

Ventana de corte de juntas en pavimentos de concreto: una revisión sistemática basada en el fraguado y comportamiento mecánico temprano

Joint saw-cutting window in concrete pavements: a systematic review based on setting characteristics and early-age mechanical behavior

Yhovana Monica Marca Colque^{1,*}, Jahel Sarvia Ledezma Perez², Victor Hugo Miranda Challapa³, Joaquin Humberto Aquino Rocha⁴

*Correo de correspondencia: monikyhovana@gmail.com

Resumen

La fisuración a edades tempranas afecta significativamente el desempeño estructural y la durabilidad de los pavimentos de concreto. En este contexto, el momento de corte de juntas es un parámetro crítico para controlar la localización de fisuras. El objetivo del presente trabajo es analizar de manera crítica el estado del arte sobre la determinación de la ventana óptima de corte en pavimentos de concreto, considerando el comportamiento temprano del material, las propiedades mecánicas, los métodos de evaluación en campo, la activación de juntas y los aspectos de durabilidad. Se realizó una revisión sistemática de la literatura (RSL) utilizando las bases de datos *Scopus* y *Web of Science* para el periodo 2016–2026. Se seleccionaron 15 estudios con enfoques experimentales, numéricos y de campo. Los resultados evidencian que los enfoques empíricos basados únicamente en el tiempo son insuficientes para definir de manera confiable la ventana de corte, ya que no consideran la evolución real del concreto ni la influencia de las condiciones ambientales y de la mezcla. Se identificaron como parámetros más representativos el tiempo de fraguado, la resistencia mecánica temprana y el módulo elástico. Por otro lado, la combinación de técnicas no destructivas, sensores y sistemas de monitoreo en tiempo real representa el enfoque más completo para la toma de decisiones en campo, al permitir capturar la variabilidad espacial y temporal del material. Finalmente, se destaca que la ventana de corte influye no solo en el control de la fisuración, sino también en la evolución microestructural y la durabilidad de las juntas a largo plazo.

Palabras clave: fisuración temprana; pavimentos de concreto; corte de juntas; activación de juntas; método de madurez.

Abstract

Early-age cracking significantly affects the structural performance and durability of concrete pavements. In this context, the timing of joint saw-cutting is a critical parameter for controlling crack localization. The objective of this study is to critically analyze the state of the art regarding the determination of the optimal saw-cutting window in concrete pavements, considering the early-age behavior of concrete, mechanical properties, field evaluation methods, joint activation, and durability aspects. A systematic literature review (SLR) was conducted using the *Scopus* and *Web of Science* databases for the period 2016–2026. A total of 15 studies involving experimental, numerical, and field-based approaches were selected. The results indicate that empirical approaches based solely on elapsed time are insufficient to reliably define the saw-cutting window, as they do not account for the actual evolution of concrete properties or the influence of environmental and mixture-related factors. Setting time, early-age mechanical strength, and elastic modulus were identified as the most representative parameters. Furthermore, the combination of nondestructive testing techniques, sensors, and real-time monitoring systems represents the most comprehensive approach for field decision-making, as it enables the assessment of both spatial and temporal variability of the material. Finally, the findings highlight that the saw-cutting window influences not only crack control but also the microstructural evolution and long-term durability of pavement joints.

Keywords: early-age cracking; concrete pavements; joint saw-cutting; joint activation; maturity method.

Keywords: early-age cracking; concrete pavements; joint saw-cutting; joint activation; maturity method.

¹ Licenciatura en Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0003-2190-1078>

² Laboratorio de Pavimentos y Asfaltos, Departamento de Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0000-0002-2743-6256>

³ Laboratorio de Pavimentos y Asfaltos, Departamento de Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0009-2752-8087>

⁴ Laboratorio de Resistencia de Materiales y Estructuras, Departamento de Civil, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0000-0002-3383-6379>

1. Introducción

El desempeño estructural y la durabilidad de los pavimentos de concreto dependen en gran medida del control adecuado de la fisuración a edades tempranas (Safiuddin *et al.*, 2018; Abadin *et al.*, 2025). Durante las primeras horas después de la colocación, el concreto experimenta procesos simultáneos de hidratación, desarrollo de resistencia, contracción térmica y por secado, los cuales generan tensiones internas que pueden superar la resistencia a tracción del material, provocando la formación de fisuras no controladas (Hong *et al.*, 2023; Qu *et al.*, 2024). En este contexto, la construcción de juntas mediante el corte superficial (*saw-cutting*) constituye una de las estrategias más utilizadas para inducir y controlar la localización de las fisuras, evitando su aparición aleatoria y garantizando un comportamiento estructural adecuado del pavimento (Song *et al.*, 2022; Jamieson & White, 2023).

Sin embargo, el éxito del sistema de juntas depende críticamente del momento en que se realiza el corte. Si el corte se ejecuta demasiado temprano, cuando el concreto aún no ha desarrollado suficiente cohesión interna, puede producirse daño superficial en forma de desgranamiento (*raveling*). Por el contrario, si el corte se retrasa en exceso, las tensiones generadas por la contracción pueden dar lugar a fisuras aleatorias antes de que la junta sea capaz de activarse correctamente. Este comportamiento evidencia la existencia de una ventana de corte óptima, dentro de la cual es posible minimizar tanto el daño superficial como el riesgo de fisuración no controlada (Bautista & Basheer, 2008; Zhang *et al.*, 2022; Lu *et al.*, 2022).

Tradicionalmente, la determinación de esta ventana de corte se ha basado en criterios empíricos, tales como el tiempo transcurrido desde la colocación o la experiencia del operador en obra (Raoufi *et al.*, 2008). No obstante, estos enfoques presentan limitaciones significativas, ya que no consideran la influencia de variables fundamentales como las condiciones ambientales, el tipo de mezcla, la velocidad de hidratación o el desarrollo de propiedades mecánicas del concreto. En consecuencia, se han reportado numerosos casos de fisuración prematura y fallas en la activación de juntas, incluso en pavimentos correctamente diseñados desde el punto de vista estructural (DeSantis *et al.*, 2023; Darnell & Vandebossche, 2026).

En los últimos años, diversos estudios han propuesto enfoques más racionales para la determinación del momento óptimo de corte, basados en parámetros medibles del material, tales como el tiempo de fraguado, el desarrollo de la resistencia mecánica, el módulo elástico o el estado de deformaciones a edades tempranas (Tran & Roesler, 2020; Kosar *et al.*, 2023a). Igualmente, el avance de técnicas no destructivas, como el método de madurez y el ultrasonido sin contacto, ha permitido el monitoreo continuo del comportamiento del concreto en tiempo real, facilitando una mejor estimación de las condiciones óptimas para la ejecución del corte (Kosar *et al.*, 2023b; Yami *et al.*, 2024). Sin embargo, estos enfoques han sido desarrollados de manera fragmentada, enfocándose en variables específicas sin una integración clara entre los distintos mecanismos involucrados.

Adicionalmente, investigaciones recientes han demostrado que el desempeño del sistema de juntas no depende únicamente del momento de corte, sino también de factores como la activación efectiva de la junta, el espaciamiento entre juntas, las condiciones de curado posterior y la exposición ambiental durante la vida útil del pavimento (Shafiee & Maadani, 2022; Chen *et al.*, 2022). En particular, se ha observado que una junta correctamente cortada puede no activarse si las tensiones inducidas son insuficientes, o bien que las zonas de junta pueden constituir regiones críticas desde el punto de vista de durabilidad debido a su mayor porosidad y exposición a agentes agresivos (Tiznobaik & Bassuoni, 2019; Elbakari & Shehata, 2022).

