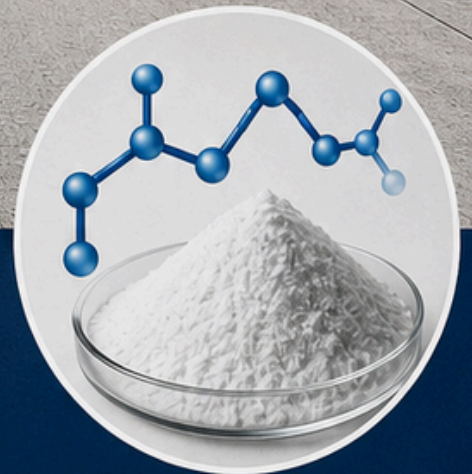


MENOS FISURAS, MAYOR RESISTENCIA

Innovación con poliacrilato de sodio
en concretos para pavimentos rígidos
de alta durabilidad



Fidel Castro Cayllahua, Aron Jhonatan Aliaga Contreras, Carlos Alberto Jesus Sedano, Severo Simeon Calderon Samaniego, Carlos Rosario Sanchez Guzman, Yina Milagro Ninahuanca Zavala

Menos fisuras, mayor resistencia

Innovación con poliacrilato de sodio en concretos para pavimentos rígidos de alta durabilidad

Editor



Fidel Castro Cayllahua

d.fcastro@ms.upla.edu.pe

 <https://orcid.org/0000-0001-8521-8524>

Universidad Peruana Los Andes, Lima – Perú

Aron Jhonatan Aliaga Contreras

aaliagacontreras@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-5789-1946>

Universidad Continental, Lima - Perú

Carlos Alberto Jesus Sedano

cjesusedano@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0003-1014-6791>

Universidad Peruana Los Andes, Lima - Perú

Severo Simeon Calderon Samaniego

d.scalderon@upla.edu.pe

 <https://orcid.org/0000-0001-9758-699X>

Universidad Peruana Los Andes, Lima - Perú

Carlos Rosario Sanchez Guzman

d.csanchez@ms.upla.edu.pe

 <https://orcid.org/0000-0002-5694-9077>

Universidad Peruana Los Andes, Lima - Perú

Yina Milagro Ninahuanca Zavala

d.yninahuanca@ms.upla.edu.pe

 <https://orcid.org/0000-0002-5907-6574>

Universidad Peruana Los Andes, Lima - Perú

RESEÑA

Menos fisuras, mayor resistencia: innovación con poliacrilato de sodio en concretos para pavimentos rígidos de alta durabilidad es una obra especializada que explora el potencial de los polímeros superabsorbentes, particularmente el poliacrilato de sodio, como alternativa innovadora para mejorar el desempeño del concreto utilizado en infraestructura vial. A través de una combinación de fundamentos teóricos, revisión científica y evidencia experimental, el libro analiza cómo la incorporación de este material puede contribuir a reducir la fisuración por contracción plástica y fortalecer propiedades mecánicas esenciales para la construcción de pavimentos rígidos más durables.

La obra inicia con una revisión exhaustiva de los principios que sustentan el uso del poliacrilato de sodio en la ingeniería del concreto, abordando su composición, propiedades físico-químicas, mecanismos de absorción y liberación de agua, aplicaciones en materiales cementicios y avances recientes en el campo de los polímeros superabsorbentes. Este análisis permite comprender el papel que desempeña el curado interno como estrategia para optimizar los procesos de hidratación y mejorar la calidad microestructural del concreto.

Posteriormente, el libro profundiza en los fenómenos asociados a la fisuración por contracción plástica y al comportamiento mecánico del concreto, desarrollando conceptos relacionados con la exudación, evaporación, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, módulo de elasticidad y durabilidad. La discusión integra aportes de investigaciones nacionales e internacionales, proporcionando una visión amplia y actualizada sobre los principales desafíos que enfrenta la tecnología del concreto en aplicaciones de pavimentos rígidos.

El núcleo de la obra se centra en un caso de estudio experimental que evalúa la influencia del poliacrilato de sodio sobre concretos destinados a infraestructura vial. Los resultados obtenidos demuestran que la incorporación del polímero favorece la reducción de fisuras tempranas, mejora las condiciones de hidratación del cemento y contribuye al incremento de propiedades mecánicas fundamentales para el desempeño estructural del material. Estos hallazgos evidencian el potencial de esta tecnología para

incrementar la vida útil de los pavimentos y reducir los costos asociados al mantenimiento y rehabilitación.

Más allá de presentar resultados técnicos, el libro propone una reflexión sobre la importancia de la innovación en la ingeniería de materiales y sobre la necesidad de desarrollar soluciones orientadas a la sostenibilidad, eficiencia y resiliencia de las infraestructuras modernas. En este sentido, la obra plantea que la mejora de la durabilidad del concreto no depende únicamente de aumentar su resistencia, sino de comprender y optimizar los procesos que ocurren durante sus primeras etapas de formación.

Dirigido a investigadores, docentes, estudiantes de ingeniería civil, especialistas en tecnología del concreto y profesionales vinculados al diseño y construcción de pavimentos, este libro constituye una referencia actualizada sobre el uso de polímeros superabsorbentes en materiales cementicios. Su enfoque combina rigurosidad científica y aplicabilidad práctica, ofreciendo una valiosa contribución al conocimiento sobre nuevas estrategias para construir pavimentos rígidos más resistentes, durables y sostenibles.

INTRODUCCIÓN

La infraestructura vial constituye uno de los pilares fundamentales para el desarrollo económico y social de las naciones. La calidad de las carreteras influye directamente en la movilidad de las personas, el transporte de mercancías, la integración territorial y la competitividad de los sectores productivos. En este contexto, los pavimentos rígidos han adquirido una importancia creciente debido a su capacidad para soportar elevadas cargas de tránsito, ofrecer una mayor vida útil y reducir las necesidades de mantenimiento en comparación con otras alternativas constructivas. Sin embargo, a pesar de sus reconocidas ventajas, estos sistemas continúan enfrentando desafíos relacionados con su desempeño durante las primeras etapas de endurecimiento y a lo largo de su vida en servicio.

Uno de los problemas más frecuentes en elementos elaborados con concreto es la aparición de fisuras durante las primeras horas posteriores al vaciado. Este fenómeno, conocido como fisuración por contracción plástica, ocurre cuando la pérdida de humedad en la superficie del concreto supera la velocidad con la que el agua puede ascender desde el interior de la mezcla. Como consecuencia, se generan tensiones internas que el material aún no posee la capacidad suficiente para resistir, originándose fisuras que, aunque inicialmente puedan parecer superficiales, tienen el potencial de convertirse en vías de ingreso para agentes externos capaces de acelerar procesos de deterioro.

La presencia de fisuras tempranas representa una preocupación constante para ingenieros, constructores y gestores de infraestructura debido a que compromete la durabilidad de las estructuras y pavimentos. Las discontinuidades generadas facilitan la penetración de agua, sales, sustancias químicas agresivas y otros agentes ambientales que afectan progresivamente la integridad del concreto. Asimismo, pueden incrementar los costos de mantenimiento, reducir la vida útil de las obras y generar mayores inversiones destinadas a rehabilitación y reparación. Por esta razón, el control de la fisuración constituye uno de los principales objetivos dentro del diseño y la tecnología del concreto moderno.

Paralelamente, la industria de la construcción experimenta una búsqueda

permanente de materiales innovadores que permitan mejorar el comportamiento del concreto sin alterar significativamente los procesos constructivos tradicionales. Durante las últimas décadas, el desarrollo de nuevos aditivos, fibras y materiales modificadores ha permitido optimizar diversas propiedades relacionadas con la resistencia mecánica, la trabajabilidad, la durabilidad y el control de deformaciones. Dentro de este conjunto de innovaciones destacan los polímeros superabsorbentes, materiales capaces de almacenar grandes cantidades de agua y liberarla gradualmente cuando las condiciones internas del concreto así lo requieren.

Entre estos materiales, el poliacrilato de sodio ha despertado un interés creciente debido a sus extraordinarias propiedades de absorción y retención de agua. Conocido ampliamente por sus aplicaciones en productos de uso cotidiano, este polímero ha comenzado a ser estudiado en el ámbito de la ingeniería civil por su potencial para actuar como un sistema de curado interno. Su capacidad para almacenar agua durante el proceso de mezclado y liberarla progresivamente durante la hidratación del cemento permite reducir la pérdida prematura de humedad, favoreciendo el desarrollo de la microestructura del concreto y contribuyendo al control de fenómenos asociados a la retracción y la fisuración temprana.

La aplicación del poliacrilato de sodio en materiales cementicios representa una línea de investigación relativamente reciente que ha generado resultados prometedores en diferentes contextos internacionales. Diversos estudios han reportado mejoras relacionadas con la reducción de fisuras, la optimización de las condiciones de hidratación y el incremento de determinadas propiedades mecánicas. Sin embargo, las respuestas obtenidas suelen depender de factores como el tipo de cemento utilizado, las características de los agregados, las condiciones ambientales, la relación agua-cemento y la dosificación empleada. Estas variaciones evidencian la necesidad de continuar desarrollando investigaciones que permitan comprender con mayor precisión el comportamiento de este material bajo distintas condiciones de aplicación.

La creciente demanda de pavimentos más durables y sostenibles exige la incorporación de soluciones tecnológicas capaces de enfrentar los desafíos actuales de la infraestructura vial. En este escenario, el uso de polímeros superabsorbentes surge como una alternativa innovadora que combina principios de ingeniería de materiales,

sostenibilidad y optimización del desempeño estructural. Su potencial para mejorar simultáneamente el comportamiento mecánico del concreto y reducir la susceptibilidad a la fisuración temprana lo convierte en un tema de gran relevancia para investigadores, profesionales y estudiantes vinculados al ámbito de la construcción.

El presente libro aborda de manera integral el estudio del poliacrilato de sodio como material modificador del concreto destinado a pavimentos rígidos. A través del análisis de fundamentos teóricos, antecedentes científicos y evidencia experimental, se examinan los mecanismos que explican su influencia sobre la fisuración por contracción plástica y sobre las principales propiedades mecánicas del concreto. La obra busca contribuir a la difusión del conocimiento relacionado con materiales innovadores que permitan incrementar la durabilidad de las infraestructuras viales y fomentar el desarrollo de soluciones constructivas más eficientes.

La estructura del libro ha sido organizada en tres capítulos principales. El primero desarrolla los fundamentos teóricos relacionados con el poliacrilato de sodio, sus características, propiedades y aplicaciones en materiales de construcción. El segundo aborda los aspectos conceptuales vinculados con la fisuración por contracción plástica, las propiedades mecánicas del concreto y la importancia de la durabilidad en pavimentos rígidos. Finalmente, el tercer capítulo presenta un caso de estudio que analiza experimentalmente la incorporación de diferentes dosificaciones de poliacrilato de sodio en concretos destinados a pavimentos rígidos, exponiendo los procedimientos desarrollados, los resultados obtenidos y las implicancias técnicas derivadas de la investigación.

Más allá de los resultados específicos que aquí se presentan, esta obra pretende contribuir a la discusión sobre el futuro de los materiales de construcción y la necesidad de incorporar tecnologías que permitan desarrollar infraestructuras más resistentes, sostenibles y adaptadas a las exigencias del siglo XXI. La innovación en el concreto continúa abriendo nuevas posibilidades para la ingeniería civil, y el estudio de materiales como el poliacrilato de sodio constituye un paso importante hacia la construcción de pavimentos con menores niveles de fisuración y mayores estándares de durabilidad.

CAPÍTULO I

POLIACRILATO DE SODIO EN LA INGENIERÍA DEL CONCRETO

El avance de la ingeniería civil ha estado estrechamente vinculado a la búsqueda constante de materiales capaces de mejorar el desempeño de las estructuras y aumentar su vida útil. A medida que las exigencias constructivas se han incrementado, también lo ha hecho la necesidad de desarrollar soluciones innovadoras que permitan optimizar las propiedades de los materiales tradicionales. Dentro de este contexto, el concreto continúa siendo el material de construcción más utilizado a nivel mundial debido a su versatilidad, disponibilidad y capacidad para adaptarse a diferentes condiciones de servicio. No obstante, las limitaciones inherentes a su comportamiento han impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías orientadas a perfeccionar sus características físicas, mecánicas y de durabilidad.

La incorporación de materiales modificadores en las mezclas de concreto constituye una de las estrategias más importantes para alcanzar dicho propósito. A lo largo de los años, investigadores y profesionales han explorado el uso de aditivos químicos, fibras, materiales suplementarios cementantes y compuestos poliméricos con la finalidad de controlar procesos de deterioro, mejorar la resistencia mecánica y optimizar el comportamiento del material frente a condiciones ambientales adversas. Entre estas alternativas, los polímeros superabsorbentes han despertado un interés creciente debido a su capacidad para interactuar con el agua presente en la mezcla y modificar favorablemente diversos procesos asociados al endurecimiento del concreto.

El poliacrilato de sodio pertenece a esta familia de materiales y se caracteriza por poseer una extraordinaria capacidad para absorber y almacenar grandes cantidades de agua en relación con su propio peso. Esta propiedad ha permitido su utilización en múltiples sectores industriales, desde productos de higiene personal hasta aplicaciones agrícolas y ambientales. Sin embargo, durante los últimos años, su potencial ha comenzado a ser explorado dentro del campo de los materiales de construcción,

particularmente en el desarrollo de concretos con mejores condiciones de hidratación y menor susceptibilidad a la fisuración temprana.

La relevancia del poliacrilato de sodio en la ingeniería del concreto radica en su capacidad para actuar como un sistema de curado interno. A diferencia de los métodos convencionales de curado, que dependen principalmente de la aplicación externa de agua o de la protección superficial del elemento construido, este polímero permite almacenar agua dentro de la propia matriz cementicia y liberarla gradualmente conforme avanza el proceso de hidratación. Como resultado, se favorece el desarrollo microestructural del concreto, se reduce el riesgo de pérdida prematura de humedad y se contribuye a mejorar determinadas propiedades relacionadas con la resistencia y la durabilidad.

El creciente interés científico por este material ha generado una importante cantidad de investigaciones orientadas a comprender los mecanismos mediante los cuales influye en el comportamiento del concreto. Los resultados reportados evidencian que su incorporación puede producir efectos favorables sobre diversos parámetros, tales como la reducción de fisuras asociadas a procesos de retracción, la mejora en el desarrollo de resistencias mecánicas y el incremento de la eficiencia del curado interno. No obstante, la magnitud de estos beneficios depende de múltiples factores relacionados con las características de la mezcla, las condiciones ambientales y las dosificaciones empleadas.

En un escenario donde la sostenibilidad, la eficiencia constructiva y la durabilidad de las infraestructuras adquieren cada vez mayor importancia, el estudio de materiales innovadores como el poliacrilato de sodio representa una oportunidad para ampliar las fronteras del conocimiento en tecnología del concreto. Comprender sus propiedades, mecanismos de acción y potenciales aplicaciones resulta fundamental para promover soluciones constructivas capaces de responder a las necesidades actuales y futuras de la infraestructura moderna.

En este capítulo se presentan los principales fundamentos teóricos relacionados con el poliacrilato de sodio, abordando sus antecedentes de investigación, características físicas y químicas, mecanismos de funcionamiento y aplicaciones dentro de los

materiales cementicios. Asimismo, se analiza su papel como alternativa tecnológica para mejorar el desempeño del concreto, proporcionando una base conceptual que permita comprender su importancia dentro de las innovaciones contemporáneas de la ingeniería civil.

1.1. REFERENTES TEÓRICOS

El desarrollo de nuevos materiales para la construcción ha constituido una de las principales líneas de investigación dentro de la ingeniería civil contemporánea. La necesidad de incrementar la durabilidad de las estructuras, optimizar el comportamiento mecánico del concreto y reducir los costos asociados al mantenimiento ha impulsado la búsqueda constante de alternativas tecnológicas capaces de superar las limitaciones de los materiales convencionales. En este contexto, los polímeros superabsorbentes han adquirido una importancia creciente debido a su capacidad para modificar procesos fundamentales relacionados con la hidratación del cemento y el control de la humedad interna del concreto.

