Constructability of HPMC-Modified Concrete for Rigid Pavements: Experimental Diagnosis and Sustainable Engineering Venture Proposal

FULL PAPER (FP) — LEIRD 2026 | Línea: Innovación y emprendimiento sostenibles

Abstract: This original quantitative reanalysis examines the fresh-state results of a completed civil-engineering research to determine how hydroxypropyl methylcellulose (HPMC) changes the constructability window of concrete for rigid pavements. Four mixtures containing 0.00%, 0.30%, 0.60%, and 1.00% HPMC by cement mass were compared under constant constituent proportions. The diagnosis integrates slump, temperature, air content, bleeding, and initial and final setting times. Slump decreased monotonically from 3.00 to 1.25 in; temperature remained between 25.2 and 25.7 °C; air rose slightly from 1.5% to 1.8%; and the 1.00% mixture reduced bleeding from 23 to 8 mL (0.32% to 0.11%). Initial and final setting times increased from 279/394 to 327/486 min. These findings indicate a constructability trade-off: HPMC was associated with lower bleeding and later setting, without direct measurement of cohesion or workability retention, while reducing conventional slump. Mechanical results are used only as a secondary acceptance constraint and are not independently evaluated in this fresh-state reanalysis. After the empirical discussion, the article proposes a nonvalidated sustainable engineering venture that combines pre-dosed HPMC kits, field quality control, and technical assistance for municipal pavement projects.

Keywords—*HPMC; constructability; fresh concrete; rigid pavement; sustainable entrepreneurship.*

Constructibilidad del concreto modificado con HPMC para pavimentos rígidos: diagnóstico experimental y propuesta de emprendimiento sostenible de ingeniería

FULL PAPER (FP) — LEIRD 2026 | Línea: Innovación y emprendimiento sostenibles

Resumen:** Este reanálisis cuantitativo original examina los resultados en estado fresco de una investigación concluida de ingeniería civil para determinar cómo la hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC) modifica propiedades vinculadas con la constructibilidad del concreto para pavimentos rígidos. Se compararon cuatro mezclas con 0,00 %, 0,30 %, 0,60 % y 1,00 % de HPMC respecto de la masa de cemento, manteniendo constantes las proporciones de los demás componentes según el registro del estudio. El diagnóstico integra asentamiento, temperatura, contenido de aire, exudación y tiempos de fraguado inicial y final. El asentamiento disminuyó de 3,00 a 1,25 pulgadas; la temperatura osciló entre 25,2 y 25,7 °C; el aire aumentó de 1,5 % a 1,8 %; y la mezcla con 1,00 % redujo la exudación de 23 a 8 mL (de 0,32 % a 0,11 %). Los tiempos de fraguado inicial y final pasaron de 279/394 a 327/486 minutos. Los resultados muestran una compensación entre menor asentamiento, menor exudación y fraguado más tardío, sin demostrar conservación de trabajabilidad ni mayor cohesión mediante mediciones directas. El desempeño endurecido se considera una restricción de aceptación futura, no un resultado validado por este reanálisis. Después de la discusión empírica se propone, sin validación técnica en obra, económica, ambiental o comercial, un emprendimiento que integraría kits predosificados de HPMC, control de calidad en campo y asistencia técnica para proyectos municipales de pavimentación.

***Palabras clave:** HPMC; constructibilidad; concreto fresco; pavimentos rígidos; emprendimiento sostenible.*

I. INTRODUCCIÓN

La colocación de concreto en pavimentos rígidos exige compatibilizar estabilidad, transporte, descarga, extendido, compactación, acabado y fraguado. Una mezcla puede alcanzar resistencia adecuada y, aun así, presentar dificultades operativas si pierde agua, segrega o cambia demasiado rápido durante la jornada. Por ello, la constructibilidad no equivale a resistencia: describe si el material puede ejecutarse de manera controlable con los recursos, tiempos y equipos disponibles [1], [2].

Los éteres de celulosa son polímeros solubles en agua capaces de modificar la viscosidad, la retención hídrica y la cinética de hidratación de sistemas cementicios. La HPMC incrementa la viscosidad de la fase acuosa y limita la migración del agua; estos mecanismos pueden reducir exudación y segregación, pero también disminuir el asentamiento e incrementar aire atrapado [3]–[6]. La dirección y magnitud del efecto dependen de la estructura química, viscosidad del producto, dosis, relación agua/cemento, cemento y procedimiento de dispersión. En consecuencia, "más HPMC" no puede interpretarse automáticamente como "mejor concreto".

El pavimento incorpora una exigencia particular. La mezcla debe conservar una geometría estable después del extendido, pero necesita suficiente movilidad para ser descargada, consolidada y texturizada. Un asentamiento menor puede ser conveniente para pavimentación con equipos apropiados; en cambio, puede aumentar el esfuerzo de compactación cuando la obra dispone de medios limitados. De modo similar, prolongar el fraguado puede ampliar la ventana de transporte y acabado, aunque también retrasa actividades posteriores y eleva la exposición a cambios ambientales. Por ello, los resultados deben leerse como compensaciones operativas y no como una jerarquía simple [1], [7].

La investigación produjo un conjunto experimental amplio: propiedades frescas y mecánicas de concreto patrón y mezclas con 0,30%, 0,60% y 1,00% de HPMC. La tesis de origen abordó propiedades mecánicas —compresión, flexión y módulo de elasticidad— dentro del mismo programa experimental [15]. El presente trabajo formula otra pregunta, emplea otras variables principales y genera productos analíticos diferentes. Su unidad de interés es la ventana de constructibilidad antes del endurecimiento; las resistencias no se vuelven a optimizar ni constituyen el desenlace principal.

La brecha aplicada consiste en traducir resultados de laboratorio en criterios de decisión para obra. Reportar por separado asentamiento, exudación y fraguado no indica a un contratista qué riesgo disminuye, cuál aumenta ni qué control debe incorporarse. Se requiere una lectura integrada que vincule cada dosificación con bombeabilidad o descarga, compactación, estabilidad, acabado y programación. Esta integración también abre un espacio de emprendimiento sostenible: servicios técnicos que reduzcan reprocesos y desperdicio mediante dosificación trazable y control de recepción, sin afirmar beneficios ambientales o económicos aún no medidos.

El objetivo fue diagnosticar el efecto de cuatro dosificaciones de HPMC sobre las propiedades frescas y la ventana de constructibilidad del concreto para pavimentos rígidos. Los objetivos específicos fueron: a) comparar asentamiento, temperatura y aire; b) examinar el control de exudación; c) determinar la variación del fraguado inicial y final; y d) construir una matriz de implicaciones operativas. Posteriormente, fuera de los resultados empíricos, se formuló una propuesta de emprendimiento sostenible de ingeniería para pilotaje futuro.

A. Constructibilidad como problema de ingeniería

En este estudio, la constructibilidad se emplea en un sentido operacional y acotado. No se refiere a la gestión integral de un proyecto, sino a la compatibilidad entre el comportamiento fresco del material y las tareas necesarias para ejecutar un pavimento. Incluye la posibilidad de dosificar, transportar, descargar, distribuir, consolidar, nivelar y texturizar antes de que el fraguado restrinja esas operaciones. Esta definición permite analizar propiedades que se midieron directamente sin atribuirle indicadores de productividad que no fueron levantados.

Las variables forman una cadena y no una lista independiente. El asentamiento condiciona la facilidad inicial de movimiento; el aire y la temperatura describen el estado de recepción; la exudación expresa estabilidad durante la espera; y el fraguado identifica transiciones de endurecimiento, sin medir por sí solo cuánto tiempo permanece trabajable la mezcla. Un cambio favorable en un eslabón puede generar una carga en otro. Reducir la migración de agua puede estabilizar la superficie, pero el aumento de viscosidad asociado puede demandar más energía de consolidación. Ampliar el tiempo abierto puede absorber demoras de transporte, pero también prolongar la protección del paño.