En este contexto, resulta necesario desarrollar una visión integral que permita comprender la interacción entre los diferentes factores que controlan la formación de fisuras y el desempeño de las juntas en pavimentos de concreto mediante una revisión sistemática de la literatura. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo es analizar de manera crítica el estado del arte relacionado con la determinación de la ventana de corte en pavimentos rígidos, considerando los mecanismos de fisuración a edades tempranas, el desarrollo de propiedades del material, los métodos de evaluación en campo, la activación de juntas

y los aspectos de durabilidad. A partir de este análisis, se busca identificar las principales limitaciones de los enfoques actuales y proponer una base conceptual integrada que contribuya a mejorar la toma de decisiones en la práctica constructiva de pavimentos rígidos.

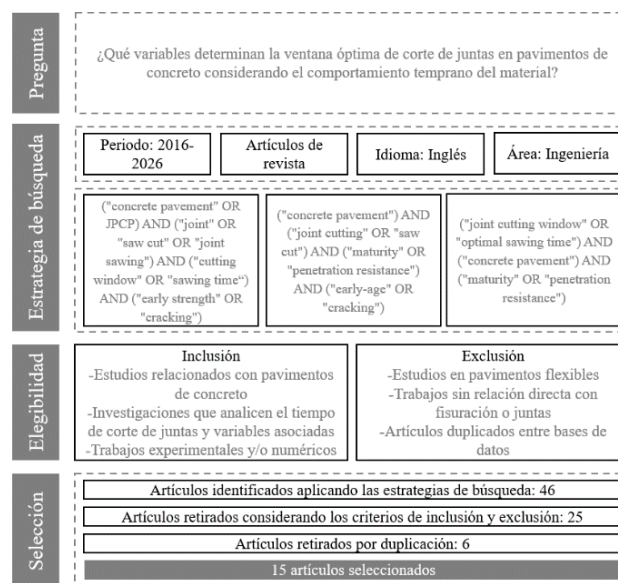
2. Metodología

La presente investigación se desarrolló mediante una RSL, planteando la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué variables determinan la ventana óptima de corte de juntas en pavimentos de concreto considerando el comportamiento temprano del material? El proceso metodológico se estructuró siguiendo lineamientos ampliamente aceptados para revisiones sistemáticas (Snyder, 2019; Chigbu *et al.*, 2023). La Figura 1 presenta de manera esquemática el procedimiento adoptado para la identificación y selección de los estudios considerados en esta investigación.

La búsqueda bibliográfica se realizó en las bases de datos de *Scopus* y *Web of Science*, donde se emplearon combinaciones de palabras clave relacionadas con el tema de estudio, utilizando operadores booleanos. La búsqueda se limitó a artículos publicados en inglés en revistas indexadas durante el periodo 2016-2026, priorizando estudios experimentales y numéricos.

Se definieron criterios para garantizar la relevancia y calidad de los estudios seleccionados. En el caso de los criterios de inclusión se consideraron: a) estudios relacionados con pavimentos de concreto; b) investigaciones que analicen el tiempo de corte de juntas o variables asociadas, y c) artículos con resultados experimentales, numéricos o de campo. Por otro lado, los criterios de exclusión se definieron como: a) estudios enfocados en pavimentos flexibles, b) trabajos sin relación directa con fisuración o juntas y c) artículos duplicados entre bases de datos

Figura 1
Metodología adoptada



El proceso de selección de artículos incluyó inicialmente una recolección de artículos a partir de las bases de datos, posteriormente, una revisión de títulos y resúmenes para descartar estudios no relevantes, y finalmente análisis detallado del contenido completo de los artículos seleccionados. Por último, se seleccionaron 15 artículos que cumplen con los criterios establecidos y que representan de manera adecuada las diferentes dimensiones del problema estudiado. La Tabla 1 presenta el detalle de los artículos, considerando el enfoque realizado, la principal variable y los resultados más relevantes.

Tabla 1

Descripción de los estudios seleccionados

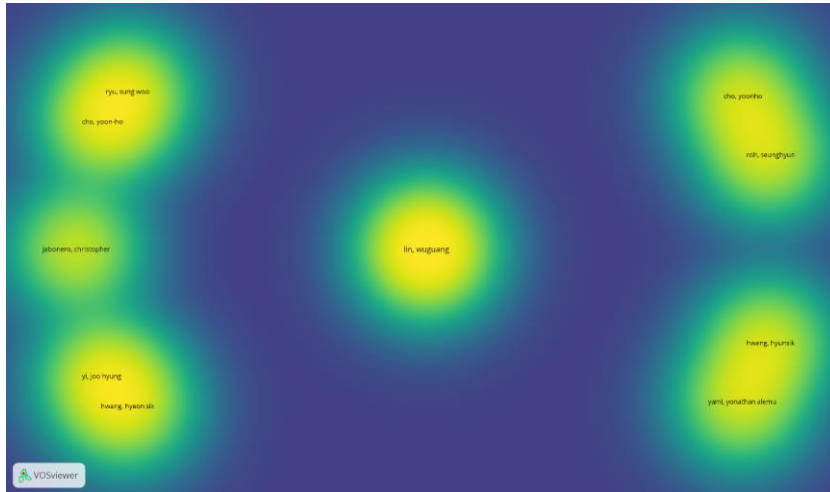
#	Autores	Año	Revista	Enfoque principal	Variable clave	Resultado principal
1	Yami <i>et al.</i>	2024	<i>Construction and Building Materials</i>	Madurez + resistencia + penetración (enfoque integrado + IoT)	Madurez (°C·h) + resistencia (MPa)	Ventana óptima: 670–760 °C·h (≈5–8 MPa) a 20°C; sistema IoT mejora control en campo
2	Lin <i>et al.</i>	2020	<i>KSCE Journal of Civil Engineering</i>	Deformaciones tempranas (campo)	Strain (με) + ΔT	Ambiente controla fisuración; exterior ≈2× mayor deformación
3	Kosar <i>et al.</i>	2023a	<i>Journal of Traffic and Transportation Engineering</i>	NDT (madurez + ultrasonido) para decisión temprana	Resistencia (MPa) + velocidad de onda (SWV)	Ultrasonido más preciso; método de madurez conservador; alta variabilidad espacial
4	Tiznobaik & Bassuoni	2019	<i>Road Materials and Pavement Design</i>	Corte + curado de juntas	Resistencia (MPa) + humedad + microestructura	Corte temprano expone a evaporación; mejor desempeño con corte tardío + curado
5	Kashif <i>et al.</i>	2021	<i>Applied Sciences</i>	Inducción de fisuras mediante cortes parciales (ARCP vs CRCP)	Tensiones térmicas + FE + posición de corte	Las fisuras se inician en el corte; mejora el control del patrón de fisuración
6	Kosar <i>et al.</i>	2023b	<i>Applied Sciences</i>	Estimación de resistencia a edad temprana mediante NDT combinados (ultrasonido + madurez)	Velocidad de onda + temperatura	Mejora la precisión en la estimación de resistencia y permite predecir el momento óptimo de intervención
7	Elbakari & Shehata	2022	<i>Canadian Journal of Civil Engineering</i>	Método experimental para evaluar la durabilidad de juntas bajo sales y ciclos ambientales	Tipo de sal + ciclos FT/WD	La combinación de ciclos y sales (especialmente CaCl ₂) acelera el deterioro de juntas
8	Baral & Roesler	2023	<i>Transportation Research Record</i>	Monitoreo en tiempo real de propiedades a edad temprana para determinar corte de juntas	Tiempo de fraguado (tf) + SCM (fly ash - FA)	El corte debe definirse en función del fraguado; cortes tempranos generan <i>raveling</i>
9	Shafiee & Maadani	2022	<i>Canadian Journal of Civil Engineering</i>	Modelación de fisuración temprana bajo condiciones climáticas (HIPERPAV)	Temperatura + humedad + viento	La temperatura es el factor dominante en el riesgo de fisuración temprana
10	DeSantis <i>et al.</i>	2023	<i>Transportation Research Record</i>	Evaluación en campo de fisuración prematura en pavimentos urbanos	Activación de juntas y prácticas constructivas	57% de secciones con fisuración prematura asociada a deficiencias en corte y diseño
11	Chen <i>et al.</i>	2022	<i>Road Materials and Pavement Design</i>	Activación de juntas y espaciamiento en sobrelosas (NDT – MIRA)	Espaciamiento de juntas	Mayor espaciamiento → mayor activación (>95%); espaciamientos cortos → juntas no activadas
12	Tran & Roesler	2020	<i>Journal of Transportation Engineering (ASCE)</i>	Determinación del tiempo de corte mediante ultrasonido no contacto + visión computacional	tf (fraguado final) + RDI	ts = 1.3·tf + 39 min para minimizar <i>raveling</i>
13	Sok <i>et al.</i>	2020	ICE Transport	Decisión de corte de juntas en RCCP basada en espaciamiento de fisuras y LTE	Ls, LTE, abertura de fisura	Espaciamiento natural (≈8–36 m) no garantiza LTE → se requiere corte
14	Mahmood <i>et al.</i>	2025	<i>International Journal of Pavement Engineering</i>	Monitoreo <i>in situ</i> + método de madurez para definir corte	M(t), temperatura, resistencia	Predicción de resistencia ±10% → permite corte seguro
15	Song <i>et al.</i>	2022	<i>Sensors</i>	Ultrasonido sin contacto + daño real	VLR, E, daño (DI)	Corte óptimo ≈ 11.5 GPa