Durante las últimas décadas, la comunidad científica ha dirigido una atención especial hacia el estudio de materiales capaces de actuar como reservorios internos de agua. Este interés surge como respuesta a diversos problemas asociados a la pérdida prematura de humedad en el concreto, fenómeno que puede afectar el desarrollo adecuado de las reacciones de hidratación y favorecer la aparición de defectos que comprometen el desempeño estructural. Como resultado, numerosos investigadores han explorado el potencial de diferentes polímeros para mejorar las condiciones de curado y contribuir a la obtención de concretos más resistentes y durables.

Dentro de este grupo de materiales, el poliacrilato de sodio ha despertado particular interés debido a sus excepcionales propiedades de absorción y retención de agua. Aunque inicialmente fue desarrollado para aplicaciones industriales y de consumo masivo, su incorporación en materiales cementicios ha abierto nuevas posibilidades para la ingeniería del concreto. La capacidad de este polímero para absorber agua durante el mezclado y liberarla progresivamente durante el endurecimiento ha permitido plantear soluciones innovadoras frente a problemas relacionados con la retracción, la fisuración temprana y la insuficiente hidratación de la pasta de cemento.

Los estudios desarrollados en diferentes países evidencian una evolución progresiva del conocimiento sobre el comportamiento del poliacrilato de sodio en matrices cementicias. Las primeras investigaciones estuvieron orientadas principalmente a comprender sus propiedades físicas y químicas, así como su capacidad de interacción con el agua. Posteriormente, el interés científico se trasladó hacia la evaluación de sus efectos sobre las propiedades del concreto, incluyendo aspectos relacionados con la trabajabilidad, la resistencia mecánica, la microestructura, la durabilidad y el control de fisuras. Esta evolución ha permitido consolidar una base de conocimientos que respalda su potencial aplicación en proyectos de infraestructura.

La literatura especializada muestra que los resultados obtenidos no siempre son uniformes, debido a la influencia de factores como la dosificación utilizada, las características de los materiales constituyentes, las condiciones ambientales y los procedimientos de incorporación del polímero. Sin embargo, existe un consenso creciente respecto a su capacidad para contribuir al mejoramiento de determinadas propiedades del concreto cuando es empleado bajo condiciones adecuadas de diseño y control. Esta situación ha motivado el desarrollo de nuevas investigaciones orientadas a determinar dosis óptimas y establecer criterios técnicos que faciliten su aplicación práctica.

Asimismo, el interés por los polímeros superabsorbentes se encuentra estrechamente relacionado con las tendencias actuales de sostenibilidad en la construcción. La posibilidad de reducir el deterioro prematuro de las estructuras y prolongar su vida útil representa una alternativa alineada con los principios de eficiencia en el uso de recursos y reducción de impactos ambientales. Desde esta perspectiva, el estudio del poliacrilato de sodio no solo responde a una necesidad técnica, sino también a la búsqueda de soluciones constructivas más sostenibles y resilientes frente a las exigencias de la infraestructura moderna.

Los referentes teóricos que se presentan a continuación reúnen investigaciones relevantes desarrolladas tanto en el ámbito internacional como nacional, permitiendo comprender la evolución del conocimiento científico relacionado con el uso del poliacrilato de sodio y otros polímeros superabsorbentes en materiales cementicios. Su análisis proporciona el sustento conceptual necesario para entender las contribuciones

existentes, identificar tendencias de investigación y contextualizar la importancia de este material dentro de las innovaciones más recientes en tecnología del concreto.

1.1.1. Investigaciones internacionales

El estudio de materiales innovadores destinados a optimizar el comportamiento del concreto ha experimentado un crecimiento significativo durante las últimas décadas. La necesidad de incrementar la durabilidad de las estructuras, mejorar las propiedades mecánicas y reducir los problemas asociados a la fisuración ha impulsado el desarrollo de numerosas investigaciones enfocadas en la incorporación de fibras, polímeros y otros materiales modificadores dentro de las mezclas cementicias. En este contexto, diversos investigadores han demostrado que la modificación de la matriz del concreto mediante materiales alternativos puede generar mejoras importantes en su desempeño estructural y funcional.

Entre las investigaciones más relevantes se encuentra la desarrollada por Ortega et al. (2019), quienes realizaron una revisión sobre el comportamiento de materiales reforzados con fibras obtenidas a partir de residuos industriales. Su trabajo estuvo orientado a evaluar alternativas sostenibles para la construcción mediante la incorporación de fibras recicladas dentro de mezclas cementicias. Los resultados evidenciaron que la presencia de elementos fibrosos contribuye a mejorar el comportamiento posterior a la fisuración, incrementando la capacidad de absorción de energía y favoreciendo la ductilidad del material. Asimismo, se observó que determinadas fibras permiten conservar la integridad del elemento incluso después de alcanzar la falla por compresión, aspecto que representa una ventaja importante para aplicaciones estructurales donde se requiere mayor capacidad de deformación antes del colapso.

Por otra parte, Faneca (2020) desarrolló una investigación orientada al diseño de hormigones conductores para aplicaciones urbanas inteligentes. El estudio exploró la incorporación de fibras de carbono recicladas como elemento modificador de la matriz cementicia. Los hallazgos demostraron que este tipo de materiales permite mejorar propiedades funcionales específicas del concreto, favoreciendo aplicaciones relacionadas con sistemas de autocalentamiento y deshielo en infraestructura urbana.

Aunque el objetivo principal de la investigación estuvo enfocado en la conductividad eléctrica, los resultados evidenciaron el potencial de los materiales modificadores para transformar significativamente el comportamiento tradicional del concreto y ampliar sus campos de aplicación.

Asimismo, Muñoz et al. (2021) realizaron una revisión de investigaciones publicadas durante una década sobre el uso de diferentes tipos de fibras en concretos convencionales. Los autores analizaron materiales como fibras de acero, polipropileno, vidrio, carbono, basalto, cabello humano y polietileno, entre otros. Los resultados permitieron identificar una tendencia general favorable hacia la mejora de las propiedades mecánicas cuando las fibras son incorporadas en proporciones adecuadas. La investigación concluyó que variables como la longitud, el espesor y la dosificación de las fibras desempeñan un papel determinante en la resistencia final del concreto, evidenciando que una selección adecuada del material modificador puede generar incrementos significativos en el desempeño mecánico.

De igual manera, Campoy-Bencomo et al. (2021) evaluaron el comportamiento de concretos reforzados con diferentes tipos de fibras empleadas en pavimentos, autopistas y otras infraestructuras sometidas a elevadas sollicitaciones mecánicas. La investigación estuvo orientada a determinar la influencia de fibras metálicas y sintéticas sobre el módulo de ruptura y la resistencia del concreto. Los autores encontraron que determinadas configuraciones de fibras pueden contribuir al control de grietas y mejorar la respuesta estructural del material frente a esfuerzos de flexión, aunque también identificaron que dosis excesivas pueden afectar negativamente la trabajabilidad de la mezcla. Estos hallazgos resaltan la importancia de establecer proporciones óptimas para maximizar los beneficios de los materiales modificadores.

Otra investigación destacada corresponde a Torres (2021), quien estudió la influencia de fibras de acero tipo DRAMIX 3D en concretos destinados a pavimentos rígidos. Los resultados demostraron una reducción considerable en la formación de fisuras superficiales, además de mejoras asociadas al comportamiento mecánico del concreto. El estudio concluyó que la incorporación de fibras metálicas constituye una estrategia eficaz para incrementar la durabilidad de pavimentos sometidos a cargas repetitivas, estableciendo una dosificación óptima que permitió alcanzar los mejores

resultados experimentales.

Por su parte, Pérez et al. (2022) desarrollaron una revisión enfocada en el uso de fibras de acero obtenidas a partir de neumáticos reciclados como alternativa sostenible para la modificación del concreto. Los autores destacaron que el aprovechamiento de materiales reciclados no solo contribuye a reducir impactos ambientales, sino que también puede generar mejoras en la resistencia y en el comportamiento frente a la fisuración. Esta tendencia refleja el creciente interés de la comunidad científica por integrar criterios de sostenibilidad dentro del desarrollo de nuevos materiales para la construcción.

De manera complementaria, investigaciones recientes relacionadas con polímeros superabsorbentes han demostrado que estos materiales poseen la capacidad de actuar como reservorios internos de agua dentro de la matriz cementicia. Diversos estudios han señalado que la incorporación de polímeros como el poliacrilato de sodio favorece el curado interno del concreto, mejora el desarrollo de la hidratación y reduce la susceptibilidad a la fisuración temprana. Estas características han convertido a los polímeros superabsorbentes en una de las líneas de investigación más prometedoras dentro de la tecnología moderna del concreto, especialmente para aplicaciones que demandan elevados estándares de durabilidad y desempeño estructural.

En conjunto, las investigaciones internacionales evidencian una tendencia orientada hacia la utilización de materiales modificadores capaces de optimizar el comportamiento del concreto desde diferentes perspectivas. Los avances obtenidos en el uso de fibras, materiales reciclados y polímeros superabsorbentes proporcionan una base científica sólida para continuar explorando alternativas innovadoras como el poliacrilato de sodio, cuyo potencial para mejorar simultáneamente la resistencia mecánica y el control de fisuración representa una oportunidad significativa para el desarrollo de pavimentos rígidos de mayor durabilidad.

1.1.2. Investigaciones nacionales

En el ámbito nacional, el estudio de materiales modificadores aplicados al concreto ha experimentado un crecimiento sostenido durante los últimos años, impulsado principalmente por la necesidad de mejorar la calidad de las infraestructuras

y adaptarlas a las diversas condiciones geográficas y climáticas presentes en el territorio peruano. Las investigaciones desarrolladas en universidades y centros especializados han permitido evaluar el comportamiento de diferentes aditivos, fibras y compuestos alternativos incorporados al concreto con la finalidad de optimizar sus propiedades mecánicas, controlar la aparición de fisuras y aumentar su durabilidad.

Uno de los temas que ha despertado mayor interés entre los investigadores peruanos es el control de la fisuración temprana en elementos de concreto expuestos a condiciones ambientales severas. Las variaciones de temperatura, la baja humedad relativa y la acción del viento en diversas regiones del país favorecen la pérdida acelerada de agua durante las primeras horas posteriores al vaciado, generando condiciones propicias para la aparición de fisuras por contracción plástica. Esta problemática ha motivado el desarrollo de investigaciones orientadas a identificar materiales capaces de mitigar dichos efectos y mejorar el comportamiento del concreto durante su etapa inicial de endurecimiento.

En este contexto, Limpe y Bravo (2022) desarrollaron una investigación enfocada en el empleo de hidrogeles como material modificador para mejorar las propiedades físico-mecánicas de materiales utilizados en ingeniería civil. Los autores analizaron la capacidad de estos compuestos para retener agua y liberarla progresivamente dentro de la estructura del material. Los resultados obtenidos demostraron mejoras significativas en parámetros relacionados con la capacidad de soporte y el control de deformaciones, evidenciando que los materiales con características superabsorbentes pueden convertirse en herramientas eficaces para optimizar el desempeño de sistemas constructivos sometidos a variaciones de humedad. Este estudio constituye uno de los antecedentes más cercanos al uso del poliacrilato de sodio debido a que ambos materiales comparten mecanismos de absorción y liberación gradual de agua.

Asimismo, diversas investigaciones nacionales han explorado la incorporación de fibras naturales, fibras sintéticas y materiales reciclados en mezclas de concreto con el propósito de reducir la propagación de fisuras y mejorar la capacidad resistente del material. Los resultados reportados muestran que la modificación de la matriz cementicia mediante elementos de refuerzo puede contribuir a mejorar el

comportamiento mecánico y aumentar la capacidad del concreto para resistir esfuerzos de tracción y flexión. Estas investigaciones han permitido consolidar una línea de trabajo orientada hacia la innovación en materiales de construcción y la búsqueda de soluciones técnicamente viables para incrementar la durabilidad de las estructuras.

Por otro lado, los estudios relacionados con tecnologías de curado interno han comenzado a adquirir relevancia dentro del contexto nacional debido a las ventajas que ofrecen para controlar la pérdida prematura de humedad. Los investigadores han identificado que el mantenimiento de condiciones adecuadas de hidratación durante las primeras edades del concreto resulta fundamental para alcanzar mejores niveles de resistencia y minimizar la aparición de defectos superficiales. En este sentido, el uso de materiales capaces de almacenar agua y suministrarla gradualmente al sistema cementicio representa una alternativa prometedora para optimizar el desarrollo de las propiedades mecánicas.

De manera complementaria, las investigaciones peruanas sobre pavimentos rígidos han resaltado la importancia de mejorar la calidad del concreto empleado en infraestructura vial. Los estudios realizados en distintas regiones del país evidencian que la aparición temprana de fisuras puede acelerar los procesos de deterioro y reducir significativamente la vida útil de los pavimentos. Como consecuencia, existe un interés creciente por incorporar materiales innovadores que permitan incrementar la resistencia mecánica y disminuir los mecanismos asociados al agrietamiento superficial.

La incorporación de polímeros superabsorbentes en materiales cementicios constituye una línea de investigación relativamente reciente dentro del ámbito nacional. Aunque los estudios específicos sobre poliacrilato de sodio aún son limitados, las investigaciones relacionadas con hidrogeles y otros materiales de comportamiento similar han demostrado resultados alentadores respecto al control de humedad interna y la mejora de propiedades físicas y mecánicas. Estos hallazgos han abierto nuevas oportunidades para el desarrollo de investigaciones orientadas a evaluar el potencial de los polímeros superabsorbentes en aplicaciones de infraestructura vial.

En términos generales, los antecedentes nacionales reflejan una tendencia orientada hacia la búsqueda de materiales innovadores capaces de mejorar el desempeño

del concreto frente a los desafíos constructivos actuales. Los resultados obtenidos por diferentes investigadores evidencian que la incorporación de compuestos modificadores puede generar beneficios significativos en términos de resistencia, control de fisuración y durabilidad. En este escenario, el estudio del poliacrilato de sodio representa una continuación lógica de las investigaciones desarrolladas en el país, aportando nuevos conocimientos sobre el potencial de los polímeros superabsorbentes para la construcción de pavimentos rígidos más resistentes y duraderos.

1.1.3. Avances recientes en polímeros superabsorbentes

Los avances tecnológicos en la ingeniería de materiales han impulsado el desarrollo de nuevas soluciones destinadas a optimizar el comportamiento del concreto frente a las crecientes exigencias estructurales y ambientales. Dentro de estas innovaciones, los polímeros superabsorbentes han adquirido una relevancia significativa debido a su capacidad para almacenar grandes cantidades de agua y liberarla gradualmente según las necesidades internas del material. Esta característica ha permitido que dichos compuestos sean considerados una de las tecnologías más prometedoras para el mejoramiento de la durabilidad y el desempeño mecánico de los materiales cementicios.

Los polímeros superabsorbentes, conocidos internacionalmente como Super Absorbent Polymers (SAP), fueron inicialmente desarrollados para aplicaciones industriales, médicas y agrícolas. Sin embargo, los avances científicos de las últimas dos décadas han demostrado que sus propiedades también pueden ser aprovechadas en la tecnología del concreto. La posibilidad de actuar como reservorios internos de agua ha permitido que estos materiales sean utilizados para promover procesos de curado interno, reducir tensiones por retracción y mejorar el desarrollo de la hidratación del cemento.

Uno de los aportes más importantes de las investigaciones recientes ha sido la comprensión de los mecanismos mediante los cuales los polímeros superabsorbentes interactúan con la matriz cementicia. Durante el mezclado, las partículas absorben parte del agua disponible y aumentan considerablemente su volumen. Posteriormente, conforme avanzan las reacciones de hidratación y disminuye la humedad interna del

concreto, el agua almacenada es liberada gradualmente, contribuyendo a mantener condiciones favorables para la hidratación del cemento. Este proceso permite compensar parcialmente la pérdida de humedad que normalmente ocurre durante las primeras etapas de endurecimiento y ayuda a reducir la formación de microfisuras asociadas a la retracción.

Los avances más recientes han demostrado que el uso de polímeros superabsorbentes puede generar beneficios importantes en concretos de alto desempeño, concretos autocompactantes y materiales sometidos a condiciones ambientales severas. Diversas investigaciones han reportado reducciones significativas en la fisuración temprana, mejoras en la estabilidad dimensional y un mejor aprovechamiento del agua disponible dentro de la mezcla. Asimismo, se ha observado que estos materiales pueden contribuir al refinamiento de la microestructura interna del concreto, favoreciendo el desarrollo de una matriz más homogénea y resistente.