Esta lógica multivariable es relevante para emprendimiento de ingeniería porque el valor no reside únicamente en suministrar un aditivo. El cliente necesita reducir la incertidumbre entre la fórmula de laboratorio y el comportamiento en campo. El servicio potencial debe convertir mediciones dispersas en decisiones reproducibles: cuánto dosificar, cómo dispersar, qué verificar a la recepción y cuándo detener o corregir el proceso. Sin este componente, la venta de HPMC trasladaría el riesgo técnico al contratista y podría incentivar ajustes improvisados.

B. Diferencia entre consistencia y trabajabilidad

La investigación describió la disminución del asentamiento como una mejora por mayor cohesión. Para el presente análisis se adoptó una formulación más prudente. El cono de Abrams mide consistencia bajo un procedimiento normalizado, no toda la trabajabilidad. Una mezcla con menor asentamiento puede conservar cohesión y responder adecuadamente a vibración; también puede resultar difícil de colocar con recursos limitados. Por ello, el resultado se reporta como reducción de movilidad medida y no como mejora universal. La trabajabilidad completa requeriría ensayos reológicos, pérdida temporal de asentamiento y observación de ejecución.

La misma cautela se aplica al contenido de aire. Un incremento de 0,3 puntos porcentuales es pequeño dentro del conjunto observado, pero no permite inferir una mejora de la durabilidad porque no se documentó un sistema de aire incorporado intencionalmente ni la distribución de vacíos. En concreto para pavimentos, este parámetro debe evaluarse según la exposición, densidad, resistencia y método de compactación. El artículo lo trata como una señal de control del proceso, no como un beneficio demostrado.

II. MÉTODO

A. Diseño y alcance

Se efectuó un análisis secundario cuantitativo del experimento desarrollado en la investigación concluida. El estudio original fue aplicado, experimental y comparativo, con manipulación del porcentaje de HPMC y concreto sin polímero como control. El reanálisis es original por su pregunta y por el modo de integrar los ensayos de estado fresco; no implica una nueva campaña experimental ni modifica los registros fuente. La fuente primaria es la tesis de Segovia Contreras [15].

B. Mezclas y variable independiente

La variable independiente fue la adición de HPMC respecto de la masa de cemento: 0,00%, 0,30%, 0,60% y 1,00%. La mezcla patrón y las modificadas mantuvieron constantes cemento Portland Tipo I, agregados, agua y relación agua/cemento. El polímero se incorporó mediante mezclado controlado para limitar grumos y concentraciones locales. Esta condición es importante porque la dispersión heterogénea puede alterar reología y repetibilidad.

C. Variables y ensayos

Se definieron cinco resultados primarios: asentamiento en pulgadas, temperatura del concreto fresco en °C, contenido de aire en porcentaje, exudación en volumen y porcentaje, y tiempos de fraguado inicial y final en minutos. El asentamiento se obtuvo mediante cono de Abrams; la temperatura y el aire se midieron inmediatamente después del mezclado; la exudación representó el agua liberada en el periodo de observación; y el fraguado se determinó por resistencia a la penetración. Los procedimientos fueron los empleados y documentados conforme a normas técnicas peruanas y métodos ASTM equivalentes [8]–[11]. Las ediciones efectivamente aplicadas de las normas deben cotejarse con las hojas de laboratorio; la identificación del método no acredita por sí sola cumplimiento de una edición determinada.

TABLA I. VARIABLES DEL REANÁLISIS Y SIGNIFICADO CONSTRUCTIVO

Variable	Lectura directa	Riesgo/decisión de obra
Asentamiento	Movilidad bajo ensayo normalizado	Descarga, extendido y demanda de consolidación
Temperatura	Condición térmica al mezclar	Comparabilidad y velocidad potencial de hidratación
Aire	Volumen de vacíos medido	Cohesión, densidad y control de compactación
Exudación	Agua que migra a superficie	Segregación, acabado y debilidad superficial
Fraguado	Ventana inicial y final	Transporte, colocación, texturizado y protección

D. Estrategia analítica

Se realizó comparación descriptiva por dosis, cálculo de diferencias absolutas y relativas frente al patrón y examen de monotonicidad. No se aplicó inferencia estadística a las propiedades frescas porque la fuente disponible reportó valores consolidados y no documentó réplicas individuales suficientes para estimar variabilidad. Por la misma razón, el manuscrito no presenta p-valores, intervalos de confianza ni una “dosis óptima” basada exclusivamente en estos ensayos. Esta decisión evita pseudoprecisión.

La interpretación integrada siguió tres reglas. Primero, una reducción del asentamiento no se etiquetó por sí sola como mejora o deterioro; se interpretó considerando la cohesión y el método de colocación como aspectos pendientes de evaluación. Segunda, una prolongación del fraguado se interpretó como retraso de las transiciones de endurecimiento, no como medición de tiempo trabajable y también como posible demora operativa. Tercera, la reducción de exudación se consideró favorable para estabilidad, pero no sustituyó ensayos de durabilidad. Las conclusiones se limitaron a las variables medidas.

E. Delimitación respecto de los resultados mecánicos de la tesis

Se elaboró una matriz de exclusión antes de redactar. Se excluyeron como aporte principal la optimización de la resistencia a compresión, la resistencia a flexión, el módulo de elasticidad, el umbral mecánico como desenlaces de la

investigación de origen [15]. El reanálisis formula un objetivo y una estructura argumental centrados en el estado fresco, sin presentar conclusiones mecánicas como resultados nuevos. El comportamiento endurecido se menciona únicamente como restricción de aceptación: una solución constructible no puede seleccionarse ignorando su desempeño posterior.

TABLA II. DELIMITACIÓN DEL REANÁLISIS FRENTE AL DESEMPEÑO MECÁNICO

Elemento	LACCEI 2026	LEIRD 2026
Pregunta	Optimización mecánica	Ventana de constructibilidad
Resultados principales	Compresión, flexión, elasticidad	asentamiento, aire, temperatura, exudación, fraguado
Marco	Ingeniería humanitaria	Innovación y emprendimiento sostenibles
Aporte	Desempeño estructural	Control de ejecución + propuesta empresarial
Propuesta	No central	Servicio no validado posterior al IMRyD

F. Trazabilidad del diseño experimental

La unidad de comparación fue cada diseño de mezcla y no cada probeta endurecida. Los cuatro tratamientos compartieron una resistencia de diseño de 280 kg/cm² y la misma matriz de materiales; la modificación deliberada fue la masa de HPMC. Esta equivalencia permitió interpretar los cambios frescos como una respuesta asociada a la incorporación del polímero dentro de las condiciones ensayadas. No obstante, al no disponer de una aleatorización documentada del orden de amasado ni de réplicas individuales para todas las mediciones frescas, se evitó presentar causalidad estadística más allá del experimento.

La secuencia analítica reconstruyó tres momentos de ejecución. El primero fue la recepción inmediata, representada por temperatura, aire y asentamiento. El segundo fue la estabilidad antes del endurecimiento, representada por volumen y porcentaje de exudación. El tercero fue la ventana temporal de operación, representada por los fraguados inicial y final. Esta organización es distinta de agrupar los datos por propiedad mecánica: permite seguir el material desde la descarga potencial hasta el cierre de las operaciones de acabado.