Análisis bibliométrico

El mapa de coautoría (Figura 2) evidencia la presencia de grupos de investigación relativamente aislados, con baja interconectividad entre autores. Se identifican *clusters* definidos y asociados a diferentes líneas de trabajo, indicando que la producción científica en este campo se ha desarrollado con poca colaboración entre grupos. Esta estructura muestra la ausencia de una red de investigación consolidada a nivel global sobre este tema, lo que puede limitar la integración de enfoques y el desarrollo de criterios unificados para la determinación de la ventana de corte en pavimentos de concreto.

Figura 2

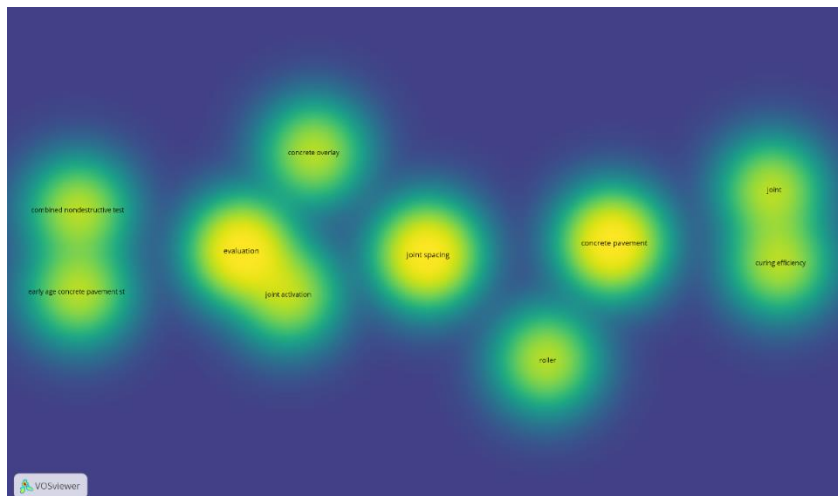
Autores con mayor producción



En caso de las palabras más frecuentes en los títulos (Figura 3), se puede observar que la investigación se concentra principalmente en cuatro ejes temáticos: la evaluación del comportamiento del pavimento, la activación de juntas, el espaciamiento de fisuras y el uso de técnicas no destructivas. Este resultado refleja un enfoque predominantemente aplicado, orientado al análisis de variables específicas del sistema. No obstante, se observa una limitada presencia de términos directamente relacionados con la determinación de la ventana de corte, demostrando que este problema ha sido abordado de manera indirecta a través de estudios parciales.

Figura 3

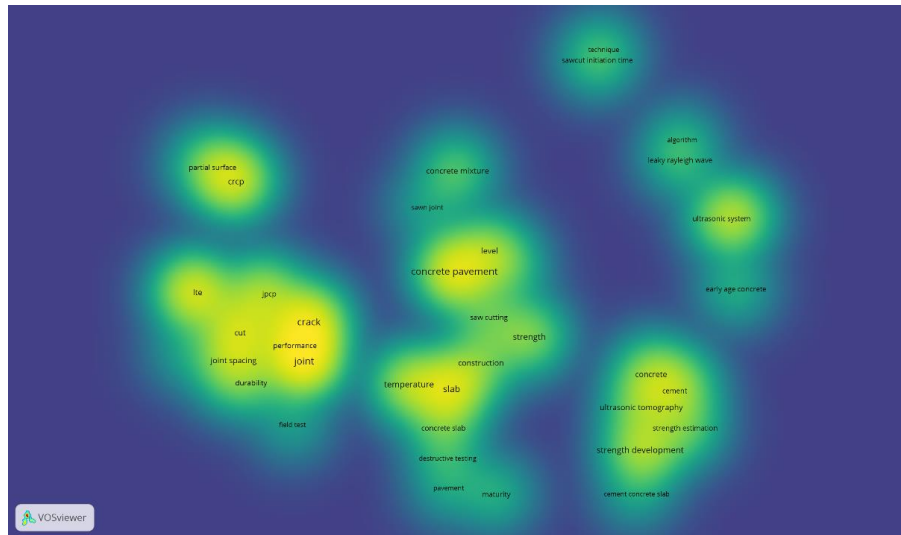
Palabras más frecuentes en los títulos



La Figura 4 muestra los términos más relevantes en los resúmenes, donde se evidencia una fuerte relación entre variables mecánicas (resistencia), condiciones ambientales (temperatura) y fenómenos físicos asociados a la fisuración (*crack*), así como elementos estructurales del pavimento (*joint slab*). Sin embargo, la determinación de la ventana de corte no aparece como un eje central de investigación, indicando un vacío en la literatura, donde los factores que controlan el comportamiento temprano del concreto han sido estudiados de forma aislada, sin integrarse plenamente en un criterio que permita definir de manera sistemática el momento óptimo de corte.

Figura 4

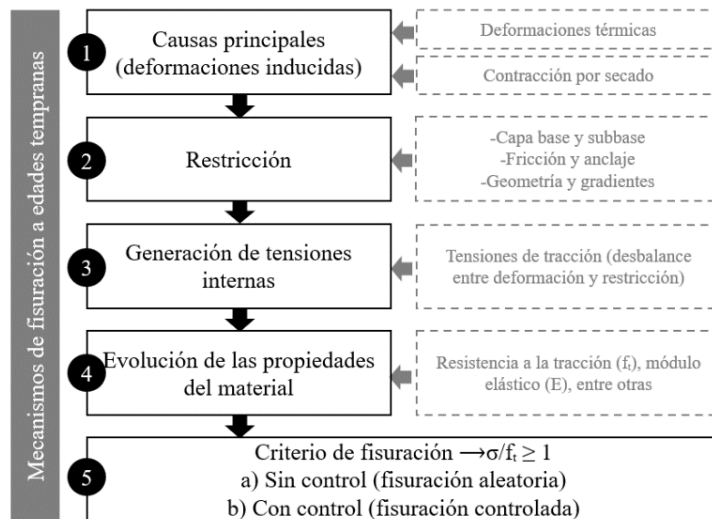
Palabras más frecuentes en los resúmenes



El análisis bibliométrico muestra una baja colaboración entre autores y un enfoque en líneas temáticas aisladas. Si bien se han estudiado ampliamente variables clave del comportamiento a edad temprana, como las propiedades mecánicas, las condiciones ambientales y los fenómenos de fisuración, la determinación de la ventana de corte no ha sido abordada de manera integrada como un eje central de investigación. Esto resalta la necesidad de un enfoque que relacione diferentes factores y permita establecer criterios más confiables para la definición del momento óptimo de corte en pavimentos de concreto.