Entre los polímeros superabsorbentes más estudiados destaca el poliacrilato de sodio, material que ha mostrado resultados particularmente favorables debido a su elevada capacidad de absorción de agua y a su estabilidad química dentro de sistemas cementicios. Su aplicación en el concreto ha permitido desarrollar nuevas estrategias de curado interno que buscan reducir la dependencia de métodos tradicionales de curado externo. Esta característica adquiere especial importancia en regiones donde las condiciones climáticas dificultan el mantenimiento adecuado de la humedad superficial durante las primeras edades del concreto.

De acuerdo con los avances reportados en la literatura científica, los polímeros superabsorbentes también presentan un importante potencial para mejorar la sostenibilidad de las construcciones. Al favorecer una hidratación más eficiente y disminuir la aparición de fisuras prematuras, contribuyen a prolongar la vida útil de las estructuras y reducir la necesidad de intervenciones tempranas de mantenimiento o reparación. Desde esta perspectiva, su utilización se alinea con las tendencias actuales orientadas hacia el desarrollo de infraestructuras más resilientes, duraderas y ambientalmente responsables.

Otro aspecto que ha cobrado relevancia en investigaciones recientes es la

optimización de las dosificaciones empleadas. Los estudios han demostrado que el desempeño de los polímeros superabsorbentes depende en gran medida de la cantidad incorporada, del tamaño de las partículas, de la capacidad de absorción y de las características específicas de la mezcla de concreto. Por esta razón, gran parte de los esfuerzos científicos actuales se concentran en identificar dosis óptimas que permitan maximizar los beneficios sin afectar negativamente propiedades como la trabajabilidad o la resistencia mecánica.

Asimismo, el empleo combinado de polímeros superabsorbentes con otros materiales modificadores, tales como fibras, aditivos químicos y materiales cementantes suplementarios, constituye una de las líneas de investigación más dinámicas de la actualidad. Los resultados obtenidos sugieren que la integración de diferentes tecnologías puede generar efectos sinérgicos capaces de potenciar simultáneamente la resistencia, la durabilidad y el control de fisuración del concreto.

En la actualidad, los polímeros superabsorbentes son considerados una herramienta tecnológica de gran potencial para la ingeniería del concreto. Los avances alcanzados han permitido superar la etapa inicial de investigación exploratoria y avanzar hacia aplicaciones cada vez más especializadas en infraestructura vial, edificaciones y obras hidráulicas. Este progreso científico ha consolidado al poliacrilato de sodio y a otros polímeros similares como alternativas innovadoras para enfrentar los desafíos asociados a la durabilidad y al desempeño de los materiales cementicios del siglo XXI.

1.2. NOCIONES BÁSICAS DEL POLIACRILATO DE SODIO

El desarrollo de materiales avanzados ha transformado significativamente la manera en que la ingeniería civil aborda los desafíos asociados a la durabilidad, resistencia y sostenibilidad de las estructuras. Dentro de este proceso de innovación, los polímeros superabsorbentes han emergido como una alternativa tecnológica capaz de modificar favorablemente el comportamiento de diversos materiales de construcción. Entre ellos, el poliacrilato de sodio destaca por sus excepcionales propiedades de absorción y almacenamiento de agua, características que han despertado un creciente interés en el campo de la tecnología del concreto.

Aunque inicialmente su utilización estuvo orientada a sectores como la industria química, agrícola, médica y de productos de consumo masivo, las investigaciones más recientes han demostrado que este material posee un importante potencial para aplicaciones en ingeniería de materiales. Su capacidad para absorber múltiples veces su propio peso en agua y liberarla de manera gradual ha permitido explorar nuevas estrategias para optimizar procesos relacionados con la hidratación del cemento y el control de la humedad interna en concretos y morteros.

La incorporación del poliacrilato de sodio en mezclas cementicias representa una de las aplicaciones más innovadoras de los polímeros superabsorbentes dentro de la construcción moderna. Su funcionamiento se fundamenta en la capacidad de actuar como un sistema de almacenamiento temporal de agua, permitiendo que parte del líquido utilizado durante el mezclado permanezca disponible para las reacciones de hidratación en etapas posteriores. Este mecanismo favorece el desarrollo adecuado de la microestructura del concreto y contribuye a reducir problemas asociados a la pérdida prematura de humedad, especialmente en ambientes con condiciones climáticas adversas.

El interés científico por este material se ha incrementado debido a los resultados obtenidos en investigaciones relacionadas con el control de la fisuración temprana, la reducción de procesos de retracción y la mejora de determinadas propiedades mecánicas. Asimismo, diversos estudios han demostrado que su utilización puede contribuir a optimizar la durabilidad de los elementos construidos al disminuir la formación de defectos que posteriormente facilitan el ingreso de agentes agresivos al interior del concreto.

No obstante, el comportamiento del poliacrilato de sodio dentro de sistemas cementicios depende de diversos factores relacionados con sus características físicas y químicas, la cantidad incorporada, el método de dosificación y las propiedades de los materiales que conforman la mezcla. Por ello, comprender sus fundamentos conceptuales resulta indispensable para evaluar adecuadamente sus posibilidades de aplicación en proyectos de infraestructura y para interpretar los efectos que puede generar sobre el desempeño del concreto.

En esta sección se desarrollan las principales nociones básicas relacionadas con el poliacrilato de sodio, abordando aspectos vinculados con su definición, composición, propiedades, mecanismos de funcionamiento y aplicaciones en materiales de construcción. El análisis de estos elementos permitirá comprender las razones por las cuales este polímero se ha convertido en una de las alternativas más prometedoras dentro de las investigaciones orientadas al desarrollo de concretos más resistentes, durables y adaptados a las necesidades de la ingeniería contemporánea.

1.2.1. Definición y características

El poliacrilato de sodio es un polímero sintético perteneciente al grupo de los materiales superabsorbentes, ampliamente reconocido por su extraordinaria capacidad para absorber, retener y liberar agua de manera controlada. Desde el punto de vista químico, se obtiene a partir de la polimerización del ácido acrílico y sus sales sódicas, dando lugar a una estructura tridimensional reticulada que le permite almacenar grandes volúmenes de líquido sin disolverse. Gracias a esta propiedad, se ha convertido en uno de los polímeros superabsorbentes más utilizados en diferentes sectores industriales y científicos.

De acuerdo con la información técnica presentada en la investigación base de este libro, el poliacrilato de sodio se caracteriza por ser un polímero de elevado peso molecular que generalmente se presenta en forma de partículas sólidas cristalinas de color blanco. Asimismo, posee una densidad relativamente baja y una capacidad de absorción que puede multiplicar varias centenas de veces su peso original cuando entra en contacto con agua, lo que lo convierte en un material altamente eficiente para aplicaciones donde se requiere almacenamiento temporal de humedad. Estas características explican su amplio uso en productos absorbentes y, más recientemente, en materiales de construcción.

Una de las propiedades más destacadas del poliacrilato de sodio es su capacidad para formar hidrogeles. Cuando entra en contacto con el agua, las cadenas poliméricas experimentan una expansión considerable debido a la atracción entre las moléculas de agua y los grupos funcionales presentes en su estructura química. Como resultado, el material incrementa significativamente su volumen y forma una masa gelatinosa capaz

de retener el líquido durante períodos prolongados. Posteriormente, cuando las condiciones del entorno demandan humedad, el polímero puede liberar parte del agua almacenada de manera gradual.

Esta capacidad de absorción y desorción controlada constituye el principal motivo por el cual el poliacrilato de sodio ha despertado interés dentro de la tecnología del concreto. En aplicaciones cementicias, el polímero puede actuar como un sistema de almacenamiento interno de agua que contribuye a mantener las condiciones necesarias para la hidratación del cemento durante las primeras etapas de endurecimiento. De esta manera, ayuda a compensar la pérdida de humedad ocasionada por la evaporación y favorece el desarrollo adecuado de la microestructura del concreto.

Desde una perspectiva física, el poliacrilato de sodio presenta características que facilitan su incorporación en mezclas de construcción. Su forma granular permite una distribución relativamente uniforme dentro de la matriz cementicia, mientras que su estabilidad química reduce la posibilidad de reacciones adversas con los demás componentes del concreto. Además, su comportamiento puede ser ajustado mediante variaciones en el tamaño de las partículas, el grado de reticulación y la dosificación utilizada, factores que influyen directamente en su capacidad de absorción y liberación de agua.

Otra característica importante es su elevada sensibilidad a la composición química del medio donde se encuentra. La capacidad de absorción del poliacrilato de sodio es mayor cuando interactúa con agua de baja concentración iónica, mientras que puede disminuir en presencia de soluciones con altos contenidos de sales o compuestos químicos. Esta particularidad resulta especialmente relevante en aplicaciones de ingeniería civil, donde la composición de la mezcla de concreto puede influir sobre el comportamiento final del polímero.

En términos de durabilidad, el poliacrilato de sodio presenta una adecuada estabilidad frente a condiciones normales de uso, manteniendo sus propiedades durante períodos prolongados sin experimentar degradaciones significativas. Esta característica ha favorecido su utilización en diferentes campos de la ingeniería y ha contribuido a ampliar las investigaciones relacionadas con su potencial aplicación en materiales

cementicios sometidos a condiciones ambientales variables.

Las investigaciones desarrolladas durante los últimos años han demostrado que las propiedades del poliacrilato de sodio trascienden su función tradicional como material absorbente. Su capacidad para regular el movimiento de agua dentro de sistemas porosos ha permitido posicionarlo como una alternativa innovadora para mejorar el desempeño de concretos y morteros, especialmente en aplicaciones donde el control de la humedad interna resulta determinante para alcanzar elevados niveles de resistencia y durabilidad.

Por estas razones, el poliacrilato de sodio es actualmente considerado uno de los polímeros superabsorbentes con mayor potencial para aplicaciones en ingeniería civil. Sus características físicas, químicas y funcionales lo convierten en un material capaz de contribuir al desarrollo de tecnologías constructivas más eficientes, orientadas a la reducción de fisuras, la optimización de la hidratación del cemento y el incremento de la vida útil de las estructuras de concreto.

1.2.2. Composición y propiedades

El poliacrilato de sodio pertenece al grupo de los polímeros superabsorbentes sintéticos, materiales que se caracterizan por su capacidad para absorber y retener cantidades extraordinarias de agua en relación con su masa inicial. Su estructura química está conformada principalmente por cadenas poliméricas derivadas de la polimerización del ácido acrílico parcialmente neutralizado con hidróxido de sodio. Como resultado de este proceso se obtiene una red tridimensional reticulada que le proporciona estabilidad estructural y la capacidad de expandirse considerablemente cuando entra en contacto con líquidos.

Desde el punto de vista molecular, el poliacrilato de sodio está compuesto por unidades repetitivas de acrilato de sodio enlazadas entre sí mediante puentes químicos que forman una estructura reticulada. Esta configuración permite que las moléculas de agua sean atraídas hacia el interior del polímero debido a la presencia de grupos funcionales cargados negativamente. La interacción entre estas cargas y las moléculas de agua genera fuerzas osmóticas que provocan la expansión del material y favorecen la absorción de grandes volúmenes de líquido.

La composición química del poliacrilato de sodio le confiere propiedades únicas que lo diferencian de otros materiales absorbentes convencionales. Mientras materiales como esponjas o fibras naturales almacenan agua principalmente en espacios vacíos o poros físicos, el poliacrilato de sodio retiene el líquido a nivel molecular mediante enlaces electrostáticos y fuerzas intermoleculares. Gracias a este mecanismo, el agua absorbida permanece retenida dentro de la estructura polimérica incluso cuando es sometida a determinadas cargas o presiones externas.

Entre las propiedades más importantes de este material destaca su elevada capacidad de absorción. De acuerdo con las características técnicas reportadas en la investigación base, el poliacrilato de sodio puede absorber entre 250 y 400 veces su propio peso en agua, dependiendo de las condiciones ambientales y de la composición química del líquido absorbido. Esta capacidad excepcional convierte al polímero en un eficiente reservorio de humedad y constituye el fundamento principal de sus aplicaciones en ingeniería de materiales.

Otra propiedad relevante es su elevada capacidad de retención de agua. Una vez absorbido el líquido, el polímero forma una estructura gelatinosa que dificulta la liberación inmediata de la humedad almacenada. Este comportamiento permite que el agua permanezca disponible durante períodos prolongados y sea liberada gradualmente conforme cambian las condiciones internas del sistema donde se encuentra incorporado. En el caso del concreto, esta característica resulta especialmente valiosa debido a que favorece la continuidad de las reacciones de hidratación del cemento.

El poliacrilato de sodio también presenta una densidad relativamente baja, generalmente comprendida entre 0.56 y 0.70 g/cm³, lo que facilita su incorporación en diferentes mezclas sin generar incrementos significativos en el peso del material final. Asimismo, se caracteriza por presentarse en forma de partículas sólidas de color blanco, aspecto que favorece su manipulación, transporte y almacenamiento en aplicaciones industriales y de laboratorio.

Desde la perspectiva química, el polímero posee una adecuada estabilidad frente a una amplia variedad de condiciones ambientales. Su estructura molecular le permite conservar sus propiedades absorbentes durante largos períodos de tiempo, siempre que

no sea sometido a condiciones extremas de temperatura o a agentes químicos altamente agresivos. Esta estabilidad ha contribuido a su utilización en sectores donde se requiere un comportamiento confiable y predecible.

Otra propiedad de gran interés para la ingeniería civil es su capacidad de hinchamiento. Cuando absorbe agua, el volumen del poliacrilato de sodio puede incrementarse varias centenas de veces respecto a su tamaño original. Este fenómeno ocurre como consecuencia de la expansión de las cadenas poliméricas y de la acumulación de agua dentro de la red tridimensional. La magnitud de este proceso depende de factores como la temperatura, la calidad del agua, el contenido de sales disueltas y el grado de reticulación del polímero.

Las propiedades del poliacrilato de sodio también están influenciadas por la concentración iónica del medio. En soluciones con bajo contenido de sales, el material alcanza sus mayores niveles de absorción; sin embargo, en ambientes con elevadas concentraciones de iones, la capacidad absorbente puede disminuir debido a la reducción del gradiente osmótico responsable de la entrada de agua al polímero. Este aspecto adquiere especial relevancia en aplicaciones cementicias, donde la presencia de diversos compuestos químicos puede modificar parcialmente el comportamiento del material.

En el ámbito de la ingeniería del concreto, la combinación de elevada absorción, retención controlada de agua, estabilidad química y capacidad de hinchamiento convierte al poliacrilato de sodio en un material altamente atractivo para aplicaciones relacionadas con el curado interno y el control de la humedad. Estas propiedades permiten que el polímero funcione como una fuente interna de agua que contribuye a mejorar las condiciones de hidratación del cemento y a reducir problemas asociados a la pérdida prematura de humedad.

En conjunto, la composición química y las propiedades físicas del poliacrilato de sodio explican el creciente interés que ha despertado dentro de la tecnología moderna del concreto. Su capacidad para interactuar eficientemente con el agua y regular su disponibilidad dentro de la matriz cementicia constituye la base de numerosas investigaciones orientadas al desarrollo de materiales más resistentes, durables y

adaptados a las exigencias actuales de la construcción.

1.2.3. Mecanismo de absorción y liberación de agua

La principal característica que distingue al poliacrilato de sodio de otros materiales utilizados en ingeniería es su extraordinaria capacidad para absorber y almacenar grandes cantidades de agua, así como liberarla posteriormente de manera gradual según las condiciones del entorno. Esta propiedad se encuentra directamente relacionada con su estructura molecular y constituye el fundamento de su aplicación en materiales cementicios, especialmente en tecnologías asociadas al curado interno del concreto y al control de la fisuración por pérdida prematura de humedad.

El mecanismo de absorción del poliacrilato de sodio se inicia cuando las partículas del polímero entran en contacto con el agua. Debido a la presencia de grupos funcionales ionizados en su estructura química, las moléculas de agua son atraídas hacia el interior de la red polimérica mediante fuerzas electrostáticas. A medida que el agua penetra en la estructura, las cadenas moleculares comienzan a separarse y expandirse, generando un notable incremento del volumen del material. Este fenómeno, conocido como hinchamiento o expansión volumétrica, permite que el polímero almacene cantidades de agua muy superiores a su peso original.

Durante este proceso, la red tridimensional reticulada que caracteriza al poliacrilato de sodio desempeña un papel fundamental. A diferencia de materiales solubles que se disuelven completamente al contacto con el agua, el poliacrilato mantiene su integridad estructural gracias a los enlaces químicos que conectan las cadenas poliméricas. Esta configuración permite que el agua quede retenida dentro de la estructura sin que el material pierda su forma ni se disperse en el medio circundante.