G. Cálculos derivados y control de interpretación

Para cada dosis se calculó el cambio relativo del asentamiento respecto del patrón, la demora absoluta de los fraguados, la duración del intervalo entre fraguado inicial y final y, para los extremos con datos recuperables, la reducción de exudación. También se construyeron índices descriptivos con base 100 para comparar direcciones de cambio sin combinar unidades incompatibles. Estos índices no son una escala validada ni una función de deseabilidad; únicamente hacen visible la compensación entre movilidad, estabilidad hídrica y tiempo disponible.

Los datos fueron contrastados con el texto, tablas y figuras de la investigación. Cuando dos pasajes presentaron cifras incompatibles, se conservó el valor respaldado por la tabla y por la operación aritmética correspondiente, y se declaró la discrepancia. No se interpolaron los valores intermedios de exudación que no pudieron recuperarse con certeza. Esta regla es especialmente importante porque una curva visual no autoriza inventar observaciones numéricas.

TABLA III. REGLAS DE REANÁLISIS Y SALVAGUARDA DE VALIDEZ

Decisión	Aplicación	Razón
Unidad analítica	Diseño de mezcla por dosis	Evita confundir probetas mecánicas con ensayos frescos
Comparación	Cambio frente a 0,00%	Mantiene un referente común
Inferencia	Descriptiva, sin p-valores	No hay réplicas frescas completas recuperables
Dato ausente	No interpolar	Preserva fidelidad a la tesis
Óptimo	No declarar universal	Depende de equipo y criterio de obra
Mecánica	Solo restricción secundaria	Evita repetir el artículo LACCEI

III. RESULTADOS

A. Asentamiento, temperatura y aire

El asentamiento disminuyó de forma monotónica al aumentar HPMC: 3,00 pulgadas en el patrón, 2,25 con 0,30%, 1,50 con 0,60% y 1,25 con 1,00%. La diferencia entre extremos fue 1,75 pulgadas, equivalente a 58,33% respecto del control. El resultado confirma una modificación reológica intensa aun cuando la cantidad de agua se mantuvo. El dato no prueba pérdida proporcional de trabajabilidad, porque el asentamiento mide movilidad bajo una geometría específica y no captura por sí solo cohesión, pegajosidad, respuesta a vibración o capacidad de acabado.

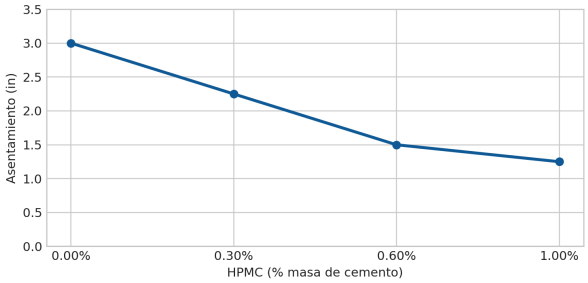


Fig. 1. Asentamiento del concreto fresco según dosificación de HPMC.

La temperatura se mantuvo prácticamente estable: 25,5, 25,2, 25,7 y 25,7 °C. La amplitud total fue 0,5 °C y no presentó tendencia dosis-respuesta consistente. Por tanto, no se observa una tendencia térmica que explique por sí sola las diferencias de asentamiento y fraguado; ello no excluye otras fuentes de variación entre lotes. El contenido de aire aumentó gradualmente de 1,5% a 1,8%; la diferencia absoluta fue 0,3 puntos porcentuales. Aunque pequeña, esta dirección concuerda con la capacidad de algunos éteres de celulosa de estabilizar aire y exige control durante compactación [4], [5].

TABLA IV. PROPIEDADES INMEDIATAS DEL CONCRETO FRESCO

HPMC	asentamiento (in)	Cambio vs. control	Temp. (°C)	Aire (%)
0,00%	3,00	Referencia	25,5	1,5
0,30%	2,25	−25.0%	25,2	1,6
0,60%	1,50	−50.0%	25,7	1,7
1,00%	1,25	−58.3%	25,7	1,8

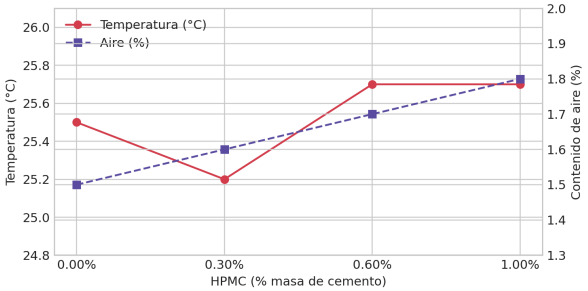


Fig. 2. Temperatura y contenido de aire. Las escalas verticales son independientes.

En términos constructivos, la serie muestra una transición desde una mezcla más móvil hacia mezclas de menor revenimiento, cuya cohesión requiere comprobación específica. La implicación no es recomendar automáticamente 1,00%, sino exigir que la selección considere equipo de pavimentación, tiempo de descarga, capacidad de vibración y geometría del paño. Una especificación basada solo en asentamiento podría inducir la adición no controlada de agua en obra, anulando el diseño y creando variabilidad.

B. Control de exudación

La exudación descendió de 23 mL (0,32%) en el concreto patrón a 8 mL (0,11%) con 1,00% de HPMC. La reducción absoluta fue 15 mL y 0,21 puntos porcentuales; la reducción relativa del volumen fue 65,22%, mientras la reducción calculada con los porcentajes redondeados fue 65,63%. La dirección fue coherente con la retención de agua y el aumento de viscosidad atribuidos a HPMC.

TABLA V. EXTREMOS VERIFICABLES DEL ENSAYO DE EXUDACIÓN

HPMC	Volumen	Porcentaje	Diferencia vs. patrón
0,00%	23 mL	0,32%	Referencia
1,00%	8 mL	0,11%	−15 mL; −0.21 pp

El control de exudación tiene relevancia directa para la superficie del pavimento. Menor migración de agua reduce la formación de una película superficial y la separación local de sólidos durante el periodo previo al fraguado. Sin embargo, el ensayo no permite afirmar por sí mismo mayor resistencia al desgaste, menor permeabilidad o mayor vida útil. Tales consecuencias requieren ensayos específicos. El hallazgo empírico válido es más acotado: con la formulación y condiciones estudiadas, 1,00% de HPMC retuvo mayor cantidad de agua dentro de la mezcla que el control.

C. Ventana de fraguado

El fraguado inicial aumentó progresivamente de 279 a 298, 313 y 327 min. Frente al patrón, los incrementos fueron 19, 34 y 48 min. El fraguado final pasó de 394 a 435, 484 y 486 min, con incrementos de 41, 90 y 92 min. La respuesta final se aproximó a una meseta entre 0,60% y 1,00%, pues solo aumentó 2 min, mientras el fraguado inicial continuó desplazándose 14 min. Esto sugiere que el efecto de la dosis no fue idéntico en ambas etapas.

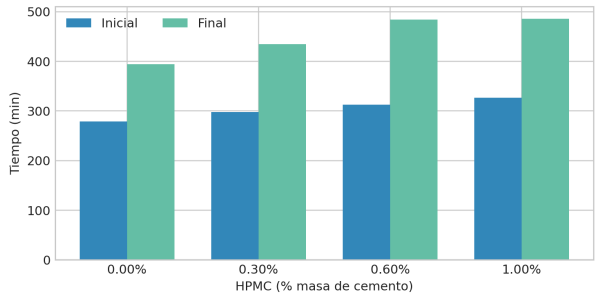


Fig. 3. Tiempo de fraguado inicial y final según HPMC.