Mecanismos de fisuración a edades tempranas

De los estudios revisados, se evidencia que la fisuración a edades tempranas en pavimentos de concreto resulta de la interacción entre deformaciones inducidas (principalmente térmicas y por secado) y el desarrollo de las propiedades mecánicas del material. Estas deformaciones, al estar parcialmente restringidas, generan tensiones internas que pueden superar la resistencia a tracción del concreto, generando fisuras (Figura 5). Los gradientes térmicos han sido identificados por Lin *et al.* (2020) como uno de los factores más influyentes, reportando que las condiciones ambientales no controladas pueden duplicar las deformaciones térmicas respecto a ambientes confinados, intensificando fenómenos de curvatura (*curling*) y aumentando las tensiones de tracción. En la misma línea, Shafiee & Maadani (2022) analizaron la fisuración mediante la relación de las tensiones inducidas y la resistencia a la tracción (σ/ft), donde se identificó a la temperatura ambiente como el factor dominante, con una influencia cercana al 49% en el desarrollo de tensiones. Adicionalmente, la contracción por secado contribuye a la acumulación de deformaciones, especialmente en la superficie, donde la pérdida de humedad es más significativa. Aunque su magnitud inicial es menor que la térmica, su efecto combinado resulta determinante en la generación de tensiones (Lin *et al.*, 2020), lo que evidencia que la fisuración no puede explicarse mediante un único mecanismo.

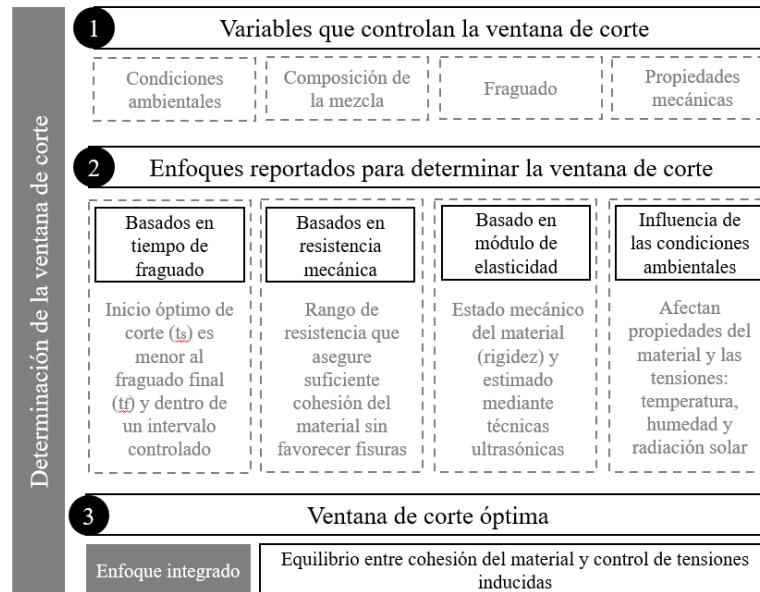
Figura 5*Mecanismos de fisuración*

Por otra parte, también se ha reportado que la susceptibilidad a la fisuración depende de la evolución de la resistencia mecánica y del estado de cohesión interna. Yami *et al.* (2024) mostraron que la resistencia mecánica, asociada a la madurez del concreto, define rangos críticos en los cuales el material comienza a resistir las tensiones inducidas. En este sentido, Baral & Roesler (2023) evidenciaron que mezclas con altos contenidos de ceniza volante (*fly ash*, FA) retrasan el fraguado, prolongando el periodo de vulnerabilidad y aumentando el riesgo de fisuración si no se ajustan los tiempos de intervención. Por último, Song *et al.* (2022) propusieron al módulo elástico como un indicador representativo, demostrando que la rigidez del material, estimada mediante técnicas ultrasónicas, está directamente relacionada con su capacidad para resistir daño y deformaciones, sugiriendo que la fisuración depende no solo de la resistencia mecánica, sino también de la evolución de la rigidez. En general, la literatura muestra que los mecanismos de fisuración a edades tempranas están controlados por varios factores relacionados, lo que limita la aplicabilidad de enfoques basados en variables únicas, resaltando la necesidad de estrategias integradas para el control de fisuración, como la ejecución del corte de juntas.

Determinación de la ventana de corte

Si bien el momento de corte de juntas en pavimentos de concreto se define principalmente en función del tiempo transcurrido desde la colocación, este criterio no necesariamente representa el comportamiento real del concreto a edades tempranas. Esto se debe a que no se considera la influencia de otras variables, como las condiciones ambientales, la composición de la mezcla, el fraguado, la resistencia mecánica y el módulo elástico, las cuales controlan la evolución del material y su respuesta frente al corte (Figura 6). Por ejemplo, Baral & Roesler (2023) reportaron retrasos significativos en el fraguado de pavimentos con FA, lo que desplaza la ventana de corte hacia tiempos mayores. Por tanto, el uso de valores de tiempo fijos puede generar cortes prematuros, provocando *raveling*, o cortes tardíos, favoreciendo la formación de fisuras aleatorias. A continuación, se presentan los principales enfoques reportados en la literatura para la determinación de la ventana de corte.

Figura 6
Determinación de la ventana de corte



Enfoques basados en tiempo de fraguado

El tiempo de fraguado ha sido identificado como un parámetro clave para la estimación del momento adecuado de corte, ya que marca la transición del concreto desde un estado plástico a uno sólido, asociado al inicio de su comportamiento mecánico. Baral & Roesler (2023) demostraron que este parámetro está fuertemente influenciado por la composición de la mezcla, especialmente en sistemas con altos contenidos de materiales cementicios suplementarios (*supplementary cementitious materials*, SCM), prolongando el periodo en el cual el material es vulnerable al daño superficial y desplazando la ventana de corte hacia tiempos mayores. De manera complementaria, Tran & Roesler (2020) establecieron una relación cuantitativa entre el tiempo de fraguado final (t_f) y el momento óptimo de inicio de corte (t_s), proponiendo que el corte debe realizarse después del fraguado final, pero dentro de un intervalo controlado que minimice el *raveling* sin favorecer la formación de fisuras aleatorias. Sin embargo, el uso del tiempo de fraguado como criterio único presenta limitaciones, ya que no incorpora directamente el desarrollo de la resistencia ni la rigidez del material, lo que restringe su capacidad para representar completamente el estado mecánico del concreto en el momento del corte.

La Tabla 2 presenta una síntesis comparativa de datos experimentales reportados en ambos estudios, incluyendo tiempos de fraguado, tiempos de corte recomendados y, cuando está disponible, el momento real de corte ejecutado en campo. Se observa una relación consistente entre t_f y t_s , donde el corte se realiza prematuramente respecto a los valores recomendados, generando daños superficiales.

Tabla 2*Ventana de corte basada en el tiempo de fraguado del concreto*

Mezcla	tf (h)	Ts recomendado (h)	ts (min)	Corte real (h)	Referencia
Control (campo)	4.2	6.11	367	4.4	Baral & Roesler (2023)
HVFAC (campo)	>7.0	>9.75 (~10)	>585	5.6–6.3	Baral & Roesler (2023)
Control (lab, UTS)	5.4	7.7	462	—	Baral & Roesler (2023)
Control (lab, calorimetría)	5.7	8.06	484	—	Baral & Roesler (2023)
HVFAC (lab, UTS)	14	18.85	1131	—	Baral & Roesler (2023)
HVFAC (lab, calorimetría)	15.2	20.41	1225	—	Baral & Roesler (2023)
C-39	4.6	6.63	398	—	Tran & Roesler (2020)
C-45	5.52	7.82	469	—	Tran & Roesler (2020)
C-50	6.73	9.4	564	—	Tran & Roesler (2020)
C-FA-39	4.33	6.28	377	—	Tran & Roesler (2020)
C-FA-45	6.6	9.23	554	—	Tran & Roesler (2020)
C-FA-50	7.4	10.27	616	—	Tran & Roesler (2020)

Enfoques basados en resistencia mecánica

A medida que el concreto desarrolla resistencia mecánica, aumenta su capacidad para resistir tanto las tensiones inducidas como el daño superficial asociado al corte. Yami *et al.* (2024) propusieron rangos de resistencia entre 5 y 8 MPa como condiciones óptimas para la ejecución del corte, basándose en el método de madurez. Estos valores representan un equilibrio en el cual el material presenta suficiente cohesión interna para evitar el *raveling*, sin favorecer la formación de fisuras no controladas. Por su parte, Kosar *et al.* (2023a) demostraron que la resistencia a edades tempranas puede presentar alta variabilidad dentro del pavimento, lo que implica que el momento óptimo de corte no es uniforme en toda la superficie del pavimento. Por lo que el uso de valores promedio puede conducir a decisiones no representativas del estado real del material. En este sentido, Kosar *et al.* (2023b) evidenciaron que la combinación de métodos no destructivos, como el método de madurez y el ultrasonido, mejora significativamente la estimación de la resistencia mecánica en campo, integrando tanto la capacidad predictiva como la evaluación local.