La absorción ocurre como resultado de un equilibrio entre fuerzas opuestas. Por un lado, la presión osmótica generada por la diferencia de concentración entre el interior y el exterior del polímero favorece el ingreso de agua. Por otro lado, las fuerzas elásticas originadas por la estructura reticulada tienden a limitar la expansión excesiva de las cadenas moleculares. El equilibrio entre ambos fenómenos determina la cantidad máxima de agua que puede ser almacenada por el material.

Una vez concluido el proceso de absorción, el polímero se transforma en una estructura gelatinosa rica en agua, capaz de actuar como un reservorio interno de humedad. En aplicaciones convencionales, esta característica permite mantener agua disponible durante largos períodos de tiempo. Sin embargo, en el campo de la ingeniería del concreto, esta propiedad adquiere una importancia aún mayor debido a su capacidad para suministrar agua adicional durante las etapas críticas de hidratación del cemento.

El mecanismo de liberación de agua ocurre de manera progresiva y controlada. Cuando el medio que rodea al polímero experimenta una disminución en su contenido de humedad o un incremento en la demanda interna de agua, se generan diferencias de potencial que favorecen la salida gradual del líquido almacenado. En lugar de liberar toda el agua de forma inmediata, el poliacrilato de sodio actúa como una fuente reguladora capaz de suministrar humedad conforme las condiciones del sistema lo requieren.

Dentro del concreto, este comportamiento resulta especialmente beneficioso durante las primeras edades del material. Conforme avanzan las reacciones de hidratación del cemento, parte del agua inicialmente presente en la mezcla es consumida para formar nuevos productos de hidratación. Simultáneamente, la evaporación superficial puede provocar pérdidas adicionales de humedad. En estas circunstancias, el agua retenida por el poliacrilato de sodio comienza a liberarse progresivamente, compensando parcialmente dichas pérdidas y contribuyendo a mantener condiciones favorables para el desarrollo de la microestructura cementicia.

Este fenómeno es conocido como curado interno y constituye una de las aplicaciones más importantes de los polímeros superabsorbentes en la tecnología moderna del concreto. A diferencia de los métodos tradicionales de curado, que dependen del suministro externo de agua mediante riego, inmersión o membranas de protección, el curado interno proporciona una fuente de humedad directamente desde el interior del material. Esto permite una distribución más uniforme del agua y reduce la dependencia de factores externos relacionados con el clima o las condiciones de obra.

La liberación gradual de agua también contribuye a disminuir los efectos asociados a la retracción autógena y a la contracción plástica. Cuando el concreto pierde

humedad de manera acelerada, se generan tensiones internas que pueden dar lugar a la formación de microfisuras y grietas superficiales. Al suministrar agua adicional durante este proceso, el poliacrilato de sodio ayuda a reducir dichas tensiones y favorece una hidratación más completa del cemento, disminuyendo la probabilidad de fisuración temprana.

Diversas investigaciones han demostrado que la eficiencia del mecanismo de absorción y liberación depende de múltiples factores, entre ellos el tamaño de las partículas del polímero, la dosificación utilizada, la relación agua-cemento de la mezcla y la composición química del medio. Asimismo, la presencia de sales y otros compuestos disueltos puede influir sobre la capacidad absorbente del material, modificando la cantidad de agua almacenada y la velocidad con la que esta es liberada.

En síntesis, el mecanismo de absorción y liberación de agua del poliacrilato de sodio constituye la base de su funcionamiento como polímero superabsorbente. Su capacidad para actuar como un reservorio interno de humedad permite optimizar las condiciones de hidratación del cemento, reducir la pérdida prematura de agua y contribuir al control de la fisuración en concretos y morteros. Estas ventajas han convertido a este material en una de las alternativas más prometedoras para el desarrollo de tecnologías orientadas a mejorar la durabilidad y el desempeño de las infraestructuras de concreto.

1.2.4. Aplicaciones en materiales cementicios

El desarrollo de la tecnología del concreto ha impulsado la incorporación de diversos materiales innovadores destinados a mejorar el comportamiento de las mezclas cementicias frente a las crecientes exigencias estructurales y ambientales. Dentro de este proceso de innovación, los polímeros superabsorbentes han adquirido una importancia significativa debido a su capacidad para interactuar con el agua presente en el sistema cementicio y modificar favorablemente diversos procesos relacionados con la hidratación, la retracción y la durabilidad. Entre estos materiales, el poliacrilato de sodio se ha consolidado como una de las alternativas más estudiadas y prometedoras para aplicaciones en concretos y morteros.

La principal aplicación del poliacrilato de sodio en materiales cementicios se

encuentra relacionada con el curado interno. Este mecanismo consiste en proporcionar una fuente adicional de agua desde el interior de la mezcla durante las etapas iniciales de endurecimiento. A diferencia de los métodos tradicionales de curado, que dependen del suministro externo de humedad, el poliacrilato de sodio almacena agua durante el mezclado y la libera gradualmente conforme avanzan las reacciones de hidratación del cemento. Este proceso permite mantener condiciones favorables para el desarrollo de la microestructura interna y contribuye a mejorar la calidad final del concreto.

El curado interno adquiere especial importancia en concretos de baja relación agua-cemento y en concretos de alto desempeño, donde la disponibilidad de agua puede resultar insuficiente para completar adecuadamente los procesos de hidratación. En estos casos, la incorporación de polímeros superabsorbentes ayuda a reducir los efectos asociados a la autodesecación, favoreciendo un mayor grado de hidratación y permitiendo que el material alcance mejores niveles de resistencia y durabilidad a largo plazo.

Otra aplicación relevante se relaciona con el control de la fisuración por contracción plástica. Durante las primeras horas posteriores al vaciado, el concreto puede experimentar pérdidas aceleradas de humedad debido a la evaporación superficial, especialmente en ambientes con altas temperaturas, baja humedad relativa o velocidades elevadas de viento. Cuando la pérdida de agua supera la capacidad de reposición interna, se generan tensiones que pueden originar fisuras superficiales. El poliacrilato de sodio contribuye a mitigar este fenómeno al suministrar agua adicional desde el interior de la mezcla, ayudando a mantener un equilibrio hídrico más estable durante el proceso de endurecimiento.

Asimismo, este polímero ha sido utilizado para reducir los efectos de la retracción autógena, fenómeno frecuente en concretos modernos con elevados contenidos de cemento y bajas relaciones agua-cemento. La retracción autógena ocurre como consecuencia del consumo interno de agua durante las reacciones de hidratación, generando disminuciones volumétricas que pueden derivar en microfisuración. La presencia de poliacrilato de sodio permite compensar parcialmente esta pérdida de humedad y disminuir las deformaciones asociadas al proceso.

En el ámbito de las propiedades mecánicas, diversas investigaciones han demostrado que una dosificación adecuada de polímeros superabsorbentes puede favorecer el desarrollo de resistencias mecánicas más uniformes. Al mejorar las condiciones de hidratación del cemento, se promueve una formación más completa de los productos de hidratación responsables de la resistencia del concreto. Como consecuencia, pueden observarse mejoras en parámetros como la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad, dependiendo de las características específicas de la mezcla y de las condiciones de aplicación.

Las aplicaciones del poliacrilato de sodio también se extienden a concretos destinados a infraestructuras sometidas a condiciones ambientales severas. En pavimentos rígidos, puentes, estructuras hidráulicas y elementos expuestos a ciclos continuos de humedad y temperatura, la reducción de fisuras tempranas representa un factor determinante para prolongar la vida útil de las estructuras. En estos contextos, el empleo de polímeros superabsorbentes constituye una estrategia orientada a incrementar la durabilidad y reducir la susceptibilidad al deterioro prematuro.

Otra línea de aplicación corresponde a los concretos sostenibles y de nueva generación. La creciente necesidad de optimizar el consumo de recursos y aumentar la eficiencia de los materiales ha impulsado el desarrollo de mezclas capaces de alcanzar mayores niveles de desempeño con menores requerimientos de mantenimiento. El poliacrilato de sodio contribuye a este objetivo al favorecer procesos de hidratación más eficientes y reducir la formación de defectos que podrían comprometer el comportamiento futuro de la estructura.

En morteros y materiales prefabricados también se han reportado aplicaciones exitosas. La capacidad de controlar la humedad interna permite obtener productos con menor tendencia a la fisuración y mejor estabilidad dimensional, características particularmente importantes en elementos de reducido espesor o sometidos a procesos acelerados de fabricación. Asimismo, la utilización de polímeros superabsorbentes puede contribuir a mejorar la calidad superficial de los productos terminados y a disminuir defectos asociados a variaciones de humedad durante el fraguado.

Los avances recientes han ampliado aún más el campo de aplicación de estos

materiales mediante su combinación con fibras, aditivos químicos y materiales cementantes suplementarios. Esta integración permite desarrollar sistemas híbridos capaces de mejorar simultáneamente múltiples propiedades del concreto, generando soluciones cada vez más eficientes para las necesidades de la ingeniería contemporánea.

En conjunto, las aplicaciones del poliacrilato de sodio en materiales cementicios evidencian su potencial como herramienta tecnológica para mejorar el desempeño del concreto moderno. Su capacidad para actuar como reservorio interno de agua, controlar procesos de fisuración y favorecer el desarrollo de propiedades mecánicas lo posiciona como un material de gran interés para el diseño y construcción de infraestructuras más resistentes, durables y sostenibles.

1.2.5. Ventajas y limitaciones en la construcción

La incorporación de materiales innovadores en la industria de la construcción responde a la necesidad de mejorar el desempeño de las estructuras y optimizar los procesos constructivos. En este contexto, el poliacrilato de sodio ha despertado un creciente interés debido a sus propiedades superabsorbentes y a su capacidad para actuar como un sistema de almacenamiento interno de agua dentro de materiales cementicios. Sin embargo, como ocurre con cualquier tecnología aplicada a la ingeniería, su utilización presenta tanto ventajas como limitaciones que deben ser evaluadas cuidadosamente antes de su implementación en proyectos de infraestructura.

Entre las principales ventajas del poliacrilato de sodio destaca su capacidad para mejorar las condiciones de hidratación del cemento mediante el mecanismo de curado interno. Al absorber agua durante el mezclado y liberarla progresivamente conforme avanza el endurecimiento del concreto, este polímero contribuye a mantener una adecuada disponibilidad de humedad dentro de la matriz cementicia. Como consecuencia, se favorece el desarrollo de las reacciones de hidratación y se incrementa la eficiencia en la formación de productos responsables de la resistencia del concreto.

Otra ventaja importante se relaciona con la reducción de la fisuración temprana. Las fisuras por contracción plástica constituyen uno de los problemas más frecuentes en elementos de concreto expuestos a condiciones ambientales adversas. La capacidad del poliacrilato de sodio para suministrar agua adicional durante las primeras etapas de

endurecimiento permite disminuir las tensiones asociadas a la pérdida acelerada de humedad, reduciendo así la probabilidad de aparición de fisuras superficiales y contribuyendo a mejorar la integridad del material.

Asimismo, el uso de este polímero puede generar beneficios en términos de durabilidad. Al minimizar la formación de fisuras y favorecer una hidratación más completa, se reduce la presencia de vías preferenciales para el ingreso de agentes agresivos al interior del concreto. Esto contribuye a disminuir procesos de deterioro asociados a la penetración de agua, cloruros, sulfatos y otros compuestos que pueden comprometer el desempeño estructural a largo plazo. En consecuencia, las estructuras construidas con concretos modificados mediante polímeros superabsorbentes pueden presentar una vida útil más prolongada y menores requerimientos de mantenimiento.

Desde la perspectiva constructiva, otra ventaja significativa es la posibilidad de complementar o reforzar los métodos tradicionales de curado. En determinadas condiciones de obra, especialmente en zonas con clima seco o elevadas temperaturas, resulta difícil mantener un suministro continuo de agua sobre las superficies recién construidas. El poliacrilato de sodio permite disponer de una reserva interna de humedad que ayuda a reducir la dependencia de factores externos y facilita el control de las condiciones de curado.

En el ámbito de la sostenibilidad, este material también ofrece beneficios relevantes. Al contribuir a incrementar la durabilidad de las estructuras y reducir la necesidad de reparaciones prematuras, favorece un uso más eficiente de los recursos empleados en la construcción. Asimismo, la posibilidad de optimizar el aprovechamiento del agua durante el proceso de hidratación se alinea con las tendencias actuales orientadas hacia prácticas constructivas más sostenibles y responsables con el medio ambiente.

Sin embargo, a pesar de sus múltiples ventajas, la utilización del poliacrilato de sodio también presenta ciertas limitaciones que deben ser consideradas durante el diseño y ejecución de proyectos. Una de las principales está relacionada con la dosificación. La cantidad de polímero incorporada influye directamente sobre el comportamiento final de la mezcla, por lo que una dosificación inadecuada puede

generar efectos no deseados. Mientras cantidades insuficientes pueden limitar los beneficios esperados, dosis excesivas podrían afectar algunas propiedades del concreto, especialmente durante el estado fresco.

Otra limitación importante se encuentra asociada a la variabilidad de comportamiento en función de las características del medio. La capacidad de absorción del poliacrilato de sodio puede verse afectada por la presencia de sales y otros compuestos químicos disueltos en el agua de mezclado o en la pasta de cemento. Debido a ello, los resultados obtenidos pueden variar dependiendo de las características específicas de los materiales empleados y de las condiciones de aplicación.

Desde el punto de vista operativo, también es necesario considerar que la incorporación del polímero requiere procedimientos adecuados de mezclado y control de calidad. Una distribución deficiente dentro de la mezcla puede generar zonas con diferentes niveles de humedad y afectar la uniformidad del comportamiento del concreto. Por esta razón, la aplicación de esta tecnología demanda una adecuada capacitación técnica y el establecimiento de protocolos que garanticen una incorporación homogénea del material.

El costo constituye otra variable que puede influir en la decisión de utilizar polímeros superabsorbentes en determinados proyectos. Aunque los beneficios relacionados con la durabilidad pueden compensar la inversión inicial a largo plazo, la incorporación de materiales especializados puede representar un incremento en los costos directos de producción respecto a mezclas convencionales. Por ello, resulta necesario evaluar la relación costo-beneficio considerando las características y exigencias específicas de cada obra.

Finalmente, debe señalarse que, si bien los resultados obtenidos por numerosas investigaciones son alentadores, aún existen aspectos que continúan siendo objeto de estudio. La interacción del poliacrilato de sodio con diferentes tipos de cemento, agregados y aditivos, así como su comportamiento bajo diversas condiciones ambientales, sigue siendo una línea activa de investigación dentro de la tecnología del concreto. Esto evidencia la necesidad de continuar generando conocimiento científico que permita optimizar su aplicación y ampliar sus posibilidades de uso en la

construcción.

En síntesis, el poliacrilato de sodio representa una alternativa innovadora con un notable potencial para mejorar el desempeño de materiales cementicios. Sus ventajas en términos de curado interno, reducción de fisuras, incremento de la durabilidad y optimización del uso del agua lo convierten en una herramienta valiosa para la ingeniería moderna. No obstante, su implementación requiere una adecuada comprensión de sus limitaciones y de los factores que condicionan su comportamiento, con el fin de garantizar resultados eficientes y técnicamente confiables en proyectos de construcción.

El estudio del poliacrilato de sodio permite comprender el potencial que poseen los polímeros superabsorbentes para transformar el comportamiento tradicional de los materiales cementicios. A lo largo de este capítulo se ha evidenciado que este material no solo destaca por su extraordinaria capacidad de absorción y retención de agua, sino también por su capacidad para intervenir en procesos fundamentales relacionados con la hidratación del cemento, el control de la humedad interna y la reducción de fenómenos que afectan la calidad y durabilidad del concreto.

La revisión de los antecedentes científicos mostró una evolución progresiva de las investigaciones orientadas al uso de polímeros superabsorbentes en ingeniería civil, pasando de estudios enfocados en sus propiedades físicas y químicas a investigaciones que analizan su influencia sobre el desempeño mecánico y la durabilidad de estructuras de concreto. Los avances recientes confirman que estos materiales representan una alternativa tecnológica viable para enfrentar algunos de los principales desafíos asociados a la construcción moderna.