TABLA VI. TIEMPOS DE FRAGUADO Y AMPLIACIÓN FRENTE AL CONTROL

HPMC	Inicial (min)	Δ inicial	Final (min)	Δ final
0,00%	279	0	394	0
0,30%	298	+19	435	+41
0,60%	313	+34	484	+90
1,00%	327	+48	486	+92

La ampliación podría ofrecer más tiempo para transporte, colocación, vibración, nivelación y texturizado, especialmente cuando existen distancias o secuencias complejas. El mismo desplazamiento puede prolongar el periodo durante el cual el material necesita protección y vigilancia. La decisión requiere combinar el tiempo abierto deseado con temperatura ambiente, viento, logística y disponibilidad de personal. Esta posibilidad no fue medida: el fraguado no sustituye ensayos de pérdida de asentamiento ni observaciones de colocación y acabado.

D. Índice cualitativo de constructibilidad

Los cinco resultados se integraron en una matriz de compensaciones. El control presentó la mayor movilidad y la mayor exudación, con la ventana de fraguado más corta. Las dosis de 0,30% y 0,60% ocuparon posiciones intermedias. La dosis de 1,00% combinó el menor asentamiento, la menor exudación verificada, el fraguado inicial más tardío, temperatura estable y el mayor contenido de aire de la serie. Por tanto, ninguna mezcla dominó en todas las dimensiones: la elección depende del sistema de colocación y del riesgo prioritario.

TABLA VII. PERFIL CONSTRUCTIVO DERIVADO DE LOS RESULTADOS

Dosis	Movilidad	Estabilidad hídrica	Tiempo abierto	Control crítico
0,00%	Mayor	Menor	Menor	Exudación y rapidez de ejecución
0,30%	Media-alta	Intermedia*	Intermedio	Uniformidad y asentamiento
0,60%	Media-baja	Intermedia*	Alto	Consolidación y programación
1,00%	Menor	Mayor	Máximo	Dosificación, vibración y no añadir agua

*Se señala reducción progresiva, pero el texto exportado no permitió recuperar valores numéricos intermedios; se conserva una clasificación ordinal.

El hallazgo integrador es una ventana de constructibilidad desplazada. La HPMC no produjo únicamente «más» o «menos» trabajabilidad; modificó el modo en que la mezcla conserva agua, fluye y alcanza las transiciones de fraguado. El menor asentamiento coexistió con mayor tiempo antes del fraguado y menor exudación. Esta combinación impide evaluar la mezcla mediante un solo parámetro. En obra, el riesgo principal sería corregir el menor asentamiento mediante la adición de agua sin autorización, porque se perdería el equilibrio ensayado.

E. Compatibilidad secundaria con el estado endurecido

Para delimitar el reanálisis respecto de la tesis de origen, los resultados mecánicos no se reproducen como series, modelos ni pruebas de optimización. Solo se aplicó una regla de compatibilidad: una dosis constructivamente viable debe conservar desempeño endurecido aceptable. Se reportó que 0,30% y 0,60% no mejoraron de forma consistente la compresión respecto del patrón, mientras 1,00% presentó ganancias en compresión y flexión y una reducción del módulo de elasticidad según la tabla original. Esta

información muestra que el balance fresco-endurecido es no lineal y que una dosis intermedia no necesariamente constituye el mejor compromiso. Estas descripciones secundarias no sustituyen la comprobación de resultados endurecidos ni permiten certificar conformidad estructural en este artículo.

F. Respuesta a la pregunta de investigación

La adición de HPMC modificó de forma sistemática la constructibilidad: redujo el asentamiento, mantuvo estable la temperatura, incrementó levemente el aire, disminuyó la exudación en el extremo de 1,00% y prolongó los fraguados inicial y final. El resultado medido fue una mezcla de menor asentamiento bajo el cono de Abrams y fraguado más tardío; la cohesión y la conservación de trabajabilidad permanecen como hipótesis de interpretación. En consecuencia, la incorporación requiere protocolo de colocación y control, no solo una prescripción porcentual.

G. Análisis incremental por nivel de dosificación

El paso de 0,00% a 0,30% produjo la mayor pérdida inicial de asentamiento: 0,75 pulgadas. El siguiente incremento, de 0,30% a 0,60%, redujo otras 0,75 pulgadas, mientras el tránsito de 0,60% a 1,00% redujo solo 0,25 pulgadas. La respuesta, por tanto, fue monotónica pero no lineal respecto de los intervalos de dosis. Entre 0,60% y 1,00%, el asentamiento se aproximó a una meseta dentro de la resolución del ensayo. Este patrón sugiere que aumentar polímero en el tramo superior modifica otras dimensiones con mayor intensidad relativa que el asentamiento, una hipótesis que debe verificarse con reometría y réplicas.

En el fraguado inicial, las demoras acumuladas frente al patrón fueron 19, 34 y 48 min para 0,30%, 0,60% y 1,00%. En el fraguado final fueron 41, 90 y 92 min. El incremento final fue casi completo al llegar a 0,60%; añadir 0,40 puntos porcentuales hasta 1,00% solo extendió dos minutos adicionales el final, aunque agregó 14 min al inicio. Esto produjo intervalos inicial-final de 115, 137, 171 y 159 min, respectivamente. La mezcla de 0,60% tuvo el intervalo de transición más largo; la de 1,00% comenzó más tarde, pero completó la transición 12 min más rápido una vez alcanzado el fraguado inicial.

TABLA VIII. CAMBIOS INCREMENTALES Y DURACIÓN DE LA TRANSICIÓN DE FRAGUADO

HPMC	Δ asentamiento previo (in)	Demora inicial (min)	Demora final (min)	Intervalo I–F (min)
0,00%	—	0	0	115
0,30%	−0.75	19	41	137
0,60%	−0.75	34	90	171
1,00%	−0.25	48	92	159

La lectura conjunta de aire y temperatura ayuda a descartar explicaciones simplistas. La temperatura no aumentó con la dosis y la mezcla de 0,30% incluso registró el mínimo de 25,2 °C; por tanto, la prolongación de fraguado no siguió la pequeña oscilación térmica. El aire sí creció en pasos regulares de 0,1 puntos porcentuales. En una especificación de campo debe vigilarse porque el efecto acumulado de producto, mezclado y compactación puede diferir del laboratorio.

H. Escenarios de uso derivados, no prescriptivos

Los resultados permiten formular escenarios de selección, no recetas. En una pavimentación con descarga y consolidación limitadas, el patrón o 0,30% preservan mayor movilidad, pero requieren mayor vigilancia de agua superficial. Cuando existe vibración controlada y el riesgo dominante es la exudación o una logística prolongada, 0,60%–1,00% presentan fraguado más tardío y requieren verificar la cohesión, a costa de menor asentamiento.

La dosis de 1,00% reúne el menor asentamiento, la menor exudación recuperable, el mayor aire y el fraguado inicial más tardío. Esa combinación explica por qué no debe comunicarse como una simple mejora. El beneficio potencial de conservar agua se materializa solo si el equipo puede consolidar la mezcla sin añadir agua. De lo contrario, el ajuste informal en campo podría aumentar la relación agua/cemento y eliminar la trazabilidad experimental.

I. Lectura normalizada de las compensaciones

Tomando el patrón como índice 100, el asentamiento relativo fue 100, 75, 50 y 41,7 para 0,00%, 0,30%, 0,60% y 1,00%. El tiempo de fraguado inicial relativo fue 100, 106,8, 112,2 y 117,2; el final fue 100, 110,4, 122,8 y 123,4. La comparación muestra que la reducción de movilidad fue proporcionalmente mucho mayor que la ampliación del fraguado. Entre los extremos, el asentamiento cambió 58,3%, mientras el fraguado inicial aumentó 17,2% y el final 23,4%. Esta diferencia desaconseja compensar la baja movilidad con el argumento de que existe más tiempo: son dimensiones distintas.