La Tabla 3 presenta un resumen de los parámetros utilizados, los rangos o umbrales propuestos y los métodos de estimación asociados en los enfoques basados en resistencia mecánica. Esta comparación permite evidenciar la transición desde criterios basados en resistencia directa hacia enfoques indirectos e integrados, así como las limitaciones inherentes a cada metodología en la determinación del momento óptimo de corte.

Tabla 3

Enfoques basados en resistencia mecánica para la determinación de la ventana de corte en pavimentos de concreto

Tipo de resistencia	Umbral (MPa)	Método de estimación	Variable asociada	Criterio de corte / ventana	Referencia
Inferida mediante método de madurez	5–8	Madurez + resistencia a penetración	°C·h	670–760 °C·h (20°C) 1130–1754 °C·h (baja T)	Yami <i>et al.</i> (2024)
Compresión	8.2–24.1	Ensayo destructivo (normativo)	Edad (h)	Apertura cuando se alcanza resistencia mínima	Kosar <i>et al.</i> (2023a)
Compresión / flexión	≈20.7 (caso de aplicación)	Ultrasonido + madurez	Velocidad de onda (m/s) + °C·h	Corte basado en resistencia estimada en campo	Kosar <i>et al.</i> (2023b)

Enfoques basados en el módulo elástico

Song *et al.* (2022) demostraron que el módulo elástico del concreto a edades tempranas puede estimarse mediante técnicas ultrasónicas sin contacto, estableciendo una relación directa entre la velocidad de propagación de ondas tipo *leaky Rayleigh* y la rigidez del material. A partir de ensayos experimentales y análisis del daño superficial, los autores identificaron que el corte óptimo se alcanza cuando el módulo elástico del concreto se encuentra aproximadamente en el rango de 10.5 a 12.2 GPa, con un valor óptimo cercano a 11.5 GPa, asociado a un índice de daño inferior al 1%. En particular, se observó que valores cercanos a 10.5 GPa corresponden al inicio de la propagación de ondas (inicio de rigidez efectiva), donde aún existe aproximadamente un 5% de daño por *raveling*, mientras que a 11.3–11.6 GPa se identifica un punto de inflexión en el comportamiento del daño, marcando una transición hacia condiciones seguras de corte. Este enfoque se diferencia de aquellos basados únicamente en el tiempo, ya que el módulo elástico integra el estado mecánico global del material, incluyendo la evolución de la rigidez, la capacidad de transmisión de esfuerzos y el desarrollo de la cohesión interna. Sin embargo, su aplicación en campo depende de la disponibilidad de técnicas de medición especializadas y de una adecuada calibración de la relación entre velocidad de onda y propiedades mecánicas, lo que puede limitar su implementación práctica como criterio único.

Influencia de las condiciones ambientales

Shafiee & Maadani (2022) demostraron que las condiciones ambientales son determinantes en la definición de la ventana de corte, siendo la temperatura ambiente el factor dominante en la generación de tensiones tempranas en el concreto. A partir de un análisis de sensibilidad basado en modelos mecánicos (HIPERPAV), los autores identificaron que la temperatura del aire presenta el mayor impacto sobre el riesgo de fisuración, con un índice de sensibilidad cercano al 49%, superando significativamente a otras variables como la humedad, la velocidad del viento o la cobertura nubosa. Por otro lado, se observó que incrementos en la temperatura máxima diaria (HDT) conducen a un aumento simultáneo de la resistencia temprana y de las tensiones inducidas, lo que puede resultar en un incremento del riesgo de fisuración a edades tempranas. Por ejemplo, bajo escenarios de cambio climático, el riesgo de fisuración se incrementa de aproximadamente 49.2% en condiciones históricas a 53.2% en escenarios futuros, evidenciando la fuerte dependencia del comportamiento del concreto con las condiciones térmicas. En este contexto, la ventana de corte no puede definirse como un intervalo fijo, sino como una función dependiente de variables ambientales como la temperatura, la humedad, la radiación solar y las condiciones de viento. Estas

variables controlan simultáneamente el fraguado, el desarrollo de la resistencia mecánica y la generación de tensiones térmicas y de retracción, determinando así el equilibrio crítico entre cohesión interna y riesgo de fisuración en el concreto.

Métodos de evaluación en campo

Un aspecto que se resalta para la determinación adecuada del momento óptimo de corte de juntas es la evaluación del estado del concreto en condiciones reales de obra, una vez que los enfoques basados en tiempo transcurrido o en laboratorio representan varias limitaciones. Por ello, se han desarrollado diversos métodos de evaluación en campo que permiten estimar el desarrollo de propiedades mecánicas a edades tempranas, cuyos detalles se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4

Métodos de evaluación en campo

Método	Propiedades evaluadas	Tipo	Variabilidad espacial	Información en tiempo real	Facilidad de implementación	Costo
Madurez	Resistencia mecánica	Indirecto	Baja	Parcial	Alta	Bajo
Ultrasónico	Resistencia mecánica (módulo de elasticidad)	Directo	Alta	Inmediata	Media	Medio
Monitoreo/sensores	Temperatura, deformación, etc.	Directo	Alta	Continua	Media - baja	Alto

Método de madurez

El método de madurez es una de las técnicas más utilizadas para estimar el desarrollo de la resistencia del concreto en función del comportamiento térmico del material. Este enfoque permite relacionar la evolución de la temperatura con el incremento de la resistencia mecánica, proporcionando una herramienta práctica para la toma de decisiones en obra. Yami *et al.* (2024) demostraron que la madurez puede emplearse para definir rangos de resistencia adecuados para la ejecución del corte. Mahmood *et al.* (2025) también validaron la aplicabilidad del método en condiciones reales de campo, mostrando una precisión del orden de $\pm 10\%$ en la predicción de la resistencia mecánica. Sin embargo, los autores indicaron que el método de madurez presenta limitaciones importantes, ya que proporciona una estimación promedio del comportamiento del material y no captura la variabilidad espacial, lo que puede afectar la precisión en la determinación del momento óptimo de corte.

Técnicas ultrasónicas

Las técnicas ultrasónicas permiten evaluar de forma no destructiva el estado del concreto a edades tempranas mediante la propagación de ondas cuya velocidad se relaciona con sus propiedades mecánicas. Kosar *et al.* (2023a) mostraron que la velocidad ultrasónica se correlaciona directamente con el desarrollo de la resistencia mecánica, destacando además su capacidad para detectar variaciones espaciales dentro del pavimento. Por su parte, Song *et al.* (2022) demostraron que estas técnicas permiten estimar el módulo elástico del concreto y establecer condiciones

adecuadas para la ejecución del corte. Adicionalmente, Baral & Roesler (2023) y Tran & Roesler (2020) evidenciaron que el uso de ultrasonido sin contacto permite identificar el tiempo de fraguado y evaluar el *raveling*, proporcionando información clave para definir la ventana de corte de manera objetiva.