Asimismo, el análisis de las características, composición y mecanismos de funcionamiento del poliacrilato de sodio permitió comprender cómo su estructura molecular le otorga la capacidad de actuar como un reservorio interno de agua, favoreciendo procesos de curado interno y contribuyendo a una hidratación más eficiente del cemento. Estas propiedades explican el creciente interés que ha despertado dentro de la comunidad científica y técnica dedicada al desarrollo de concretos de alto desempeño.

Por otro lado, las aplicaciones identificadas en materiales cementicios evidencian que su utilización puede generar beneficios importantes en términos de reducción de fisuras, mejora de la durabilidad, optimización del uso del agua y fortalecimiento de determinadas propiedades mecánicas. Sin embargo, también se reconoció que su comportamiento depende de factores como la dosificación empleada, las características de la mezcla y las condiciones ambientales, aspectos que requieren una adecuada evaluación para garantizar resultados satisfactorios.

En conjunto, los conocimientos desarrollados en este capítulo constituyen la base conceptual necesaria para comprender la interacción entre el poliacrilato de sodio y el concreto. Este fundamento teórico resulta esencial para analizar posteriormente cómo la incorporación de este polímero puede influir sobre la fisuración por contracción plástica y las propiedades mecánicas del concreto en pavimentos rígidos, temática que será abordada en los capítulos siguientes de esta obra.

CAPÍTULO II

FISURACIÓN POR CONTRACCIÓN PLÁSTICA Y PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO

El concreto constituye el material de construcción más utilizado en el mundo debido a su versatilidad, disponibilidad de materias primas y capacidad para adaptarse a una amplia variedad de aplicaciones estructurales. Desde edificaciones y puentes hasta pavimentos, presas y obras de infraestructura de gran magnitud, este material ha demostrado un desempeño sobresaliente que lo ha convertido en un elemento indispensable para el desarrollo de las sociedades modernas. Sin embargo, a pesar de sus múltiples ventajas, el concreto no está exento de limitaciones asociadas a su comportamiento físico y mecánico, especialmente durante las primeras etapas posteriores a su colocación.

Uno de los problemas más frecuentes que afectan al concreto es la aparición de fisuras durante el proceso de endurecimiento. Aunque muchas de estas discontinuidades pueden presentar dimensiones reducidas en sus etapas iniciales, su presencia representa una preocupación constante para ingenieros, diseñadores y constructores debido a las consecuencias que pueden generar sobre la durabilidad y el desempeño estructural de las obras. Entre los diferentes tipos de fisuración identificados en la literatura especializada, la contracción plástica ocupa un lugar destacado debido a que se manifiesta en las primeras horas posteriores al vaciado, cuando el concreto aún no ha desarrollado la resistencia suficiente para contrarrestar las tensiones generadas por la pérdida de humedad.

La fisuración por contracción plástica se produce cuando la velocidad de evaporación del agua superficial supera la capacidad de reposición proveniente del interior de la mezcla. Como consecuencia, se generan esfuerzos de tracción que provocan la formación de fisuras visibles en la superficie del concreto. Este fenómeno adquiere especial relevancia en elementos de gran área expuesta, como losas y

pavimentos rígidos, donde factores ambientales como la temperatura, la humedad relativa, la radiación solar y la velocidad del viento pueden acelerar significativamente la pérdida de agua durante las primeras edades del material.

Más allá de su impacto estético, las fisuras constituyen puntos vulnerables que pueden facilitar el ingreso de agua, sales, gases y otros agentes agresivos hacia el interior de la estructura. Esta situación favorece procesos de deterioro progresivo que reducen la vida útil del concreto y aumentan los costos asociados a mantenimiento, rehabilitación y reparación. Por esta razón, el control de la fisuración temprana se ha convertido en uno de los principales objetivos de la tecnología moderna del concreto, impulsando el desarrollo de nuevos materiales y estrategias destinadas a minimizar su aparición.

Paralelamente, el desempeño de cualquier estructura de concreto depende en gran medida de sus propiedades mecánicas. La resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad constituyen parámetros fundamentales para evaluar la capacidad del material frente a las cargas y sollicitaciones a las que será sometido durante su vida útil. Estas propiedades no solo determinan la seguridad estructural, sino que también influyen directamente en el comportamiento funcional y la durabilidad de pavimentos, edificaciones y demás elementos constructivos.

En el caso específico de los pavimentos rígidos, las propiedades mecánicas adquieren una importancia aún mayor debido a las condiciones de servicio a las que se encuentran expuestos. Las cargas repetitivas del tránsito vehicular, las variaciones térmicas y las acciones ambientales exigen concretos capaces de desarrollar elevados niveles de resistencia y estabilidad dimensional. Cualquier alteración en estas propiedades puede afectar el desempeño del pavimento y acelerar la aparición de mecanismos de deterioro que comprometan su funcionalidad.

Las investigaciones desarrolladas durante las últimas décadas han demostrado que existe una estrecha relación entre los procesos de fisuración temprana y las propiedades mecánicas del concreto. Un adecuado control de la humedad interna, una correcta hidratación del cemento y una reducción de las tensiones asociadas a la contracción contribuyen a la formación de una microestructura más densa y uniforme,

favoreciendo el desarrollo de mejores niveles de resistencia y durabilidad. Esta relación ha impulsado el estudio de materiales innovadores capaces de intervenir simultáneamente en ambos aspectos.

En este contexto, comprender los mecanismos que originan la fisuración por contracción plástica y los factores que influyen sobre las propiedades mecánicas del concreto resulta fundamental para el diseño de mezclas más eficientes y durables. El conocimiento de estos fenómenos permite identificar estrategias orientadas a mejorar el comportamiento del material desde sus primeras edades y optimizar su desempeño a largo plazo.

El presente capítulo desarrolla los principales fundamentos teóricos relacionados con la fisuración por contracción plástica y las propiedades mecánicas del concreto. Para ello, se revisan investigaciones relevantes sobre estas temáticas, se analizan los factores que influyen en su comportamiento y se presentan los conceptos esenciales que permiten comprender la importancia de controlar la aparición de fisuras y garantizar adecuados niveles de resistencia en pavimentos rígidos y otras aplicaciones de ingeniería civil.

2.1. REFERENTES TEÓRICOS

La comprensión de la fisuración por contracción plástica y de las propiedades mecánicas del concreto ha sido objeto de estudio permanente dentro de la ingeniería civil debido a la influencia directa que ambos aspectos ejercen sobre la calidad, seguridad y durabilidad de las estructuras. A medida que la tecnología del concreto ha evolucionado, también lo ha hecho el interés por identificar los mecanismos responsables de la formación de fisuras tempranas y por desarrollar estrategias capaces de mejorar el comportamiento mecánico del material frente a diversas condiciones de servicio.

Las primeras investigaciones relacionadas con el desempeño del concreto estuvieron orientadas principalmente al análisis de su resistencia a compresión, considerada durante muchos años como el principal indicador de calidad. Sin embargo, el desarrollo de nuevas metodologías de evaluación permitió demostrar que la durabilidad de las estructuras depende de un conjunto mucho más amplio de factores,

entre los cuales destacan la resistencia a la flexión, el módulo de elasticidad, la estabilidad dimensional y el control de los procesos de fisuración. Como consecuencia, la investigación científica comenzó a abordar el comportamiento del concreto desde una perspectiva integral que considera tanto sus propiedades mecánicas como los fenómenos físicos que influyen en su deterioro.

Dentro de este contexto, la fisuración por contracción plástica ha adquirido una relevancia especial debido a que representa uno de los primeros mecanismos de deterioro que pueden afectar al concreto durante sus horas iniciales de endurecimiento. Diversos estudios han demostrado que las fisuras generadas en esta etapa no solo afectan la apariencia superficial del material, sino que también pueden convertirse en puntos vulnerables que facilitan el ingreso de agentes agresivos y aceleran procesos de degradación a largo plazo. Esta situación ha motivado el desarrollo de investigaciones destinadas a comprender las causas de este fenómeno y a proponer alternativas para su control.

Paralelamente, las propiedades mecánicas continúan siendo uno de los aspectos más estudiados dentro de la tecnología del concreto. La capacidad de resistir esfuerzos de compresión, flexión y deformación constituye un requisito fundamental para garantizar el adecuado desempeño estructural de pavimentos, edificaciones y obras de infraestructura. En consecuencia, numerosos investigadores han evaluado la influencia de diferentes materiales, aditivos y técnicas constructivas sobre el comportamiento mecánico del concreto, generando una amplia base de conocimientos que actualmente sustenta gran parte de los procedimientos de diseño y construcción.

Los avances alcanzados durante las últimas décadas han permitido identificar una estrecha relación entre el control de la fisuración y el desarrollo de las propiedades mecánicas. Las investigaciones muestran que una adecuada hidratación del cemento, una correcta gestión de la humedad interna y la reducción de tensiones tempranas favorecen la formación de microestructuras más densas y homogéneas, contribuyendo directamente al incremento de la resistencia y la durabilidad del material. Este enfoque ha impulsado la búsqueda de soluciones innovadoras orientadas a intervenir simultáneamente en ambos aspectos.

Asimismo, la creciente demanda de infraestructuras más durables y sostenibles ha promovido el estudio de materiales capaces de mejorar el comportamiento del concreto frente a condiciones ambientales cada vez más exigentes. La incorporación de fibras, aditivos químicos, materiales cementantes suplementarios y polímeros superabsorbentes constituye parte de las estrategias desarrolladas para reducir la aparición de fisuras y optimizar el desempeño mecánico de las mezclas cementicias. Estas investigaciones han ampliado significativamente las posibilidades de innovación dentro de la ingeniería de materiales.

Los referentes teóricos que se presentan en esta sección reúnen investigaciones relevantes desarrolladas en distintos contextos académicos y profesionales relacionadas con la fisuración por contracción plástica, las propiedades mecánicas del concreto y el desempeño de pavimentos rígidos. Su análisis permite identificar los principales hallazgos científicos, comprender la evolución del conocimiento en estas áreas y establecer el marco conceptual necesario para interpretar la influencia de materiales innovadores sobre el comportamiento del concreto.

De esta manera, la revisión de antecedentes constituye un elemento fundamental para contextualizar la problemática abordada en la presente obra, permitiendo reconocer las contribuciones existentes y las oportunidades de investigación que continúan impulsando el desarrollo de concretos más resistentes, durables y adaptados a las necesidades actuales de la infraestructura moderna.

2.1.1. Investigaciones sobre fisuración por contracción plástica

La fisuración por contracción plástica constituye uno de los fenómenos más estudiados dentro de la tecnología del concreto debido a las implicancias que tiene sobre la calidad, durabilidad y desempeño de las estructuras. Aunque estas fisuras se producen durante las primeras horas posteriores a la colocación del concreto, su impacto puede extenderse durante toda la vida útil de la estructura. Por esta razón, la comunidad científica ha desarrollado numerosas investigaciones orientadas a comprender los mecanismos que originan este fenómeno, identificar los factores que lo favorecen y proponer soluciones capaces de reducir su incidencia.

Las primeras investigaciones sobre fisuración por contracción plástica

estuvieron centradas en el análisis de las condiciones ambientales que intervienen durante el endurecimiento inicial del concreto. Los estudios demostraron que la evaporación acelerada del agua superficial constituye el principal factor desencadenante del fenómeno. Cuando la velocidad de pérdida de agua supera la capacidad de reposición proveniente de la exudación interna, la superficie del concreto comienza a contraerse mientras las capas inferiores mantienen una mayor estabilidad volumétrica. Esta diferencia genera esfuerzos de tracción que, debido a la limitada resistencia del concreto fresco, terminan produciendo fisuras visibles sobre la superficie.

A partir de estos hallazgos, diversas investigaciones analizaron la influencia de variables climáticas como la temperatura ambiente, la humedad relativa, la radiación solar y la velocidad del viento. Los resultados evidenciaron que ambientes cálidos, secos y con elevada circulación de aire incrementan considerablemente la probabilidad de aparición de fisuras. Asimismo, se determinó que el riesgo aumenta cuando la temperatura del concreto es significativamente superior a la del entorno o cuando la superficie expuesta posee grandes dimensiones, como ocurre en losas y pavimentos rígidos.

Con el avance de la investigación científica, el interés se desplazó hacia el estudio de los mecanismos internos que participan en la formación de fisuras. Los investigadores comenzaron a analizar la interacción entre la exudación, la evaporación y la retracción superficial, identificando que la fisuración por contracción plástica es el resultado de un desequilibrio hídrico que ocurre durante una etapa crítica del endurecimiento. Este enfoque permitió comprender que la prevención del fenómeno no depende únicamente de controlar factores ambientales, sino también de optimizar las características de la mezcla de concreto.

Las investigaciones posteriores evaluaron la influencia de la composición del concreto sobre la susceptibilidad a la fisuración. Los estudios demostraron que factores como la relación agua-cemento, el contenido de finos, el tipo de cemento y la granulometría de los agregados influyen directamente en la capacidad de la mezcla para retener humedad y resistir tensiones tempranas. En general, las mezclas con menores relaciones agua-cemento presentan una mayor tendencia a desarrollar tensiones internas debido a la reducción de agua disponible para compensar las pérdidas por evaporación,

situación que ha impulsado la búsqueda de tecnologías complementarias de curado y control de humedad.

Una de las líneas de investigación más importantes ha estado relacionada con la incorporación de fibras al concreto. Diversos estudios internacionales han demostrado que las fibras sintéticas y metálicas pueden reducir significativamente la propagación de fisuras al actuar como elementos de refuerzo distribuidos dentro de la matriz cementicia. Investigaciones revisadas por Muñoz et al. (2021) concluyeron que fibras de acero, polipropileno, vidrio y otros materiales contribuyen a mejorar el comportamiento del concreto frente a procesos de fisuración temprana, especialmente cuando se emplean en dosificaciones adecuadas.

En esta misma línea, Torres (2021) analizó el comportamiento de concretos reforzados con fibras de acero tipo DRAMIX 3D aplicados a pavimentos rígidos. Los resultados demostraron que la incorporación de estas fibras permitió disminuir la incidencia de fisuras superficiales y mejorar la capacidad del material para resistir esfuerzos asociados a deformaciones tempranas. Estos hallazgos reforzaron la idea de que el control de fisuras puede lograrse mediante la modificación de la microestructura interna del concreto y la incorporación de materiales capaces de distribuir más eficientemente las tensiones.

Paralelamente, otras investigaciones se enfocaron en el uso de aditivos químicos y materiales modificadores destinados a mejorar la retención de humedad dentro de la mezcla. En este contexto surgió el interés por los polímeros superabsorbentes, materiales capaces de almacenar agua durante el mezclado y liberarla progresivamente conforme avanza la hidratación del cemento. Diversos estudios han demostrado que estos polímeros pueden reducir significativamente la magnitud de la contracción plástica al proporcionar una fuente adicional de agua durante las primeras horas de endurecimiento.

Entre los avances más relevantes destacan las investigaciones relacionadas con sistemas de curado interno. Jensen y Hansen desarrollaron importantes aportes teóricos al demostrar que los polímeros superabsorbentes pueden funcionar como reservorios internos de agua capaces de compensar parcialmente la pérdida de humedad producida

por la hidratación y la evaporación. Sus estudios evidenciaron que esta tecnología permite disminuir las tensiones asociadas a la retracción temprana y mejorar el desarrollo microestructural del concreto.

De manera complementaria, investigaciones recientes han utilizado técnicas avanzadas de microscopía, modelamiento numérico y análisis de imágenes para estudiar la evolución de las fisuras desde sus etapas iniciales. Estos trabajos han permitido comprender que la fisuración por contracción plástica no constituye un fenómeno aislado, sino parte de un proceso complejo que involucra transferencia de humedad, deformaciones volumétricas y cambios microestructurales dentro de la matriz cementicia. Gracias a estos avances, actualmente es posible predecir con mayor precisión las condiciones que favorecen la aparición de fisuras y desarrollar estrategias preventivas más eficientes.

Las investigaciones contemporáneas también han puesto énfasis en la relación entre fisuración y durabilidad. Diversos autores coinciden en que las fisuras tempranas facilitan la penetración de agentes agresivos, incrementando la vulnerabilidad del concreto frente a procesos de deterioro como corrosión de armaduras, ataque por sulfatos, ciclos de congelamiento y deshielo, así como otros mecanismos asociados al envejecimiento prematuro de las estructuras. Desde esta perspectiva, el control de la fisuración no solo representa una medida estética o constructiva, sino una estrategia fundamental para garantizar la sostenibilidad y vida útil de las infraestructuras.