TABLA IX. ÍNDICES DESCRIPTIVOS CON PATRÓN = 100

HPMC	asentamiento relativo	Fraguado inicial	Fraguado final	Aire relativo
0,00%	100,0	100,0	100,0	100,0
0,30%	75,0	106,8	110,4	106,7
0,60%	50,0	112,2	122,8	113,3
1,00%	41,7	117,2	123,4	120,0

El cambio marginal también varió por tramo. Los primeros 0,30 puntos porcentuales redujeron el asentamiento 25% respecto del patrón y extendieron el fraguado final 10,4%. El segundo tramo produjo otra reducción de 25 puntos del índice de asentamiento y añadió 12,4 puntos al índice de fraguado final. El último tramo, aunque mayor en amplitud de dosis, redujo solo 8,3 puntos adicionales el índice de asentamiento y apenas 0,6 puntos el fraguado final. Esta aparente saturación en dos respuestas no puede extrapolarse por encima de 1,00%, pero ayuda a definir dónde concentrar futuras dosis intermedias.

La exudación de los extremos ofrece otra relación. El índice de volumen pasó de 100 a 34,8 y el de porcentaje de 100 a 34,4. Por tanto, la reducción relativa de agua liberada fue de aproximadamente dos tercios, superior en magnitud al cambio del fraguado. Sin datos intermedios verificables no puede establecerse si la respuesta fue lineal, umbral o curvilínea. El siguiente experimento debería medir la exudación acumulada a intervalos y no solo el valor final, porque la tasa de aparición afecta el momento de acabado.

J. Matriz de riesgos por operación

En descarga y extendido, el riesgo creciente es la insuficiente movilidad. En consolidación, el riesgo es que una mezcla cohesiva retenga aire o deje vacíos si la vibración no se adapta. Durante nivelación y texturizado, la menor

exudación puede evitar una película superficial, pero el retraso de fraguado modifica el momento apropiado de intervención. En protección inicial, una ventana mayor exige mantener el paño resguardado durante más tiempo. El control debe acompañar toda la cadena y no limitarse al ensayo de recepción.

TABLA X. RELACIÓN ENTRE RESULTADO, OPERACIÓN Y CONTROL

Operación	Resultado relevante	Riesgo si no se controla	Verificación
Descarga	asentamiento reducido	Demora o agua correctiva	asentamiento al despacho/recepción
Extendido	Mayor cohesión	Distribución irregular	Tiempo y homogeneidad
Consolidación	Aire ligeramente mayor	Vacíos o sobre-vibrado	Aire, densidad y procedimiento
Acabado	Menor exudación	Intervención prematura/tardía	Agua superficial y textura
Protección	Fraguado prolongado	Exposición extendida	Penetración y condiciones ambientales

IV. DISCUSIÓN

El resultado central redefine la contribución de HPMC para pavimentos. Mientras la investigación mecánica pregunta cuánto cambia la resistencia, el análisis de constructibilidad pregunta si la mezcla puede llegar, colocarse, consolidarse y acabarse sin perder su diseño. La reducción monotónica del asentamiento confirma la fuerte influencia reológica descrita para éteres de celulosa [3]–[6]. Estos polímeros incrementan viscosidad y retención hídrica, pero su efecto depende de adsorción, masa molecular, grado de sustitución y composición del cemento. La coincidencia direccional con la literatura respalda el mecanismo, aunque el experimento no midió viscosidad plástica ni esfuerzo de fluencia.

La exudación fue el resultado más favorable y directamente diferenciador. El cambio de 23 a 8 mL muestra que una fracción mayor del agua permaneció dentro del sistema durante la observación. Chen et al. explican la retención por interacciones entre HPMC, agua y productos de hidratación [3]. Patural et al. señalan que el desempeño de los éteres no depende solo de viscosidad nominal, por lo que la transferencia a otra marca o cemento requiere verificación [4]. El estudio apoya una aplicación, no una regla universal.

La prolongación del fraguado concuerda con la adsorción del polímero y la modificación de la hidratación temprana informadas en matrices cementicias [5], [6], [12]. Desde la ejecución, 48 min adicionales antes del fraguado inicial y 92 min hasta el final pueden aumentar tolerancia ante transporte y acabado. No obstante, denominarlo “mejora” sin contexto sería incompleto. En clima frío, turnos cortos o aperturas rápidas, el retraso puede ser desventajoso. La sostenibilidad operativa surge de reducir errores y reprocesos, no de maximizar indiscriminadamente el tiempo abierto.

El incremento de aire de 1,5% a 1,8% fue pequeño, pero coherente con la estabilización de burbujas observada en morteros modificados. Su importancia radica en el control: si el material se comercializara sin protocolo, variaciones de mezclado y dosificación podrían amplificar el aire. La temperatura prácticamente constante fortalece la atribución descriptiva a la dosis, aunque no demuestra causalidad estadística por ausencia de réplicas frescas disponibles.

A. Aporte científico diferenciado

El artículo aporta una lectura multivariable de la trayectoria previa al endurecimiento. La investigación de origen examinó propiedades mecánicas del concreto [15]; aquí el aporte es el balance entre movilidad, estabilidad hídrica y tiempo. No se reproduce la conclusión de una dosis «óptima», porque la constructibilidad depende del equipo y del contexto. Se plantea, en cambio, una zona de decisión: 0,30%–0,60% cuando se prioriza movilidad relativa y 1,00% cuando el control de exudación y el tiempo abierto justifican mayor esfuerzo de consolidación, siempre sujeto a validación en un paño piloto.

B. Implicaciones para ingeniería sostenible

La evidencia no incluyó análisis de ciclo de vida, huella de carbono, costo unitario ni residuos. Por ello, el artículo no afirma que HPMC sea ambientalmente sostenible. Sí identifica mecanismos susceptibles de generar sostenibilidad: menos exudación puede reducir defectos; mayor tiempo abierto puede disminuir rechazo de cargas; una dosificación trazable puede evitar correcciones con agua; y el control de recepción puede reducir reprocesos. Estas son hipótesis de impacto que el piloto empresarial deberá medir.

C. Implicaciones de especificación y obra

Una especificación responsable debería vincular dosis, rango de asentamiento, método de colocación, límite de aire, ventana de fraguado y prohibición de añadir agua sin rediseño. El contratista necesita una hoja de lote que indique masa de cemento, masa de HPMC, secuencia de incorporación, tiempo de mezclado y controles de aceptación. El supervisor debe registrar temperatura, asentamiento, aire y tiempos reales. Así, el polímero deja de ser un insumo aislado y se convierte en una tecnología de proceso.

El paño piloto es indispensable. Debe reproducir equipo, cuadrilla, distancia de transporte, espesor, acabado y curado previstos. Las variables mínimas serían facilidad de descarga, energía o tiempo de vibración, homogeneidad, regla y textura, pérdida de asentamiento, exudación, fraguado, defectos superficiales y testigos de resistencia. Solo después de esa evaluación puede fijarse una receta contractual.

D. Limitaciones

Primera, el análisis depende de una sola campaña y no incorpora variaciones de marca de HPMC, lote de cemento, relación agua/cemento o clima. Segunda, los valores individuales de réplica no estuvieron disponibles para todos los ensayos frescos; en consecuencia, el análisis fue descriptivo. Tercera, no se midieron viscosidad, esfuerzo de fluencia, pérdida de asentamiento con el tiempo, bombeabilidad, energía de compactación, retracción, permeabilidad, abrasión o fatiga. Cuarta, los valores intermedios de exudación no se recuperaron con certeza del documento exportado. Quinta, existen discrepancias internas en el módulo elástico, razón por la cual se excluyó de la cuantificación central.