Sistemas de monitoreo y sensores en tiempo real

Algunos estudios han propuesto el uso de sistemas de monitoreo en tiempo real basados en sensores internos en el concreto, capaces de registrar variables como temperatura, deformaciones y evolución de propiedades mecánicas, características importantes para la determinación de la ventana de corte. Mahmood *et al.* (2025) demostraron que el uso de sensores integrados permite monitorear simultáneamente la temperatura y las deformaciones, facilitando la estimación de la resistencia mediante el método de madurez en condiciones reales de servicio. Song *et al.* (2022) evidenciaron que sistemas inalámbricos y sin contacto pueden proporcionar información en tiempo real sobre el estado mecánico del material, mejorando la toma de decisiones en obra. En general, este enfoque permite implementar estrategias de control más precisas y adaptadas a las condiciones reales del pavimento.

A pesar de los avances en los métodos de evaluación en campo, aún existen desafíos importantes para su implementación. Kosar *et al.* (2023b) señalaron que ningún método por sí solo es suficiente para caracterizar completamente el comportamiento del concreto a edades tempranas, recomendando la combinación de técnicas para mejorar la precisión y confiabilidad de las estimaciones. Entre las principales limitaciones se encuentran la necesidad de calibración previa de los modelos, especialmente en el método de madurez, la sensibilidad de los resultados a las condiciones ambientales, la dependencia de equipos especializados en técnicas ultrasónicas y la dificultad para capturar simultáneamente la variabilidad espacial y temporal del material.

Activación de juntas y control de fisuración

El objetivo principal del corte de juntas en pavimentos de concreto es inducir la formación de fisuras en ubicaciones predeterminadas, permitiendo controlar su espaciamiento, orientación y apertura. Sin embargo, la efectividad de este mecanismo no depende únicamente del momento de corte, sino de la activación real de la junta, es decir, de la formación efectiva de una fisura debajo del corte. El corte de juntas actúa como una discontinuidad geométrica que genera concentraciones de tensiones, promoviendo la iniciación de fisuras en su ubicación. La Figura 7 presenta el detalle reportado en la literatura sobre la activación de juntas y el control de fisuración.

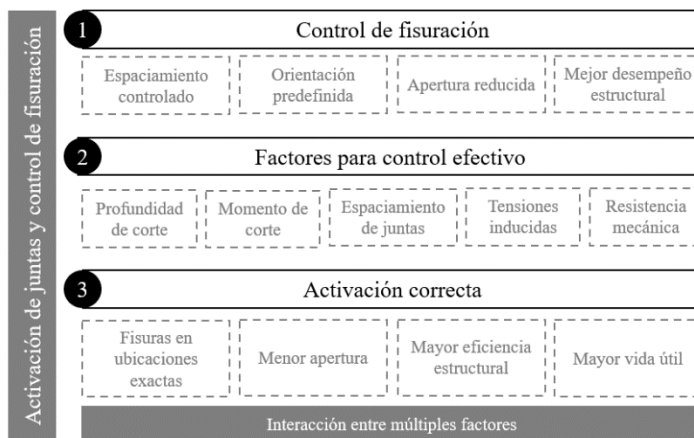
Kashif *et al.* (2021) demostraron que los cortes superficiales parciales (*partial saw-cuts*) inducen fisuras mediante la reducción de la sección efectiva del material, generando un punto preferencial de falla. Igualmente, la profundidad del corte se identifica como un parámetro importante, ya que mayores profundidades incrementan la probabilidad de inducir fisuras en la ubicación deseada, mejorando el control del patrón de fisuración. Por tanto, el corte no solo controla la localización de las fisuras, sino que también participa activamente en su formación.

A pesar de la ejecución del corte, no todas las juntas se activan correctamente. DeSantis *et al.* (2023), a partir de evaluaciones en pavimentos reales, evidenciaron que una proporción significativa de juntas no presenta fisuración efectiva, lo que conduce a la aparición de fisuras aleatorias. Este comportamiento indica que la presencia de una junta no garantiza su funcionamiento, siendo necesario que las tensiones inducidas superen localmente la resistencia del concreto. En consecuencia, una junta no activada se comporta como una sección continua, incrementando el tamaño efectivo del elemento y las tensiones internas. Por otro lado, Chen *et al.* (2022) demostraron que espaciamientos excesivamente cortos pueden reducir la probabilidad de activación, debido a que las tensiones generadas por contracción no son suficientes para inducir fisuras en cada junta. Este resultado evidencia que un

mayor número de juntas no necesariamente mejora el control de fisuración. Por el contrario, un espaciamiento inadecuado puede disminuir la eficiencia del sistema y favorecer la formación de fisuras no controladas.

Figura 7

Activación de juntas y control de fisuración



En ausencia de corte, las fisuras se desarrollan de manera natural, con espaciamientos significativamente mayores. Sok *et al.* (2020) reportaron que, en pavimentos de concreto compactado con rodillo (*roller-compacted concrete*, RCC), el espaciamiento de fisuras puede alcanzar valores entre 15 y 23 m, lo que incrementa la apertura de fisura. Este fenómeno afecta directamente la eficiencia de transferencia de carga (*load transfer efficiency*, LTE), reduciendo la capacidad estructural del pavimento. En contraste, el corte de juntas permite controlar el espaciamiento y la apertura de fisuras, mejorando el desempeño estructural.

En general, los estudios muestran que el control de fisuración no depende únicamente de la ejecución del corte, sino de la interacción entre múltiples factores, incluyendo la profundidad y el momento de corte, el espaciamiento entre juntas y la capacidad del sistema para inducir la fisura en la ubicación deseada. Por tanto, el control efectivo de fisuración está condicionado por la correcta inducción y activación de las juntas, así como por su impacto en el desempeño estructural del pavimento.

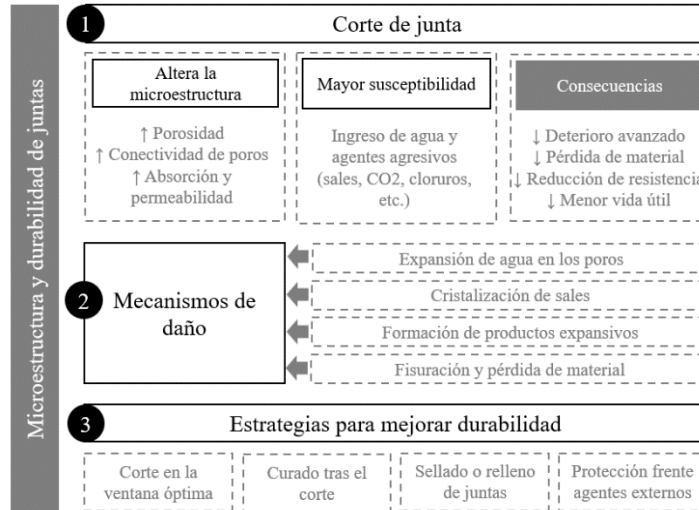
Microestructura y durabilidad de juntas

Las juntas en pavimentos de concreto constituyen una de las zonas más críticas desde el punto de vista de durabilidad, debido a su exposición directa al ambiente y a las modificaciones microestructurales inducidas por el proceso de corte. A diferencia del material interno, las superficies generadas presentan mayor porosidad, absorción y susceptibilidad al ingreso de agentes agresivos. La Figura 8 resume los mecanismos y estrategias respecto a la durabilidad de juntas reportadas en la literatura.

Tiznobaik & Bassuoni (2019) demostraron que estas zonas presentan una microestructura más porosa debido a la pérdida de humedad posterior al corte, favoreciendo la formación de una red de poros más conectada y la exposición de la zona de transición interfacial (*interfacial transition zone*, ITZ). Como consecuencia, las juntas presentan mayor absorción y permeabilidad, facilitando el ingreso de agua y agentes agresivos. En particular, las juntas sin tratamiento muestran valores de absorción significativamente superiores respecto a aquellas con curado o sellado

adecuado, lo que las convierte en puntos críticos de deterioro. En contraste, el uso de compuestos de curado o relleno de juntas permite reducir la porosidad y mejorar la densidad del material en esta región.