Actualmente, la investigación sobre fisuración por contracción plástica continúa evolucionando hacia enfoques integrales que combinan el estudio de factores ambientales, propiedades de los materiales y tecnologías innovadoras de control. El desarrollo de nuevos aditivos, fibras y polímeros superabsorbentes refleja la importancia que la comunidad científica otorga a este fenómeno y evidencia la necesidad de seguir generando conocimiento orientado a reducir la aparición de fisuras y mejorar el desempeño global del concreto.

En conjunto, los estudios realizados durante las últimas décadas han permitido comprender que la fisuración por contracción plástica es un fenómeno multifactorial cuya prevención requiere una adecuada combinación de diseño de mezcla, control

ambiental, procedimientos constructivos y materiales innovadores. Estas investigaciones constituyen la base científica que sustenta el desarrollo de soluciones modernas orientadas a producir concretos más resistentes, durables y adaptados a las exigencias de la infraestructura contemporánea.

2.1.2. Investigaciones sobre resistencia mecánica del concreto

La resistencia mecánica constituye una de las propiedades más importantes del concreto debido a que determina su capacidad para soportar las cargas y esfuerzos a los que será sometido durante su vida útil. Desde los primeros estudios sobre materiales cementicios, la resistencia ha sido considerada un indicador fundamental de calidad, desempeño y seguridad estructural. Como consecuencia, una parte significativa de la investigación desarrollada en tecnología del concreto ha estado orientada a comprender los factores que influyen en esta propiedad y a identificar estrategias capaces de mejorarla.

Las primeras investigaciones sobre resistencia mecánica estuvieron enfocadas principalmente en la resistencia a la compresión, debido a que el concreto posee una elevada capacidad para soportar esfuerzos compresivos en comparación con otros tipos de sollicitación. Los estudios iniciales permitieron establecer relaciones entre la resistencia y variables como la relación agua-cemento, el contenido de cemento, las características de los agregados y las condiciones de curado. Estos hallazgos sentaron las bases de los procedimientos modernos de diseño de mezclas utilizados actualmente en la ingeniería civil.

Con el avance de la tecnología de materiales, los investigadores comenzaron a reconocer que la resistencia mecánica del concreto no depende exclusivamente de la cantidad de cemento empleada, sino también de la calidad de la microestructura desarrollada durante el proceso de hidratación. Diversos estudios demostraron que la formación adecuada de productos de hidratación permite generar una matriz más compacta y resistente, capaz de transmitir esfuerzos de manera eficiente entre la pasta de cemento y los agregados. Esta comprensión impulsó el desarrollo de nuevas investigaciones orientadas a optimizar las condiciones internas del concreto desde sus primeras edades.

Posteriormente, la atención científica se amplió hacia otras propiedades mecánicas complementarias, como la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad. Los investigadores identificaron que estas propiedades desempeñan un papel fundamental en estructuras sometidas a cargas dinámicas o esfuerzos de tracción indirecta, particularmente en pavimentos rígidos, losas y elementos expuestos a deformaciones repetitivas. Como resultado, la evaluación integral de las propiedades mecánicas comenzó a sustituir gradualmente la visión tradicional centrada exclusivamente en la resistencia a la compresión.

Dentro de este contexto, numerosas investigaciones analizaron la influencia de materiales modificadores sobre el desempeño mecánico del concreto. Entre ellas destacan los estudios revisados por Muñoz et al. (2021), quienes evaluaron los efectos de diferentes tipos de fibras incorporadas a mezclas cementicias. Los resultados demostraron que materiales como fibras de acero, polipropileno, vidrio, carbono y basalto pueden generar mejoras significativas en la resistencia mecánica cuando son empleados en proporciones adecuadas. Los autores concluyeron que las características geométricas de las fibras y sus dosificaciones influyen directamente sobre el nivel de resistencia alcanzado por el concreto.

De manera similar, Campoy-Bencomo et al. (2021) investigaron el comportamiento mecánico de concretos reforzados con distintos tipos de fibras utilizadas en pavimentos y elementos sometidos a esfuerzos de flexión. Sus resultados evidenciaron que determinadas configuraciones de fibras permiten incrementar la capacidad resistente y mejorar el comportamiento posterior a la fisuración. Asimismo, identificaron que algunas fibras contribuyen a redistribuir esfuerzos dentro de la matriz cementicia, favoreciendo una respuesta estructural más estable frente a cargas crecientes.

Por otro lado, Ortega et al. (2019) estudiaron la incorporación de fibras obtenidas a partir de materiales reciclados dentro de mezclas cementicias. Aunque observaron comportamientos variables en la resistencia a compresión, concluyeron que estos materiales pueden mejorar significativamente la ductilidad y la capacidad de absorción de energía del concreto. Los autores destacaron que el comportamiento mecánico no debe analizarse únicamente desde la perspectiva de la resistencia máxima

alcanzada, sino también considerando la capacidad del material para mantener su integridad estructural después de iniciarse el proceso de falla.

Las investigaciones relacionadas con concretos de alto desempeño también han aportado conocimientos relevantes sobre el desarrollo de la resistencia mecánica. Diversos estudios internacionales han demostrado que la reducción de la relación agua-cemento, acompañada por el uso de aditivos y materiales cementantes suplementarios, permite obtener concretos con resistencias significativamente superiores a las de mezclas convencionales. Sin embargo, estas ventajas suelen estar acompañadas por mayores riesgos de retracción y fisuración temprana, situación que ha impulsado la búsqueda de tecnologías complementarias para controlar dichos efectos.

En este escenario, los polímeros superabsorbentes han comenzado a recibir una atención creciente por parte de la comunidad científica. Las investigaciones desarrolladas durante los últimos años han demostrado que estos materiales pueden influir favorablemente en el desarrollo de las propiedades mecánicas mediante la mejora de las condiciones de hidratación interna. Al suministrar agua adicional durante el endurecimiento, los polímeros favorecen la formación continua de productos de hidratación y contribuyen a reducir la presencia de vacíos asociados a la pérdida prematura de humedad.

Los aportes de Jensen y Hansen sobre curado interno demostraron que la disponibilidad controlada de agua durante las primeras edades del concreto puede generar efectos positivos sobre la resistencia mecánica a largo plazo. Sus investigaciones evidenciaron que una hidratación más completa favorece el desarrollo de una microestructura más densa y homogénea, capaz de soportar mayores niveles de carga. Estos hallazgos abrieron nuevas perspectivas para la utilización de materiales superabsorbentes como herramientas destinadas a optimizar simultáneamente la durabilidad y la resistencia del concreto.

En el ámbito nacional, diversas investigaciones también han explorado alternativas para incrementar las propiedades mecánicas mediante el uso de materiales innovadores. Los resultados obtenidos muestran una tendencia favorable hacia la incorporación de fibras, aditivos y compuestos modificadores que permiten mejorar la

resistencia a compresión, la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad. Estas investigaciones reflejan el creciente interés por desarrollar concretos capaces de responder a las exigencias de la infraestructura moderna y a las condiciones particulares de las distintas regiones del país.

Las investigaciones más recientes han incorporado además técnicas avanzadas de caracterización microestructural, modelamiento computacional y análisis estadístico para comprender con mayor precisión la relación entre composición, hidratación y desempeño mecánico. Gracias a estos avances, actualmente es posible identificar los mecanismos responsables del desarrollo de la resistencia y optimizar el diseño de mezclas en función de los requerimientos específicos de cada aplicación.

En conjunto, los estudios sobre resistencia mecánica del concreto han demostrado que esta propiedad depende de una compleja interacción entre materiales, procesos de hidratación, condiciones ambientales y tecnologías de modificación. Los avances alcanzados durante las últimas décadas han permitido desarrollar concretos con niveles de desempeño cada vez más elevados, consolidando el conocimiento científico necesario para diseñar infraestructuras más seguras, resistentes y durables. Estas investigaciones constituyen un soporte fundamental para comprender cómo materiales innovadores, como el poliacrilato de sodio, pueden contribuir a mejorar simultáneamente la resistencia mecánica y el comportamiento global del concreto.

2.1.3. Estudios recientes en pavimentos rígidos

Los pavimentos rígidos constituyen uno de los sistemas estructurales más importantes dentro de la infraestructura vial moderna debido a su capacidad para soportar elevadas cargas de tránsito, ofrecer una larga vida útil y proporcionar adecuados niveles de servicio durante extensos períodos de operación. Estas características han convertido al concreto hidráulico en uno de los materiales preferidos para la construcción de carreteras, autopistas, aeropuertos, puertos y plataformas industriales. Sin embargo, las crecientes exigencias de movilidad, sostenibilidad y durabilidad han impulsado el desarrollo de investigaciones orientadas a optimizar el desempeño de estos sistemas mediante la incorporación de nuevas tecnologías y materiales innovadores.

Durante las últimas décadas, los estudios sobre pavimentos rígidos han evolucionado desde enfoques centrados exclusivamente en el diseño estructural hacia investigaciones integrales que consideran aspectos relacionados con la durabilidad, el comportamiento mecánico, la sostenibilidad y los costos asociados al ciclo de vida de las infraestructuras. Esta evolución ha permitido comprender que la calidad de un pavimento no depende únicamente de su capacidad resistente inicial, sino también de su comportamiento frente a los mecanismos de deterioro que actúan a lo largo del tiempo.

Uno de los principales temas abordados en investigaciones recientes corresponde al control de fisuras y deformaciones tempranas. Diversos estudios han demostrado que las fisuras originadas durante las primeras etapas de endurecimiento pueden convertirse en puntos críticos que favorecen la aparición de fallas estructurales prematuras. Como consecuencia, gran parte de la investigación contemporánea se ha enfocado en desarrollar estrategias destinadas a minimizar la contracción plástica, controlar la retracción y mejorar las condiciones de curado del concreto empleado en pavimentos.

Las investigaciones desarrolladas en distintos países han evidenciado que el desempeño de los pavimentos rígidos está estrechamente relacionado con la calidad de la microestructura del concreto. Estudios recientes han demostrado que una hidratación más eficiente del cemento permite obtener matrices cementicias más densas y homogéneas, capaces de resistir mejor los esfuerzos generados por el tránsito vehicular y las variaciones ambientales. Este enfoque ha impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías orientadas a optimizar la disponibilidad de agua durante las primeras edades del concreto y mejorar las condiciones de endurecimiento.

Otra línea de investigación relevante está relacionada con la incorporación de fibras en pavimentos rígidos. Campoy-Bencomo et al. (2021) analizaron diferentes aplicaciones de concretos reforzados con fibras en carreteras y pavimentos sometidos a elevadas sollicitaciones mecánicas. Los autores concluyeron que las fibras pueden contribuir significativamente al control de grietas y al incremento de la capacidad residual del concreto después de la fisuración. Asimismo, identificaron mejoras en el comportamiento frente a esfuerzos de flexión, condición especialmente importante para estructuras viales sometidas a cargas repetitivas.

En una línea similar, Torres (2021) investigó la influencia de fibras metálicas tipo DRAMIX 3D en pavimentos rígidos de concreto. Los resultados demostraron que la incorporación de este material permitió reducir la formación de fisuras y mejorar la capacidad resistente del concreto frente a cargas de servicio. El estudio destacó que el uso adecuado de fibras puede contribuir tanto al incremento de la durabilidad como a la optimización del desempeño estructural de los pavimentos.

Las investigaciones recientes también han mostrado un creciente interés por el empleo de materiales reciclados y sostenibles en la construcción de pavimentos. Ortega et al. (2019) evaluaron la incorporación de fibras provenientes de residuos industriales dentro de mezclas cementicias destinadas a aplicaciones estructurales. Los resultados evidenciaron que ciertos materiales reciclados pueden contribuir a mejorar propiedades mecánicas específicas y favorecer el comportamiento posterior a la fisuración, promoviendo simultáneamente prácticas constructivas más sostenibles.

De igual forma, Pérez et al. (2022) analizaron el potencial de fibras de acero obtenidas a partir de neumáticos reciclados para aplicaciones en concreto. Los autores concluyeron que estos materiales representan una alternativa viable para mejorar determinadas propiedades mecánicas y reducir el impacto ambiental asociado a la disposición de residuos. Estas investigaciones reflejan una tendencia creciente hacia la integración de criterios de sostenibilidad dentro del diseño y construcción de pavimentos rígidos.

Los avances más recientes también se han orientado hacia el desarrollo de concretos de alto desempeño para infraestructura vial. Diversos estudios han demostrado que la utilización de relaciones agua-cemento reducidas, combinadas con aditivos químicos y materiales cementantes suplementarios, permite obtener pavimentos con mayores niveles de resistencia y durabilidad. Sin embargo, estas ventajas suelen ir acompañadas de mayores riesgos de retracción y fisuración, situación que ha impulsado la búsqueda de soluciones complementarias para controlar dichos fenómenos.

En este contexto, los polímeros superabsorbentes han comenzado a posicionarse como una alternativa prometedora para aplicaciones en pavimentos rígidos. Las investigaciones recientes señalan que estos materiales pueden actuar como sistemas de

curado interno capaces de suministrar agua adicional durante el proceso de hidratación. Gracias a este mecanismo, es posible reducir las tensiones asociadas a la pérdida prematura de humedad y mejorar simultáneamente las propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto.

Los estudios relacionados con el curado interno han demostrado que la disponibilidad continua de agua dentro de la matriz cementicia favorece el desarrollo de una microestructura más uniforme y resistente. Como consecuencia, los pavimentos construidos con concretos modificados mediante polímeros superabsorbentes presentan menores niveles de fisuración, mejores condiciones de servicio y una mayor resistencia frente a los mecanismos de deterioro asociados al ambiente y al tránsito vehicular.

Otra tendencia destacada en la investigación contemporánea corresponde a la aplicación de herramientas digitales para el análisis del comportamiento de pavimentos rígidos. El uso de modelamiento numérico, simulaciones computacionales, sensores inteligentes y sistemas de monitoreo ha permitido evaluar con mayor precisión la evolución de esfuerzos, deformaciones y procesos de deterioro. Estas tecnologías contribuyen a optimizar el diseño de pavimentos y facilitan la implementación de estrategias preventivas orientadas a maximizar su vida útil.

Asimismo, las investigaciones actuales enfatizan cada vez más el análisis del ciclo de vida de los pavimentos. Los estudios muestran que la selección adecuada de materiales y tecnologías no solo influye en el desempeño inicial de la infraestructura, sino también en los costos de mantenimiento, rehabilitación y operación a largo plazo. Desde esta perspectiva, la incorporación de materiales capaces de reducir fisuras y mejorar la durabilidad representa una inversión estratégica orientada a incrementar la sostenibilidad de las redes viales.

En conjunto, los estudios recientes sobre pavimentos rígidos evidencian una clara orientación hacia el desarrollo de infraestructuras más durables, resilientes y eficientes. La incorporación de fibras, materiales reciclados, aditivos avanzados y polímeros superabsorbentes refleja la evolución de la ingeniería vial hacia soluciones que combinan resistencia mecánica, sostenibilidad y reducción de costos de mantenimiento. Estos avances proporcionan una base científica sólida para continuar

explorando tecnologías innovadoras, como el poliacrilato de sodio, destinadas a mejorar el desempeño de los pavimentos rígidos frente a las exigencias de la infraestructura del siglo XXI.

2.2. NOCIONES BÁSICAS DE LA VARIABLE DEPENDIENTE

La calidad y el desempeño de las estructuras de concreto dependen de una serie de propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad que determinan su comportamiento frente a las condiciones de servicio a las que serán sometidas. En el caso de los pavimentos rígidos, estas propiedades adquieren una importancia particular debido a que las estructuras están expuestas de manera permanente a cargas repetitivas, variaciones térmicas, acciones ambientales y procesos de desgaste que pueden afectar progresivamente su funcionalidad y vida útil. Por esta razón, comprender los factores que influyen en el comportamiento del concreto constituye un aspecto fundamental dentro de la ingeniería de pavimentos.

Entre los fenómenos que afectan con mayor frecuencia a los elementos de concreto durante sus primeras edades destaca la fisuración por contracción plástica. Este proceso se produce cuando la pérdida de agua superficial ocurre a una velocidad superior a la capacidad de reposición interna de la mezcla, generando tensiones de tracción que el concreto fresco aún no posee la capacidad de resistir. Como consecuencia, aparecen fisuras que pueden comprometer la integridad superficial del material y convertirse en puntos vulnerables frente a futuros mecanismos de deterioro. Debido a ello, la fisuración temprana es considerada uno de los principales indicadores asociados al desempeño inicial y a la durabilidad futura de los pavimentos rígidos.