Sexta, el concepto de constructibilidad fue operacionalizado desde variables de laboratorio, no mediante observación directa de una pavimentación a escala real. Séptima, no se realizó evaluación económica, ambiental ni comercial. Por tanto, la propuesta posterior es proyectiva y no constituye un resultado del experimento.

E. Validez de transferencia a pavimentos rígidos

La transferencia exige distinguir validez del material y validez del proceso. La primera pregunta si los cambios se reproducen con los insumos locales; la segunda, si cuadrilla y equipos pueden aprovecharlos. Un mismo asentamiento puede comportarse de manera distinta con pavimentadora de encofrado deslizante, regla vibratoria o colocación manual. Asimismo, la demora de fraguado puede ser favorable para una ruta larga y desfavorable para una obra que necesita liberar rápidamente formaletas o juntas. Por ello, el resultado de laboratorio define un rango de prueba y no una especificación universal.

También debe preservarse la compatibilidad del polímero. Los éteres de celulosa varían en viscosidad, sustitución y tamaño de partícula; el desempeño publicado para una formulación no se transfiere automáticamente a otra. Cemento, sulfatos, finura y aditivos concurrentes pueden modificar absorción e hidratación. Una empresa responsable debe identificar lote y ficha del HPMC, validar la dispersión y repetir ensayos cuando cambie un componente crítico. Esta trazabilidad constituye parte del valor de ingeniería y no un trámite comercial.

F. Agenda experimental derivada

Una siguiente fase debe registrar al menos tres amasadas independientes por tratamiento y conservar datos crudos. El conjunto mínimo incluiría asentamiento inicial y pérdida a 30, 60 y 90 min; aire; temperatura; exudación acumulada; penetración; densidad; esfuerzo de fluencia y viscosidad plástica. En el paño piloto deben añadirse tiempo de descarga, energía de vibración, facilidad de acabado, textura, planicidad, fisuración temprana y material rechazado. Con esas observaciones podría estimarse una ventana operativa con incertidumbre y no solo con valores puntuales.

La sostenibilidad requerirá una unidad funcional explícita, por ejemplo un metro cuadrado de pavimento conforme durante una vida de servicio definida. El balance deberá incluir masa de polímero, transporte, agua de corrección, concreto descartado, reparación temprana y duración. Sin esa evaluación, menor exudación y menor reproceso son mecanismos plausibles, no hay evidencia de menor impacto ambiental. Esta precisión protege al artículo frente a afirmaciones de sostenibilidad no demostradas y convierte los indicadores del emprendimiento en hipótesis comprobables.

G. Implicaciones para especificaciones y supervisión

Los resultados sugieren que una ficha técnica basada únicamente en porcentaje de HPMC sería insuficiente. La especificación debe expresar la dosis en relación con la masa real de cemento, identificar el producto y lote, indicar tolerancia de pesaje, secuencia de incorporación y tiempo mínimo de dispersión. También debe definir rangos de recepción y acciones ante desviaciones. Si el asentamiento queda por debajo del rango, la respuesta no puede ser añadir agua automáticamente; corresponde revisar dosificación, humedad de agregados, tiempo de transporte y compatibilidad.

La supervisión necesita separar aceptación del material y aceptación del proceso. El primer nivel verifica temperatura, aire, consistencia, exudación y fraguado. El segundo observa si la cuadrilla descarga, consolida y termina sin correcciones que alteren la mezcla. Un lote puede cumplir el valor de asentamiento previsto y aun fracasar por dispersión deficiente o acabado inoportuno. De manera inversa, un asentamiento bajo puede ser ejecutable con equipo adecuado. La decisión final debe documentar ambos niveles.

Para contratación pública, esta separación evita especificaciones de marca y permite contratar desempeño verificable. El pliego puede exigir trazabilidad de dosificación, paño piloto, rangos de control y evidencia de compatibilidad, dejando al proveedor demostrar cómo los alcanza. Este enfoque favorece la competencia técnica y reduce la posibilidad de que una innovación se apruebe sólo por una promesa comercial. El emprendimiento propuesto adopta precisamente ese rol de integración y verificación.

H. Significado del aporte

La contribución empírica es la identificación de una compensación consistente entre movilidad, estabilidad hídrica y tiempo. La contribución metodológica es la organización de los ensayos según la trayectoria operativa del concreto. La contribución aplicada es delimitar qué debe validarse antes de convertir el hallazgo en servicio empresarial. Estas tres capas mantienen separadas evidencia, inferencia y propuesta.

I. Síntesis mecanística y explicación rival

La interpretación más coherente con la evidencia disponible es que HPMC modificó la fase acuosa y la interacción entre partículas. El aumento de viscosidad y la formación de puentes coloidales descritos por Chen et al. [3] ofrecen una explicación conjunta para menor asentamiento y menor migración de agua. La adsorción sobre fases cementicias y la interferencia temporal con la hidratación explican razonablemente el retraso del fraguado [5], [6]. El ligero incremento del aire es compatible con estabilización de burbujas. La convergencia de estas direcciones fortalece la plausibilidad del mecanismo, aunque el experimento no observó directamente películas, adsorción ni cinética calorimétrica.

Deben considerarse explicaciones rivales. Diferencias de humedad de agregados, tiempo entre mezclado y ensayo, energía de mezclado o dispersión incompleta pueden cambiar asentamiento y aire. La temperatura estable reduce, pero no elimina, la variación entre lotes. Para la exudación, la geometría del recipiente y el momento de lectura también influyen. En fraguado, una diferencia en tamizado del mortero o penetración puede alterar el registro. La ausencia de réplicas crudas impide estimar cuánto de la tendencia corresponde al polímero y cuánto a variabilidad experimental. Por eso el estudio diagnostica una señal consistente, no una ley de dosificación.

J. Decisión multicriterio sin falsa optimización

La selección de dosis puede plantearse como una decisión multicriterio con restricciones, pero no como un promedio arbitrario de variables. Primero se fijan límites no negociables: resistencia exigida, aire permitido, posibilidad de consolidación y prohibición de agua correctiva. Después se prioriza el riesgo del proyecto: pérdida de agua, demora logística, acabado o movilidad. Finalmente se compara el costo total de cumplir, no solo el costo del polímero. Este orden evita que una mejora grande de exudación compense matemáticamente una mezcla imposible de colocar.

Bajo esa lógica, la mezcla patrón funciona como referencia de movilidad; 0,30% conserva tres cuartas partes del asentamiento patrón y extiende moderadamente el fraguado; 0,60% reduce el asentamiento a la mitad y aproxima el fraguado final al máximo observado; 1,00% añade el control de exudación extremo documentado, pero exige el mayor control de consolidación. Ninguna descripción equivale a recomendación contractual. El valor del reanálisis consiste en mostrar qué pregunta debe responder el paño piloto para cada perfil.

TABLA XI. SECUENCIA DE DECISIÓN PARA UNA VALIDACIÓN FUTURA

Etapa	Pregunta	Evidencia necesaria	Resultado
1. Restricción	¿Cumple requisitos estructurales?	Ensayos del proyecto	Descartar o continuar
2. Ejecución	¿Puede colocarse sin agua extra?	Paño y registro de cuadrilla	Viable/no viable
3. Estabilidad	¿Reduce agua y defectos?	Exudación y superficie	Beneficio comparado
4. Tiempo	¿La ventana ayuda a la logística?	Despacho, recepción y acabado	Ventaja o demora
5. Sostenibilidad	¿Reduce recursos por unidad conforme?	Costo, residuo, agua y CO_2e	Escalar/no escalar

K. Condiciones que refutarían la utilidad aplicada

La utilidad constructiva quedaría refutada si, al repetir el ensayo, la reducción de exudación no se reproduce; si el menor asentamiento obliga a añadir agua; si la compactación necesaria incrementa defectos o consumo de recursos; si el retraso de fraguado bloquea la programación; o si la compatibilidad cambia de manera impredecible entre lotes. La utilidad sostenible quedaría refutada si el polímero y el servicio añaden más costo, residuo o impacto que los reprocesos evitados. Formular estas condiciones antes del piloto impide confirmar selectivamente la propuesta.