Figura 8
Durabilidad de juntas



Por otra parte, Elbakari & Shehata (2022) demostraron que la acumulación de sales descongelantes, combinada con ciclos de congelamiento y deshielo (*freeze-thaw*), intensifica significativamente el deterioro en las zonas de junta. Los mecanismos de daño incluyen la expansión del agua en los poros, la cristalización de sales y la formación de compuestos expansivos como el oxicloruro de calcio, lo que conduce a fisuración, pérdida de material y reducción de la resistencia mecánica. Además, la combinación de ciclos de congelamiento y deshielo y humedecimiento y secado (*wet-dry*) produce un deterioro más severo que el congelamiento aislado, evidenciando la importancia de considerar condiciones ambientales combinadas.

Este comportamiento también ha sido observado en condiciones reales de servicio. Por ejemplo, DeSantis *et al.* (2023) reportaron deterioro prematuro en zonas de junta, asociado tanto a problemas de activación como a la exposición ambiental. Si bien el proceso de corte es necesario para el control de fisuración, introduce una heterogeneidad microestructural que puede comprometer la durabilidad del pavimento si no se implementan estrategias adecuadas de protección y mantenimiento.

Influencia de materiales sostenibles

El uso de SCMs y cementos de bajo impacto ambiental ha ganado relevancia en pavimentos de concreto debido a sus beneficios en desempeño y reducción del consumo de cemento Portland. No obstante, estos materiales modifican significativamente el comportamiento a edades tempranas, afectando directamente la determinación de la ventana de corte. Baral & Roesler (2023) demostraron que mezclas con altos contenidos de FA presentan incrementos significativos en el tiempo de fraguado, prolongando el periodo en el cual el concreto mantiene baja cohesión interna. Esto extiende el intervalo de vulnerabilidad frente al daño superficial y desplaza la ventana de corte hacia tiempos mayores, lo que hace inadecuada la aplicación de criterios basados en tiempos predefinidos para mezclas convencionales. En contraste, cementos alternativos como los sulfoaluminatos de calcio belítico (*belitic calcium sulfoaluminate*, BCSA) presentan un desarrollo acelerado de propiedades mecánicas. Mahmood *et al.*

(2025) evidenciaron que estos sistemas pueden alcanzar resistencias adecuadas en pocas horas, reduciendo significativamente los tiempos de intervención. Además, presentan menores deformaciones por contracción en etapas tempranas, lo que puede disminuir el riesgo de fisuración. Sin embargo, la rápida evolución de sus propiedades genera una ventana de corte más estrecha, que requiere un control más preciso en tiempo real. Por tanto, la ventana de corte no puede definirse de manera independiente del material, sino que debe adaptarse a su cinética de hidratación y al desarrollo de sus propiedades mecánicas.

3. Discusión general

El análisis de los estudios muestra que la determinación de la ventana de corte en pavimentos de concreto ha sido tradicionalmente abordada mediante enfoques parciales, basados en variables individuales como el tiempo, la resistencia mecánica o el fraguado. Sin embargo, los resultados obtenidos en la revisión muestran que estos enfoques son insuficientes cuando se consideran de manera aislada, ya que no capturan la complejidad del comportamiento del concreto a edades tempranas. En particular, se ha demostrado que las condiciones ambientales, especialmente la temperatura, controlan simultáneamente el desarrollo de deformaciones y tensiones en el concreto (Lin *et al.*, 2020; Shafiee & Maadani, 2022), mientras que la composición de la mezcla influye directamente en la cinética de hidratación y el tiempo de fraguado (Baral & Roesler, 2023). Esta interacción define el contexto inicial en el cual evoluciona el material, condicionando la ventana de tiempo disponible para la ejecución del corte. Por tanto, los criterios empíricos basados únicamente en el tiempo transcurrido desde la colocación no constituyen un indicador confiable para la definición de la ventana de corte, debido a la limitación de representar el estado real del concreto. El fraguado marca el inicio del comportamiento mecánico del concreto, pero no es suficiente para garantizar un desempeño adecuado durante el corte. Se ha demostrado que el momento óptimo de intervención ocurre después del fraguado final, dentro de un intervalo en el cual se minimiza el *raveling* y se evita la formación de fisuras aleatorias (Tran & Roesler, 2020). Este comportamiento está directamente relacionado con el desarrollo de la resistencia y la rigidez del material, parámetros que evolucionan de manera no lineal durante las primeras horas (Yami *et al.*, 2024; Song *et al.*, 2022). Igualmente, se ha evidenciado que la resistencia a edades tempranas presenta variabilidad espacial dentro del elemento, lo que implica que el estado del concreto no es uniforme en toda la superficie del pavimento (Kosar *et al.*, 2023a). En este sentido, el uso de métodos de evaluación en campo, como la combinación de técnicas no destructivas, permite mejorar la estimación del estado real del material y, por tanto, la definición de la ventana de corte (Kosar *et al.*, 2023b; Mahmood *et al.*, 2025). La revisión muestra que la integración de técnicas ultrasónicas, métodos de madurez, sensores embebidos y sistemas de monitoreo en tiempo real constituye actualmente el enfoque más completo para la toma de decisiones en campo, al permitir capturar simultáneamente la evolución temporal y la variabilidad espacial del concreto.

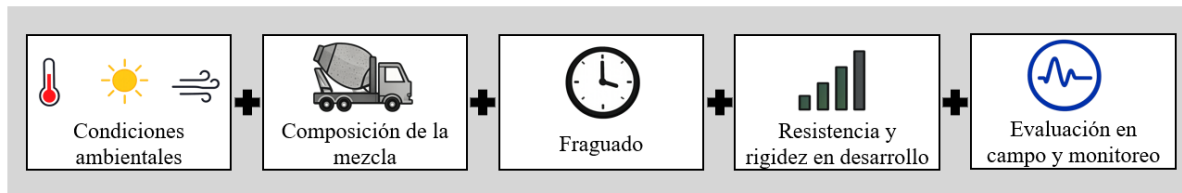
Por otro lado, el corte de juntas no garantiza por sí solo el control de la fisuración. La literatura muestra que la efectividad del sistema depende de la activación real de las juntas, es decir, de la formación efectiva de fisuras en las ubicaciones deseadas. En ese sentido, factores como la profundidad del corte (Kashif *et al.*, 2021), el espaciamiento entre juntas (Chen *et al.*, 2022) y la adecuada ejecución en obra (DeSantis *et al.*, 2023) son determinantes en el comportamiento del pavimento. Adicionalmente, el proceso de corte introduce modificaciones en la microestructura del concreto, generando zonas con mayor porosidad y susceptibilidad al ingreso de agentes agresivos (Tiznobaik & Bassuoni, 2019). Estas condiciones, combinadas con la exposición a sales y ciclos de congelamiento y deshielo, pueden acelerar el deterioro de las juntas y afectar la durabilidad del pavimento (Elbakari & Shehata, 2022). En consecuencia, la influencia de la ventana de corte no se limita al control de las tensiones y la

fisuración temprana, ya que también condiciona la evolución microestructural y el desempeño durable de las zonas de junta durante la vida útil del pavimento.

La ventana de corte de forma global es una función del estado progresivo del concreto, condicionada por la interacción entre las condiciones ambientales, la composición de la mezcla y el desarrollo de sus propiedades mecánicas. Por tanto, la toma de decisiones debe basarse en el uso de técnicas de monitoreo en tiempo real y la combinación de métodos de evaluación que permitan mejorar la precisión en la determinación del momento óptimo de corte (Figura 9), facilitando la adaptación de las decisiones constructivas a las condiciones específicas de cada proyecto.

