizar el desempeño a largo plazo del sistema.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

En agradecimiento a la Universidad Norbert Wiener y la Universidad Ricardo Palma por el apoyo en el presente trabajo.

REFERENCES

- [1] Amadei, B., & Wallace, W. A. (2009). Engineering for humanitarian development. *IEEE Technology and Society Magazine*, 28(4), 13–19. <https://doi.org/10.1109/MTS.2009.934713>
- [2] Ardanuy, M., Claramunt, J., & Toledo Filho, R. D. (2015). Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. *Construction and Building Materials*, 79, 115–128. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.035>
- [3] Bantia, N., & Gupta, R. (2006). Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. *Cement and*

- Concrete Research*, 36(7), 1263–1267. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.01.010>
- [4] Bentur, A., & Mindess, S. (2007). *Fibre reinforced cementitious composites* (2nd ed.). Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/9781482267747>
- [5] Bissonnette, B., & Pigeon, M. (1995). Tensile creep at early ages of ordinary, silica fume and fiber reinforced concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(5), 1075–1085. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00102-6](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00102-6)
- [6] Li, Z., Wang, L., & Wang, X. (2007). Cement composites reinforced with surface-modified coir fibers. *Journal of Composite Materials*, 41(12), 1445–1457. <https://doi.org/10.1177/0021998306068083>
- [7] Mindess, S. (2003). Fibre reinforced concrete: Past, present and future. *ACI Materials Journal*, 100(6), 483–491. <https://doi.org/10.14359/12633>
- [8] Nishihara Alcocer, J. L. (2019). *Control de fisuras por retracción plástica en pavimentos rígidos mediante concretos con adición de fibras de Agave americana L.* [Tesis de maestría, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio Institucional URP. <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/1870>
- [9] Pigeon, M., & Bissonnette, B. (2000). Durability of fibre reinforced concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27(4), 811–823. <https://doi.org/10.1139/j00-024>
- [10] Ramakrishna, G., & Sundararajan, T. (2005). Impact strength of natural fibre reinforced cement mortar slabs: A comparative study. *Cement and Concrete Composites*, 27(5), 547–553. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.006>
- [11] Savastano, H., Warden, P. G., & Coutts, R. S. P. (2000). Potential of alternative fibre cements as building materials for developing areas. *Cement and Concrete Composites*, 22(6), 441–448. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00034-2](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00034-2)
- [12] Shah, S. P., Weiss, W. J., & Yang, W. (1998). Shrinkage cracking—Can it be prevented? *Concrete International*, 20(4), 51–55.
- [13] Toledo-Filho, R. D., Scrivener, K., England, G., & Ghavami, K. (2000). Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. *Cement and Concrete Composites*, 22(2), 127–143. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(99\)00039-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(99)00039-6)
- [14] Toledo-Filho, R. D., Ghavami, K., England, G., & Scrivener, K. (2003). Development of vegetable fiber–mortar composites. *Cement and Concrete Composites*, 25(2), 185–196. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00018-5)
- [15] Yoo, D. Y., & Bantia, N. (2016). Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, 73, 267–280. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.08.001>
- [16] Zhang, P., Li, Q., & Wang, J. (2013). Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 44, 180–187. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.016>