También debe distinguirse éxito técnico de éxito empresarial. Una mezcla puede ser técnicamente viable y no generar disposición de pago; un servicio puede despertar interés comercial y no cumplir desempeño. El estudio solo aporta evidencia descriptiva para la primera hipótesis en escala de laboratorio. La propuesta posterior deberá validar de forma separada repetibilidad técnica, adopción operativa, economía unitaria y desempeño ambiental. Este encadenamiento conserva la independencia del IMRyD y evita presentar el modelo de negocio como resultado experimental.

L. Coherencia con la línea LEIRD 2026

La relación con innovación y emprendimiento sostenibles se establece mediante transferencia responsable de conocimiento experimental. La innovación es convertir un comportamiento material medido en un sistema trazable de dosificación y control. El emprendimiento aparece después del diagnóstico como mecanismo para prestar ese servicio. La sostenibilidad se define mediante indicadores que deberán demostrarse: reducción de agua correctiva, rechazo, reproceso, residuos y costo por unidad conforme. El artículo no cambia de campo hacia administración; mantiene la ingeniería del material como fundamento y somete la oportunidad empresarial a verificación técnica.

TABLA XII. VARIABLES PARA VALIDAR LA TRANSFERENCIA EN PAÑO PILOTO

Dimensión	Variable mínima	Criterio de comparación
Material	asentamiento y pérdida temporal	Rango compatible con equipo
Estabilidad	Exudación acumulada	Menor agua sin defectos
Operación	Descarga, vibración y acabado	Sin agua correctiva ni demora crítica
Calidad	Planicidad, textura y defectos	Cumplimiento de especificación
Recursos	Desperdicio y reproceso	Menor por unidad conforme
Ambiente	Agua, residuo y CO_2e	Comparación con control

V. PROPUESTA DE EMPRENDIMIENTO SOSTENIBLE DE INGENIERÍA

A. Pavimix HPMC Control

Se propone Pavimix HPMC Control, un emprendimiento de ingeniería B2B/B2G orientado a municipalidades, contratistas, plantas de concreto y supervisores de pavimentos rígidos. Su propósito no es vender HPMC como producto indiferenciado, sino entregar una solución de dosificación y control que preserve el balance observado entre movilidad, estabilidad y ventana de colocación. La propuesta se deriva de los resultados, pero no fue implementada, comercializada ni validada por los participantes del estudio.

B. Problema y propuesta de valor

El problema empresarial es la variabilidad entre diseño y obra. Un aditivo dosificado sin trazabilidad puede formar grumos, cambiar el aire, disminuir asentamiento y provocar que la cuadrilla agregue agua. La propuesta de valor integra: 1) diagnóstico del proceso de pavimentación; 2) selección preliminar de dosis dentro del rango estudiado; 3) sobres o kits predosificados por lote de cemento; 4) protocolo de dispersión y mezclado; 5) control de recepción; 6) asistencia durante paño piloto; y 7) informe de conformidad con trazabilidad.

TABLA XIII. MODELO OPERATIVO DEL SERVICIO PROPUESTO

Módulo	Entregable	Indicador de pilotaje
Diagnóstico	Ficha de planta, transporte, equipo y clima	Riesgos críticos identificados
Dosificación	Kit trazable y hoja de lote	Error de masa por lote
Paño piloto	Acompañamiento y registro de ejecución	Aceptación sin añadir agua
Control fresco	asentamiento, temperatura, aire, exudación/fraguado	Lotes dentro del rango
Seguimiento	Informe de defectos y testigos	Reprocesos y no conformidades
Aprendizaje	Ajuste documentado del protocolo	Cambios sustentados en datos

C. Clientes y canales

El cliente pagador inicial sería el contratista de pavimentos o la planta que atiende obras municipales. El supervisor y la municipalidad son usuarios decisores porque establecen aceptación. El acceso al mercado podría iniciar con alianzas con laboratorios acreditados, colegios profesionales y proveedores de concreto. No se recomienda venta masiva al detalle antes del piloto: la tecnología depende de masa de cemento, compatibilidad y control de mezclado.

D. Ingresos y costos

Se plantean tres fuentes: tarifa por diagnóstico y diseño de protocolo; margen por kits predosificados; y tarifa de asistencia y control por jornada o volumen. Los costos incluyen HPMC, envase barrera, balanza y control metrológico, técnico de campo, ensayos, transporte, seguros, documentación y gestión comercial. El piloto debe levantar costo por metro cúbico, costo por lote aceptado y costo

evitado por reproceso; cualquier cifra previa sería especulativa.

E. Sostenibilidad verificable

La sostenibilidad social se evaluará mediante seguridad del procedimiento, capacitación y trazabilidad; la operativa, mediante rechazo, demora y reproceso; la económica, mediante costo total por m³ conforme; y la ambiental, mediante agua añadida, mezcla descartada, residuos y emisiones asociadas a reprocesos. No se atribuirá una mejora ambiental al polímero sin inventario de ciclo de vida y comparación con escenario base.

F. Piloto y criterios de decisión

El piloto mínimo comprenderá un control y una mezcla seleccionada, producidos con el mismo cemento, agregados, agua y equipo. Se ejecutarán paños comparables y se registrarán masa real de HPMC, tiempo de mezclado, asentamiento al despacho y recepción, temperatura, aire, exudación, fraguado, tiempo de descarga, vibración, acabado, agua añadida, desperdicio y no conformidades. A 7 y 28 días se verificarán propiedades mecánicas exigidas por el proyecto. La empresa no recomendará escalamiento si la mezcla requiere correcciones de agua, excede el aire permitido, impide consolidación o no cumple resistencia.

TABLA XIV. HIPÓTESIS EMPRESARIALES Y UMBRALES PARA EL PILOTO

Hipótesis	Medición	Decisión
El kit reduce error de dosis	Desviación entre masa objetivo y real	Continuar si cumple tolerancia acordada
El protocolo evita agua correctiva	Litros añadidos no previstos	Rediseñar si existe corrección recurrente
La ventana facilita colocación	Tiempo útil y eventos de acabado	Continuar si no genera demoras críticas
Menor exudación reduce defectos	Agua superficial y defectos observados	Comparar con control
Existe valor económico	Costo/m³ conforme y reproceso evitado	Escalar solo con ahorro o valor probado
Existe beneficio ambiental	Residuo, agua y CO_2e por unidad funcional	No comunicar sin evidencia

G. Riesgos y salvaguardas

Los riesgos técnicos son incompatibilidad entre HPMC y cemento, dispersión deficiente, menor movilidad, aire no previsto y retraso excesivo. Los riesgos comerciales incluyen dependencia de proveedor, variación de precios, compra pública lenta y atribución de fallas ajenas al servicio. Las salvaguardas son ficha técnica por lote, trazabilidad, paño piloto, límites de aceptación, responsabilidad contractual definida y prohibición de promesas de durabilidad no verificadas.

H. Hoja de ruta

Fase 1: validación de laboratorio con réplicas y análisis estadístico. Fase 2: paño piloto instrumentado. Fase 3: evaluación técnico-económica y ambiental. Fase 4: servicio demostrativo con dos clientes y auditoría de conformidad. Fase 5: estandarización, propiedad intelectual de marca y manual, y escalamiento regional. El avance entre fases dependerá de evidencia y no de la sola mejora observada.