Figura 9

Factores importantes para la determinación de la ventana óptima de corte



Finalmente, puede establecerse una relación conceptual directa entre la determinación de la ventana de corte y los factores que la condicionan. En el primer caso (Figura 6), se muestra que la ventana de corte está controlada por la interacción entre el fraguado, las propiedades mecánicas, las condiciones ambientales y la composición de la mezcla, mientras que la Figura 9 muestra cómo estas variables pueden integrarse en la práctica mediante métodos de evaluación en campo y monitoreo continuo. En este sentido, la transición desde un enfoque teórico hacia una aplicación efectiva en obra depende de la capacidad de evaluar el estado real del concreto mediante técnicas no destructivas, sensores y sistemas de adquisición de datos en tiempo real. Por tanto, el monitoreo in situ constituye una relación fundamental entre la comprensión de los mecanismos que gobiernan la ventana de corte y la toma de decisiones constructivas bajo condiciones reales de servicio.

4. Conclusión

La presente RSL evidencia que la determinación de la ventana de corte en pavimentos de concreto no puede basarse únicamente en criterios empíricos, como el tiempo transcurrido desde la colocación, debido a la complejidad del comportamiento del material a edades tempranas. Los resultados muestran que los enfoques basados exclusivamente en el tiempo son insuficientes para representar el estado real del concreto y, por tanto, no constituyen una base confiable para la definición del momento óptimo de corte. En particular, se identificó que la evolución del concreto, en términos de fraguado, resistencia mecánica y rigidez, condiciona directamente su respuesta frente al corte y el control de la fisuración.

Adicionalmente, el desempeño del sistema de juntas depende no solo del momento de corte, sino de su activación efectiva y de parámetros de diseño como la profundidad y el espaciamiento, los cuales influyen en la formación y localización de fisuras. El proceso de corte introduce modificaciones microestructurales que pueden comprometer la durabilidad, evidenciando un compromiso entre el control de fisuración y el desempeño a largo plazo. En este sentido, la revisión demuestra que la ventana de corte debe ser entendida no solo como una herramienta para

controlar tensiones y fisuras tempranas, sino también como un factor que influye directamente en la evolución microestructural y la durabilidad futura de las juntas.

Finalmente, los resultados destacan la importancia de emplear parámetros medibles en campo y herramientas de monitoreo para mejorar la precisión en la determinación del momento de corte. La integración de técnicas no destructivas, sensores y sistemas de monitoreo en tiempo real representa actualmente el enfoque más completo para la toma de decisiones en obra, al permitir capturar la variabilidad espacial y temporal del concreto. Además, se identifica como una línea prioritaria de investigación futura el desarrollo de metodologías integradas que permitan transferir estos criterios a condiciones reales de servicio y a mezclas con materiales sostenibles.

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

5. Referencias bibliográficas

- Abadin, M. J., Kadir, A., Roy, S. K., Wei, Z. Z., & Rahman, M. W. (2025). First experiences with continuously reinforced concrete pavement in national highway of Bangladesh. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 18(1), 114-141.
- Baral, A., & Roesler, J. R. (2023). Early age monitoring of high cement replacement mixtures for pavement. *Transportation Research Record*, 2677(1), 1646-1657.
- Bautista, F. E., & Basheer, I. (2008). Jointed plain concrete pavement (JPCP) preservation and rehabilitation design guide. California Department of Transportation.
- Chen, Y. A., Taylor, P. C., Ceylan, H., & Wang, X. (2022). Evaluation of joint activation and joint spacing in concrete overlays. *Road Materials and Pavement Design*, 23(12), 2914-2923.
- Chigbu, U. E., Atiku, S. O., & Du Plessis, C. C. (2023). The science of literature reviews: Searching, identifying, selecting, and synthesising. *Publications*, 11(1), 2.
- Darnell, M., & Vandenbossche, J. (2026). Impact of Fatigue Exposure on Extensibility Performance of Standard Joint Reservoir and Sealant Designs for Jointed Plain Concrete Pavements. *Transportation Research Record*, 03611981261425974.
- DeSantis, J. W., Roesler, J., & Cantu, R. M. (2023). Assessing Premature Cracks in Urban Concrete Pavements. *Transportation Research Record*, 2677(5), 367-375.
- Elbakari, R., & Shehata, M. H. (2022). A proposed laboratory method to evaluate the durability of concrete pavement joints against freezing in the presence of deicer salts. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 49(8), 1351-1365.
- Hong, M., Lei, D., Hu, F., & Chen, Z. (2023). Assessment of void and crack defects in early-age concrete. *Journal of Building Engineering*, 70, 106372.
- Jamieson, S., & White, G. (2023). Review of rigid aircraft pavement joint types, effectiveness, distress, maintenance, and analysis. In *Airfield and Highway Pavements 2023* (pp. 9-21).
- Kashif, M., Naseem, A., Iqbal, N., De Winne, P., & De Backer, H. (2021). Evaluating the early-age crack induction in advanced reinforced concrete pavement using partial surface saw-cuts. *Applied Sciences*, 11(4), 1659.
- Kosar, K., de Salles, L. S., Sharifi, N. P., Vandenbossche, J., & Khazanovich, L. (2023a). Onsite strength determination for early-opening decision making of high early strength concrete pavement. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 10(2), 291-303.
- Kosar, K., Khazanovich, L., & Salles, L. (2023b). Evaluation of early age concrete pavement strength by combined nondestructive tests. *Applied Sciences*, 13(4), 2240.
- Lin, W., Yi, J. H., Hwang, H. S., Jabonero, C., Ryu, S. W., & Cho, Y. H. (2020). Early age behavior of jointed plain concrete pavement inside tunnel. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(4), 1159-1168.

- Lu, L., Zhao, D., Fan, J., & Li, G. (2022). A brief review of sealants for cement concrete pavement joints and cracks. *Road Materials and Pavement Design*, 23(7), 1467-1491.
- Mahmood, A. H., Hampton, I., Bescher, E., Pang, L., & Castel, A. (2025). On-site strain and temperature monitoring of belitic calcium sulfoaluminate cement concrete airport slabs: feasibility of maturity method. *International Journal of Pavement Engineering*, 26(1), 2518153.
- Qu, Z., Zhang, Y., Liu, Z., Si, R., & Wu, J. (2024). A review on early-age cracking of concrete: Causes and control. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03848.
- Raoufi, K., Radlinska, A., Nantung, T., & Weiss, J. (2008). Methodology for determining the timing of saw cutting in concrete pavements. *Transportation Research Record*, 2081(1), 110-117.
- Safiuddin, M., Kaish, A. A., Woon, C. O., & Raman, S. N. (2018). Early-age cracking in concrete: Causes, consequences, remedial measures, and recommendations. *Applied Sciences*, 8(10), 1730.
- Shafiee, M., & Maadani, O. (2022). Investigation of climate change impacts on early-age cracking of jointed plain concrete pavements in Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 49(7), 1121-1127.
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of business research*, 104, 333-339.
- Sok, T., Hong, S. J., Kim, Y. K., & Lee, S. W. (2020). Saw cutting (or not) of joint spacing in roller-compacted concrete pavement. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport*, 173(3), 195–206.
- Song, H., Hong, J., Yoon, Y. G., Choi, H., & Oh, T. (2022). Application of a Wireless and Contactless Ultrasonic System to Evaluate Optimal Sawcut Time for Concrete Pavements. *Sensors*, 22(18), 7030.
- Tiznobaik, M., & Bassuoni, M. T. (2019). Investigation into enhancing and evaluating curing efficiency of joints in concrete pavements. *Road Materials and Pavement Design*, 20(3), 639-655.
- Tran, Q., & Roesler, J. R. (2020). Noncontact ultrasonic and computer vision assessment for sawcut initiation time. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 146(3), 04020055.
- Yami, Y. A., Lin, W., Hwang, H., Roh, S., & Cho, Y. (2024). An Improved Approach for Determining Joint Cutting Window Integrating Penetration Resistance-Maturity and Strength-Maturity Relationships. *Construction and Building Materials*, 444, 137613.
- Zhang, J., Zhang, G., Wang, Y., & Yuan, J. (2022). Mechanical behavior of doweled joints in concrete pavements: A review. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 148(4), 03122002..