Paralelamente, las propiedades mecánicas representan uno de los pilares fundamentales para evaluar la calidad estructural del concreto. La resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad son parámetros ampliamente utilizados para determinar la capacidad del material frente a diferentes tipos de solicitaciones. Estas propiedades no solo reflejan el nivel de desempeño alcanzado por la mezcla, sino que también permiten estimar su comportamiento durante la vida útil de la infraestructura y su capacidad para resistir los esfuerzos generados por el tránsito y el ambiente.

La resistencia a la compresión constituye tradicionalmente el parámetro más empleado para medir la calidad del concreto debido a su estrecha relación con el grado de hidratación del cemento y con la densidad de la microestructura desarrollada durante el endurecimiento. Sin embargo, en aplicaciones como los pavimentos rígidos, la resistencia a la flexión adquiere una relevancia especial debido a que las losas trabajan principalmente sometidas a esfuerzos de flexión inducidos por las cargas vehiculares. De manera complementaria, el módulo de elasticidad permite evaluar la rigidez del material y su capacidad para deformarse bajo la acción de cargas externas.

La literatura científica ha demostrado que existe una estrecha relación entre los procesos de fisuración temprana y el desarrollo de las propiedades mecánicas del concreto. Un adecuado control de la humedad interna favorece una hidratación más eficiente del cemento, contribuye a la formación de una microestructura más compacta y reduce la aparición de defectos que puedan afectar el desempeño estructural. En contraste, la pérdida prematura de agua y la formación de fisuras pueden generar discontinuidades que limitan la capacidad resistente del material y aceleran su deterioro a largo plazo.

Asimismo, el comportamiento del concreto está condicionado por diversos factores relacionados con la calidad de los materiales constituyentes, las proporciones de la mezcla, las condiciones ambientales y los procedimientos de construcción. Elementos como el tipo de cemento, la granulometría de los agregados, la relación agua-cemento, el proceso de curado y la incorporación de aditivos pueden influir significativamente sobre la evolución de las propiedades mecánicas y sobre la susceptibilidad a la fisuración. Por ello, el análisis integral de estos aspectos resulta indispensable para comprender el desempeño real de los pavimentos rígidos.

En los últimos años, el desarrollo de materiales innovadores ha permitido explorar nuevas estrategias orientadas a mejorar simultáneamente la resistencia mecánica y el control de fisuras. La incorporación de fibras, aditivos especializados y polímeros superabsorbentes ha demostrado que es posible intervenir favorablemente en los procesos de hidratación y en la evolución de la microestructura del concreto. Estas tecnologías han ampliado las posibilidades de diseño y han contribuido al desarrollo de mezclas más resistentes y durables.

Las nociones básicas que se presentan en esta sección tienen como finalidad proporcionar el sustento conceptual necesario para comprender los principales componentes de la variable dependiente analizada en esta obra. Para ello, se abordarán aspectos relacionados con el concreto y sus materiales constituyentes, los pavimentos rígidos, la fisuración por contracción plástica, los factores que influyen en su aparición y las principales propiedades mecánicas empleadas para evaluar el desempeño estructural del material. Este desarrollo permitirá establecer las bases teóricas necesarias para interpretar posteriormente los resultados obtenidos en el caso de estudio y comprender la influencia de materiales innovadores sobre el comportamiento del concreto.

2.2.1. El concreto y sus componentes

El concreto es uno de los materiales de construcción más utilizados a nivel mundial debido a su versatilidad, resistencia, disponibilidad de materias primas y capacidad para adaptarse a una amplia variedad de aplicaciones estructurales. Su empleo se extiende desde edificaciones residenciales y comerciales hasta puentes, presas, túneles, pavimentos, puertos y obras de infraestructura de gran complejidad. La importancia del concreto en la ingeniería moderna radica en su capacidad para soportar elevadas cargas de compresión, su relativa facilidad de producción y su posibilidad de ser moldeado en prácticamente cualquier forma antes de endurecer.

Desde el punto de vista técnico, el concreto puede definirse como un material compuesto obtenido mediante la mezcla homogénea de cemento hidráulico, agua, agregados finos, agregados gruesos y, en determinados casos, aditivos o adiciones especiales destinados a modificar alguna de sus propiedades. Al combinarse estos componentes se produce una serie de reacciones químicas que transforman la mezcla inicialmente plástica en un material sólido capaz de desarrollar resistencia y durabilidad a lo largo del tiempo.

El comportamiento final del concreto depende directamente de las características individuales de cada uno de sus componentes y de la interacción que se produce entre ellos durante el proceso de mezclado, colocación, fraguado y endurecimiento. Por esta razón, la selección adecuada de los materiales constituyentes representa uno de los

aspectos más importantes para garantizar el desempeño estructural y funcional de cualquier elemento elaborado con concreto.

El principio fundamental que permite el funcionamiento del concreto se encuentra en el proceso de hidratación del cemento. Cuando el agua entra en contacto con las partículas de cemento, se desencadenan reacciones químicas que generan nuevos compuestos capaces de unir los agregados y formar una masa sólida resistente. Este proceso continúa desarrollándose durante semanas, meses e incluso años, aunque las ganancias más importantes de resistencia suelen producirse durante las primeras edades del material.

Los componentes básicos del concreto cumplen funciones específicas dentro de la mezcla. El cemento actúa como material aglomerante, siendo responsable de la formación de la pasta que envuelve y une las partículas de agregado. El agua participa en las reacciones químicas de hidratación y proporciona la trabajabilidad necesaria para el mezclado y colocación. Los agregados constituyen el esqueleto estructural del concreto y representan el mayor porcentaje de volumen dentro de la mezcla. Finalmente, los aditivos y adiciones permiten modificar determinadas propiedades para adaptarlas a requerimientos específicos de diseño o construcción.

El cemento es considerado el componente más activo del concreto debido a que participa directamente en los procesos químicos responsables del desarrollo de resistencia. Los cementos hidráulicos modernos están compuestos principalmente por silicatos y aluminatos de calcio que reaccionan con el agua para formar productos de hidratación. Entre ellos destaca el gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H), considerado el principal responsable de la resistencia mecánica del concreto. La cantidad, calidad y tipo de cemento utilizado influyen significativamente sobre las propiedades finales del material.

Por su parte, el agua desempeña un papel esencial tanto en la hidratación del cemento como en la trabajabilidad de la mezcla. Una cantidad insuficiente puede dificultar la colocación y limitar el desarrollo de las reacciones químicas, mientras que un exceso puede generar una estructura más porosa y reducir la resistencia mecánica. Por esta razón, la relación agua-cemento constituye uno de los parámetros más

importantes en el diseño de mezclas de concreto. Numerosas investigaciones han demostrado que pequeñas variaciones en esta relación pueden producir cambios significativos en la resistencia y durabilidad del material.

Los agregados representan aproximadamente entre el 60 % y el 80 % del volumen total del concreto y cumplen una función estructural fundamental. Los agregados finos, comúnmente conocidos como arena, ocupan los espacios existentes entre las partículas más grandes y contribuyen a mejorar la cohesión de la mezcla. Los agregados gruesos, conformados generalmente por grava o piedra triturada, proporcionan estabilidad dimensional y resistencia al material. Las características de estos agregados, incluyendo tamaño, forma, textura superficial y composición mineralógica, influyen directamente sobre el comportamiento mecánico del concreto.

La zona de transición entre la pasta de cemento y los agregados constituye uno de los aspectos más importantes dentro de la microestructura del concreto. Esta región, conocida como zona de transición interfacial, suele presentar una mayor concentración de poros y defectos en comparación con el resto de la matriz cementicia. Debido a ello, muchas investigaciones consideran que esta área representa uno de los puntos más vulnerables del material y desempeña un papel determinante en el desarrollo de resistencia y en los mecanismos de falla.

Además de los componentes tradicionales, el concreto moderno incorpora con frecuencia materiales complementarios destinados a mejorar determinadas propiedades. Entre ellos se encuentran los aditivos químicos, que permiten modificar características como la trabajabilidad, el tiempo de fraguado, la resistencia o la durabilidad. También destacan las adiciones minerales, tales como cenizas volantes, humo de sílice, escorias granuladas y puzolanas naturales, utilizadas para optimizar el desempeño mecánico y ambiental de las mezclas.

En los últimos años, la evolución de la tecnología del concreto ha impulsado la incorporación de materiales innovadores capaces de intervenir directamente en los procesos de hidratación y control de humedad. Entre estos materiales destacan los polímeros superabsorbentes, como el poliacrilato de sodio, cuya capacidad para almacenar y liberar agua de manera controlada ha abierto nuevas posibilidades para

mejorar la durabilidad y reducir fenómenos asociados a la fisuración temprana. Estas innovaciones reflejan la constante evolución del concreto como material de ingeniería y evidencian su capacidad para adaptarse a las exigencias de la construcción contemporánea.

La calidad del concreto no depende únicamente de la calidad individual de sus componentes, sino también de la interacción equilibrada entre ellos. Una adecuada selección de materiales, un diseño de mezcla apropiado y procedimientos constructivos correctos permiten obtener concretos capaces de satisfacer los requerimientos de resistencia, durabilidad y funcionalidad exigidos por las obras modernas. Por esta razón, el conocimiento detallado de los componentes del concreto constituye la base fundamental para comprender su comportamiento y desarrollar soluciones innovadoras orientadas a mejorar su desempeño.

En síntesis, el concreto es un material compuesto cuyo comportamiento está determinado por la interacción entre cemento, agua, agregados y materiales complementarios. Cada uno de estos componentes desempeña funciones específicas que influyen directamente sobre las propiedades mecánicas y la durabilidad del material. Comprender sus características y mecanismos de interacción resulta esencial para interpretar los fenómenos asociados a la fisuración, al desarrollo de resistencia y al desempeño de los pavimentos rígidos, aspectos que constituyen el eje central de la presente investigación.

2.2.2. Pavimentos rígidos

Los pavimentos rígidos constituyen una de las principales soluciones empleadas en la construcción de infraestructura vial debido a su elevada capacidad estructural, larga vida útil y adecuado comportamiento frente a cargas de tránsito intensivas. Su utilización se ha incrementado significativamente durante las últimas décadas como consecuencia de la necesidad de desarrollar carreteras, autopistas, aeropuertos, terminales logísticas y vías urbanas capaces de soportar condiciones de servicio cada vez más exigentes. Estas características han convertido al concreto hidráulico en un material estratégico para el desarrollo económico y social de numerosos países.

Desde el punto de vista ingenieril, un pavimento rígido puede definirse como

una estructura conformada principalmente por una losa de concreto hidráulico apoyada sobre una base, subbase o directamente sobre la subrasante, diseñada para distribuir las cargas vehiculares hacia las capas inferiores mediante la elevada rigidez que caracteriza al concreto. A diferencia de los pavimentos flexibles, cuya capacidad estructural depende de la interacción de múltiples capas granulares y asfálticas, los pavimentos rígidos concentran gran parte de su capacidad resistente en la propia losa de concreto.

La denominación de “rígido” proviene precisamente de la elevada rigidez del concreto endurecido. Esta propiedad permite que las cargas aplicadas sobre la superficie se distribuyan en áreas relativamente amplias, reduciendo los esfuerzos transmitidos a las capas inferiores y disminuyendo las deformaciones producidas por el tránsito. Como consecuencia, los pavimentos rígidos suelen presentar una mayor estabilidad estructural y una menor susceptibilidad a deformaciones permanentes en comparación con otras alternativas de pavimentación.

El funcionamiento estructural de un pavimento rígido se basa en la teoría de placas apoyadas sobre una fundación elástica. Cuando una carga vehicular actúa sobre la superficie de la losa, esta genera esfuerzos internos que son distribuidos a través del concreto y transmitidos gradualmente hacia la base y la subrasante. La capacidad de la losa para resistir dichos esfuerzos depende principalmente de la resistencia a la flexión del concreto, del módulo de elasticidad del material y de las condiciones de soporte proporcionadas por las capas inferiores.

Uno de los principales componentes de los pavimentos rígidos es la losa de concreto hidráulico. Este elemento constituye la capa de rodadura y representa la parte estructural más importante del sistema. Su espesor y características mecánicas son definidos durante la etapa de diseño en función de variables como el volumen de tránsito esperado, las cargas de diseño, las condiciones climáticas y la calidad de la subrasante. La losa debe ser capaz de soportar millones de ciclos de carga durante su vida útil sin experimentar deterioros significativos que comprometan su funcionalidad.

Debajo de la losa se ubican generalmente la base y la subbase, capas que cumplen funciones relacionadas con la distribución uniforme de cargas, el drenaje, la reducción de deformaciones y la protección de la subrasante. Aunque estas capas

poseen una importancia estructural menor en comparación con los pavimentos flexibles, su adecuada construcción resulta fundamental para garantizar el desempeño a largo plazo del sistema. Una base deficiente puede generar asentamientos diferenciales, pérdida de soporte y deterioro prematuro de la losa de concreto.

La subrasante constituye la capa natural o mejorada sobre la cual se apoya toda la estructura del pavimento. Sus características geotécnicas influyen directamente sobre el comportamiento del sistema, ya que una capacidad portante insuficiente puede generar deformaciones excesivas y afectar el desempeño estructural. Por esta razón, la evaluación y mejoramiento de la subrasante forman parte esencial de los procesos de diseño y construcción de pavimentos rígidos.

Los pavimentos rígidos pueden clasificarse de acuerdo con diferentes criterios constructivos y estructurales. Entre las clasificaciones más comunes se encuentran los pavimentos de concreto simple con juntas, los pavimentos reforzados con acero, los pavimentos continuamente reforzados y los pavimentos reforzados con fibras. Cada uno de estos sistemas presenta características particulares relacionadas con el control de fisuras, la distribución de esfuerzos y los procedimientos constructivos empleados durante su ejecución.

Los pavimentos de concreto simple con juntas constituyen la modalidad más utilizada en infraestructura vial. En este sistema, las juntas se incorporan con la finalidad de controlar los movimientos generados por cambios de temperatura, retracción y otras deformaciones volumétricas. Estas juntas permiten dirigir la aparición de fisuras hacia ubicaciones previamente definidas, evitando que el agrietamiento ocurra de manera aleatoria sobre la superficie de la losa.

Uno de los aspectos más críticos en el comportamiento de los pavimentos rígidos es el control de la fisuración. Las fisuras pueden originarse por diversas causas, incluyendo contracción plástica, retracción por secado, cambios térmicos, asentamientos diferenciales y cargas excesivas. Aunque algunas fisuras son inevitables debido a la naturaleza del concreto, su control adecuado resulta esencial para preservar la durabilidad y funcionalidad de la infraestructura. Por esta razón, gran parte de la investigación moderna se orienta al desarrollo de tecnologías capaces de reducir la

aparición de fisuras y minimizar sus efectos.

Las propiedades mecánicas del concreto desempeñan un papel fundamental en el comportamiento de los pavimentos rígidos. La resistencia a la flexión es particularmente importante debido a que las losas trabajan principalmente sometidas a esfuerzos flexionantes inducidos por las cargas vehiculares. De igual manera, la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad contribuyen a determinar la capacidad estructural y la respuesta del pavimento frente a diferentes condiciones de servicio.

Desde la perspectiva de la durabilidad, los pavimentos rígidos presentan importantes ventajas frente a otras alternativas constructivas. Su elevada resistencia al desgaste, menor susceptibilidad a deformaciones permanentes y capacidad para soportar condiciones ambientales severas permiten alcanzar vidas útiles que frecuentemente superan los veinte o treinta años cuando son diseñados y construidos adecuadamente. Estas características han favorecido su utilización en corredores de alto tránsito y en proyectos donde se busca minimizar costos de mantenimiento a largo plazo.

Sin embargo, el desempeño de los pavimentos rígidos depende en gran medida de la calidad del concreto utilizado durante su construcción. Factores como la hidratación del cemento, el control de humedad, la resistencia mecánica y la presencia de fisuras tempranas pueden influir significativamente sobre su comportamiento futuro. En consecuencia, la incorporación de materiales innovadores capaces de mejorar estas propiedades representa una de las principales líneas de investigación dentro de la ingeniería vial contemporánea.