I. Validación comercial y aprendizaje

La validación comercial debe comenzar con entrevistas estructuradas a contratistas, plantas, laboratorios y supervisores, sin ofrecer todavía una dosificación definitiva. Se evaluarán frecuencia y costo de rechazos, correcciones de agua, demoras de acabado y fallas de trazabilidad. Después se presentará el servicio como experimento pagado de alcance limitado. Los indicadores serán conversión a piloto, disposición de pago, tiempo de contratación, renovación y causa de abandono. La evidencia comercial no sustituirá la conformidad técnica.

Cada piloto generará una ficha de aprendizaje con condición inicial, hipótesis, cambio autorizado, resultado y decisión. El protocolo no podrá modificarse oralmente en obra. Si una desviación exige cambiar agua, polímero o secuencia, se abrirá una nueva versión del diseño y se repetirá la aceptación. Este control de versiones protege al cliente y convierte la experiencia acumulada en un activo reproducible del emprendimiento.

J. Gobernanza, calidad y responsabilidad

La empresa deberá separar tres funciones: formulación, verificación y aprobación. El responsable de formulación define el rango preliminar; el técnico de campo registra sin alterar datos; y el ingeniero responsable aprueba o rechaza el escalamiento. Cuando el laboratorio sea aliado comercial, los informes identificarán esa relación. Los registros conservarán lote de HPMC, cemento, agregados, humedad, equipo, operador, fecha y resultados. La trazabilidad permitirá investigar fallas sin atribuirle automáticamente al polímero.

El contrato delimitará que Pavimix presta asistencia tecnológica y no reemplaza al diseñador estructural, productor, contratista ni supervisor. No se prometerá vida útil, impermeabilidad o reducción de emisiones sin ensayos específicos. Las fichas de seguridad, capacitación, almacenamiento seco y control de polvo formarán parte del servicio. Una innovación sostenible pierde legitimidad si traslada riesgos laborales o responsabilidades técnicas a usuarios con menor información.

K. Propiedad intelectual y escalamiento

La composición básica con HPMC no se presenta como invención exclusiva. Los activos protegibles serían la marca, el manual de dosificación, la base de compatibilidad entre materiales, los formatos de trazabilidad y el sistema de control. El escalamiento regional exigirá repetir compatibilidad con cementos y agregados locales; no se venderá una receta única. La licencia del protocolo a laboratorios asociados podría ampliar cobertura manteniendo auditorías y competencia técnica.

TABLA XV. TABLERO DE VALIDACIÓN DEL EMPRENDIMIENTO

Eje	Indicador	Evidencia mínima	Regla de avance
Técnico	Lotes conformes sin agua extra	Registros y ensayos	Repetibilidad en paños
Operativo	Tiempo y reproceso	Comparación con control	Sin carga crítica adicional
Comercial	Pago y renovación	Contrato/factura	Demanda no subsidiada
Económico	Margen por servicio	Costos completos	Margen positivo reproducible
Ambiental	Residuo, agua y CO_2e	Inventario comparativo	No comunicar sin mejora
Gobernanza	Trazabilidad y auditoría	Expediente completo	Cero cambios no documentados

L. Criterio de cierre o pivote

El emprendimiento avanzará si demuestra simultáneamente colocación viable, conformidad, valor económico y trazabilidad. Deberá pivotar hacia consultoría sin kits si la formulación varía demasiado entre proyectos, y cerrará la línea si el beneficio no supera el costo o si el control requiere correcciones de agua recurrentes. Estas reglas evitan sostener una solución por apego al resultado

inicial y convierten la propuesta en una hipótesis empresarial contrastable.

VI. CONCLUSIONES

La HPMC produjo una modificación clara del estado fresco del concreto estudiado. Al pasar de 0,00% a 1,00%, el asentamiento se redujo de 3,00 a 1,25 pulgadas, mientras la temperatura permaneció prácticamente estable y el aire aumentó de 1,5% a 1,8%. El extremo de 1,00% redujo la exudación de 23 a 8 mL y de 0,32% a 0,11%. Los fraguados inicial y final aumentaron de 279/394 a 327/486 min.

Estos cambios configuran una compensación constructiva: menor exudación y fraguado más tardío, junto con menor movilidad convencional. No existe base para declarar una dosis universalmente óptima sólo a partir del asentamiento. La selección debe considerar el método de colocación y validarse en un paño piloto. La investigación responde a una pregunta distinta del análisis mecánico de la tesis de origen y utiliza las resistencias únicamente como restricción secundaria.

Los resultados sustentan la formulación de un servicio técnico para controlar la dosificación y la ejecución, pero no demuestran todavía rentabilidad, reducción de huella ambiental, aceptación del mercado ni desempeño a escala real. Estas dimensiones deberán medirse mediante el piloto propuesto antes de cualquier escalamiento.

DECLARACIONES

Ética: no aplica, porque el estudio utiliza resultados de ensayos de materiales y no involucró participantes humanos, animales ni datos personales.

Disponibilidad de datos: el reanálisis utiliza resultados consolidados de la investigación de origen [15]. No se adjunta una base de registros individuales de los ensayos frescos; por ello no se estima su variabilidad ni se ofrecen réplicas como datos disponibles.

Financiamiento: por los autores

Conflictos de interés: Ninguno

REFERENCIAS

[1] A. M. Neville, Properties of Concrete, 5th ed. Harlow, UK: Pearson, 2011.
[2] S. H. Kosmatka, B. Kerkhoff, W. C. Panarese, and J. Tanesi, Design and Control of Concrete Mixtures. Skokie, IL: Portland Cement Association, 2002.
[3] N. Chen, P. Wang, L. Zhao, and G. Zhang, "Water retention mechanism of HPMC in cement mortar," Materials, vol. 13, 2020, doi: 10.3390/ma13132918.
[4] L. Patural, P. Marchal, A. Govin, P. Grosseau, B. Ruot, and O. Devès, "Cellulose ethers influence on water retention and consistency in cement-based mortars," Cement and Concrete Research, vol. 41, pp. 46–55, 2011, doi: 10.1016/j.cemconres.2010.09.004.
[5] J. Pourchez, P. Grosseau, and B. Ruot, "Changes in C3S hydration in the presence of cellulose ethers," Cement and Concrete Research, vol. 40, no. 2, pp. 179–188, 2010, doi: 10.1016/j.cemconres.2009.10.008.
[6] Z. Ding et al., "A feasibility study on HPMC-improved sulphoaluminate cement for 3D printing," Materials, vol. 11, 2018, doi: 10.3390/ma11122415.
[7] American Concrete Institute, Guide to External Curing of Concrete, ACI 308R-16. Farmington Hills, MI, 2016.
[8] ASTM International, ASTM C143/C143M, Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. West Conshohocken, PA.
[9] ASTM International, ASTM C1064/C1064M, Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete.
[10] ASTM International, ASTM C231/C231M, Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method.
[11] ASTM International, ASTM C403/C403M, Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance.
[12] J. Li, R. Wang, and L. Li, "Influence of cellulose ethers structure on mechanical strength of calcium sulphoaluminate cement mortar," Construction and Building Materials, vol. 303, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124514.
[13] I. L. Rodrigues Batista et al., "Influence of HPMC on thermal and mechanical performance of cementitious rendering mortars," Materials and Structures, vol. 57, 2024, doi: 10.1617/s11527-024-02297-y.
[14] Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, Manual de Ensayo de Materiales. Lima, Peru, 2016.
[15] G. Segovia Contreras, "Adición de éter de celulosa en el diseño del concreto para mejorar sus propiedades mecánicas en pavimentos rígidos," tesis, Universidad Ricardo Palma, 2025. https://hdl.handle.net/20.500.14138/9583.