En este contexto, tecnologías como los polímeros superabsorbentes han comenzado a recibir una atención creciente debido a su potencial para optimizar las condiciones de hidratación, reducir la fisuración temprana y mejorar la durabilidad del concreto. Estas innovaciones buscan responder a las necesidades actuales de infraestructura mediante el desarrollo de pavimentos más resistentes, sostenibles y capaces de mantener niveles adecuados de servicio durante períodos prolongados.

En síntesis, los pavimentos rígidos constituyen sistemas estructurales de elevada importancia para el transporte moderno debido a su capacidad resistente y prolongada

vida útil. Su desempeño depende de la interacción entre la losa de concreto, las capas de soporte y las propiedades mecánicas del material utilizado. Comprender sus fundamentos resulta esencial para analizar los fenómenos de fisuración y evaluar el impacto de nuevas tecnologías orientadas a mejorar la durabilidad y eficiencia de la infraestructura vial.

2.2.3. Fisuración por contracción plástica

La fisuración por contracción plástica constituye uno de los fenómenos más frecuentes y complejos que afectan al concreto durante las primeras etapas de su endurecimiento. Aunque ocurre antes de que el material alcance resistencias significativas, sus efectos pueden extenderse durante toda la vida útil de la estructura, comprometiendo aspectos relacionados con la durabilidad, el desempeño mecánico y la apariencia superficial de los elementos construidos. Debido a ello, este fenómeno ha sido objeto de numerosas investigaciones dentro de la tecnología del concreto y continúa siendo una de las principales preocupaciones para ingenieros, constructores y especialistas en pavimentos rígidos.

La contracción plástica puede definirse como la reducción volumétrica que experimenta el concreto fresco durante las primeras horas posteriores a su colocación como consecuencia de la pérdida de agua superficial por evaporación. Este fenómeno ocurre cuando la velocidad con la que el agua abandona la superficie del concreto supera la velocidad con la que el agua proveniente del interior puede reemplazarla mediante el proceso de exudación. Como resultado, se genera una disminución del volumen superficial que produce tensiones de tracción en un material que aún no ha desarrollado suficiente resistencia para soportarlas.

Cuando estas tensiones superan la limitada capacidad resistente del concreto en estado plástico, aparecen fisuras visibles sobre la superficie. Generalmente, estas fisuras se presentan de manera paralela entre sí y pueden extenderse varios centímetros o incluso metros dependiendo de las dimensiones del elemento y de las condiciones ambientales existentes durante el proceso de endurecimiento. Aunque inicialmente suelen presentar una profundidad limitada, pueden convertirse en puntos vulnerables que facilitan la entrada de agua y agentes agresivos al interior del concreto.

El proceso de fisuración por contracción plástica está estrechamente relacionado con el equilibrio hídrico que existe en la superficie del concreto recién colocado. Durante las primeras horas posteriores al vaciado, el agua presente en la mezcla comienza a ascender hacia la superficie mediante el fenómeno de exudación. Este proceso permite reemplazar parcialmente la humedad que se pierde por evaporación. Sin embargo, cuando las condiciones ambientales favorecen una evaporación excesiva, el suministro interno resulta insuficiente y se inicia el proceso de contracción superficial.

Diversos estudios han demostrado que la fisuración por contracción plástica suele manifestarse dentro de las primeras seis horas posteriores al vaciado, aunque el período crítico puede variar según las características de la mezcla y las condiciones ambientales. En muchos casos, las fisuras aparecen incluso antes de que el concreto complete su proceso inicial de fraguado, momento en el cual la estructura interna del material todavía se encuentra en formación y posee una capacidad limitada para resistir deformaciones.

La magnitud de este fenómeno depende de múltiples factores que actúan simultáneamente. Entre los más importantes se encuentran la temperatura ambiente, la humedad relativa, la velocidad del viento y la temperatura del concreto. Cuando la temperatura aumenta, la capacidad del aire para absorber humedad se incrementa, favoreciendo una evaporación más rápida. De igual manera, una baja humedad relativa intensifica la pérdida de agua desde la superficie, mientras que el viento acelera la renovación del aire húmedo que se encuentra sobre el concreto, incrementando aún más la velocidad de evaporación.

La radiación solar constituye otro factor determinante debido a que eleva la temperatura superficial del concreto y favorece la pérdida acelerada de humedad. Por esta razón, los elementos horizontales de gran superficie expuesta, como losas y pavimentos rígidos, suelen ser especialmente vulnerables a la aparición de fisuras por contracción plástica. En estos casos, la combinación de altas temperaturas, baja humedad relativa y velocidades elevadas de viento puede generar condiciones extremadamente críticas durante las primeras horas de endurecimiento.

Además de los factores ambientales, las características de la mezcla también influyen significativamente sobre la susceptibilidad a la fisuración. La relación agua-cemento, el contenido de cemento, la granulometría de los agregados y la presencia de aditivos pueden modificar la capacidad de la mezcla para retener humedad y resistir deformaciones tempranas. Mezclas con relaciones agua-cemento reducidas suelen presentar mayores riesgos de contracción debido a la menor disponibilidad de agua libre para compensar las pérdidas por evaporación.

La fisuración por contracción plástica se diferencia de otros tipos de fisuración debido a que ocurre antes del endurecimiento completo del concreto. A diferencia de la retracción por secado, que se desarrolla durante semanas o meses como consecuencia de la pérdida progresiva de humedad, la contracción plástica tiene lugar durante las primeras horas y está directamente relacionada con el comportamiento del concreto fresco. Asimismo, se diferencia de las fisuras térmicas y estructurales porque no está asociada inicialmente a cargas externas ni a gradientes significativos de temperatura dentro del elemento.

Las consecuencias de este fenómeno trascienden el aspecto superficial del concreto. Diversas investigaciones han demostrado que las fisuras tempranas pueden actuar como vías preferenciales para el ingreso de agua, cloruros, sulfatos, dióxido de carbono y otros agentes agresivos. Esto favorece procesos de deterioro que incluyen corrosión de armaduras, pérdida de resistencia, degradación química y reducción de la durabilidad general de la estructura. En pavimentos rígidos, estas fisuras pueden evolucionar progresivamente bajo la acción del tránsito y las condiciones ambientales, acelerando el deterioro funcional del sistema.

Desde la perspectiva mecánica, la presencia de fisuras genera discontinuidades dentro de la matriz cementicia que afectan la distribución de esfuerzos y reducen la capacidad resistente del material. Aunque algunas fisuras por contracción plástica pueden parecer insignificantes durante sus etapas iniciales, su evolución puede influir negativamente sobre el desempeño estructural a largo plazo, especialmente cuando las condiciones de servicio favorecen su propagación.

Debido a estas implicancias, el control de la fisuración por contracción plástica

constituye una de las prioridades dentro de la construcción de pavimentos rígidos y otras estructuras de concreto. Entre las estrategias más utilizadas se encuentran la protección superficial frente a la evaporación, la aplicación oportuna de métodos de curado, el uso de fibras de refuerzo, la optimización del diseño de mezcla y la incorporación de materiales innovadores capaces de mejorar la disponibilidad de agua durante las primeras edades.

En los últimos años, los polímeros superabsorbentes han surgido como una alternativa prometedora para reducir este tipo de fisuración. Su capacidad para almacenar agua durante el mezclado y liberarla progresivamente conforme disminuye la humedad interna permite mantener condiciones más favorables para la hidratación del cemento y disminuir las tensiones asociadas a la pérdida prematura de agua. Esta tecnología ha abierto nuevas perspectivas para el desarrollo de concretos más resistentes y durables, especialmente en aplicaciones donde el control de la fisuración constituye un requisito fundamental.

En síntesis, la fisuración por contracción plástica representa un fenómeno complejo originado por el desequilibrio entre la evaporación superficial y la capacidad de reposición interna de agua dentro del concreto fresco. Su aparición puede comprometer la durabilidad, resistencia y funcionalidad de las estructuras, convirtiéndose en un aspecto crítico para el diseño y construcción de pavimentos rígidos. Comprender sus causas, mecanismos y consecuencias resulta esencial para desarrollar estrategias efectivas de prevención y optimizar el desempeño del concreto frente a las exigencias de la infraestructura moderna.

2.2.4. Factores que influyen en la fisuración

La fisuración por contracción plástica es un fenómeno multifactorial cuya aparición depende de la interacción simultánea de condiciones ambientales, características de los materiales, propiedades de la mezcla y procedimientos constructivos. Aunque el mecanismo fundamental que origina este tipo de fisuración está relacionado con la pérdida prematura de agua superficial, la magnitud y severidad del problema pueden variar considerablemente en función de diversos factores que actúan durante las primeras horas posteriores al vaciado del concreto. Comprender estos

factores resulta fundamental para desarrollar estrategias efectivas de prevención y garantizar un adecuado desempeño de las estructuras.

Los factores ambientales constituyen uno de los grupos de variables con mayor influencia sobre la aparición de fisuras por contracción plástica. Entre ellos, la temperatura ambiente desempeña un papel determinante debido a que regula la velocidad de evaporación del agua presente en la superficie del concreto. A medida que la temperatura aumenta, también lo hace la capacidad del aire para absorber vapor de agua, favoreciendo una pérdida más acelerada de humedad. Como consecuencia, los concretos colocados en ambientes cálidos presentan un mayor riesgo de desarrollar tensiones superficiales asociadas a la contracción plástica.

La humedad relativa del aire también ejerce una influencia significativa sobre el proceso de fisuración. Cuando la humedad relativa es baja, el aire posee una mayor capacidad para captar agua desde la superficie del concreto, incrementando la velocidad de evaporación. En contraste, ambientes con elevada humedad relativa reducen el gradiente de humedad entre el concreto y el entorno, disminuyendo la pérdida de agua y reduciendo la probabilidad de fisuración. Esta relación explica por qué las fisuras por contracción plástica son más frecuentes en regiones áridas o durante épocas de clima seco.

La velocidad del viento constituye otro factor crítico debido a su capacidad para remover continuamente la capa de aire húmedo que se forma sobre la superficie del concreto recién colocado. Este fenómeno mantiene activo el proceso de evaporación y acelera la pérdida de agua. Incluso bajo condiciones moderadas de temperatura, la presencia de vientos intensos puede generar velocidades de evaporación suficientemente elevadas para provocar fisuración temprana. Por esta razón, la protección contra corrientes de aire es una práctica habitual en obras ejecutadas bajo condiciones climáticas desfavorables.

La radiación solar directa también contribuye al incremento del riesgo de fisuración. La exposición prolongada a la radiación solar eleva la temperatura superficial del concreto y favorece la evaporación acelerada del agua. Además, puede generar diferencias térmicas entre la superficie y las capas internas de la mezcla,

intensificando los procesos de contracción. Este efecto adquiere especial relevancia en pavimentos rígidos debido a la gran superficie expuesta durante las etapas iniciales de endurecimiento.

Además de las condiciones ambientales, las características de la mezcla influyen considerablemente en la susceptibilidad del concreto a desarrollar fisuras. Uno de los parámetros más importantes es la relación agua-cemento. Esta relación determina la cantidad de agua disponible para participar en las reacciones de hidratación y para compensar las pérdidas ocasionadas por la evaporación. Mezclas con relaciones agua-cemento muy bajas pueden presentar una menor disponibilidad de agua libre, incrementando la probabilidad de desarrollar tensiones internas asociadas a la pérdida de humedad.

El contenido de cemento también puede afectar la magnitud de la contracción plástica. Mezclas con elevados contenidos de cemento suelen generar mayores niveles de calor de hidratación y presentan una mayor demanda interna de agua durante las primeras edades. Esta situación puede incrementar el riesgo de fisuración cuando no existen mecanismos adecuados para mantener la humedad dentro de la matriz cementicia. Por otro lado, contenidos excesivamente bajos pueden limitar el desarrollo de resistencia y afectar la capacidad del concreto para soportar tensiones tempranas.

Las propiedades de los agregados representan otro factor relevante. El tamaño máximo, la forma, la textura superficial y la granulometría de los agregados influyen sobre la estabilidad dimensional de la mezcla y sobre la capacidad de retención de humedad. Agregados bien graduados favorecen una distribución más uniforme de los esfuerzos internos y contribuyen a reducir las deformaciones asociadas a la contracción. Asimismo, la utilización de agregados con baja absorción puede ayudar a mantener una mayor disponibilidad de agua dentro de la mezcla.

La exudación del concreto constituye un mecanismo natural que influye directamente sobre la aparición de fisuras por contracción plástica. La exudación consiste en el ascenso del agua hacia la superficie como consecuencia de la sedimentación de las partículas sólidas presentes en la mezcla. Cuando la velocidad de exudación es suficiente para compensar la evaporación, el riesgo de fisuración

disminuye considerablemente. Sin embargo, si la evaporación supera la capacidad de exudación, se inicia el proceso de contracción superficial que puede conducir a la formación de fisuras.

Los procedimientos constructivos también desempeñan un papel fundamental en el control de la fisuración. Retrasos en las operaciones de acabado, deficiencias en la aplicación del curado o una protección insuficiente frente a condiciones ambientales adversas pueden incrementar significativamente la probabilidad de aparición de fisuras. Del mismo modo, prácticas inadecuadas durante el mezclado, transporte y colocación del concreto pueden afectar la uniformidad de la mezcla y favorecer la generación de tensiones internas.

El tiempo de inicio del curado constituye uno de los factores más importantes para prevenir la fisuración temprana. Diversas investigaciones han demostrado que la aplicación oportuna de métodos de curado permite reducir la pérdida de humedad superficial y mantener condiciones adecuadas para la hidratación del cemento. Por el contrario, cualquier retraso en la implementación de estas medidas incrementa la exposición del concreto a los efectos de la evaporación y favorece la aparición de fisuras.

Otro factor de creciente interés corresponde a la incorporación de materiales modificadores dentro de la mezcla. El uso de fibras, aditivos químicos y polímeros superabsorbentes ha demostrado una capacidad significativa para reducir la susceptibilidad del concreto a la fisuración temprana. Las fibras ayudan a distribuir las tensiones generadas por la contracción, mientras que los polímeros superabsorbentes proporcionan una fuente adicional de agua que contribuye a mantener la humedad interna durante las primeras etapas de endurecimiento.

Las dimensiones y geometría de los elementos construidos también influyen sobre el comportamiento frente a la contracción plástica. Elementos de gran superficie expuesta, como pavimentos, losas industriales y plataformas aeroportuarias, presentan mayores riesgos debido a la amplia área disponible para la evaporación. Asimismo, espesores reducidos favorecen una pérdida más rápida de humedad y aumentan la susceptibilidad a la formación de fisuras.

Las investigaciones más recientes han demostrado que la fisuración por contracción plástica no puede atribuirse a una única causa, sino al efecto combinado de múltiples variables que interactúan simultáneamente. Por esta razón, las estrategias modernas de prevención se basan en un enfoque integral que considera aspectos relacionados con el diseño de mezcla, las condiciones ambientales, los procedimientos constructivos y el uso de tecnologías innovadoras destinadas a controlar la humedad interna del concreto.

En síntesis, la fisuración por contracción plástica es el resultado de la interacción entre factores ambientales, características de los materiales y prácticas constructivas. Variables como la temperatura, la humedad relativa, el viento, la radiación solar, la relación agua-cemento, la exudación y el curado desempeñan un papel determinante en la aparición de este fenómeno. La comprensión de estos factores constituye una herramienta esencial para diseñar estrategias de control que permitan reducir la incidencia de fisuras y mejorar la durabilidad de los pavimentos rígidos y demás estructuras de concreto.

2.2.5. Exudación y evaporación

La exudación y la evaporación son dos fenómenos físicos fundamentales que ocurren durante las primeras etapas del endurecimiento del concreto y que desempeñan un papel decisivo en la aparición de fisuras por contracción plástica. La interacción entre ambos procesos determina el equilibrio hídrico de la mezcla durante las horas iniciales posteriores al vaciado. Cuando dicho equilibrio se altera y la pérdida de agua por evaporación supera la capacidad de reposición proporcionada por la exudación, se generan condiciones favorables para el desarrollo de tensiones superficiales que pueden conducir a la formación de fisuras.

La comprensión de estos fenómenos resulta esencial dentro de la tecnología del concreto debido a que permiten explicar gran parte de los problemas asociados a la fisuración temprana y al desempeño inicial de pavimentos rígidos, losas y otros elementos con amplias superficies expuestas. Por esta razón, numerosas investigaciones han estudiado la relación existente entre exudación, evaporación y contracción plástica, identificando mecanismos que actualmente constituyen la base de las estrategias

modernas de prevención.

La exudación, también conocida como sangrado del concreto o *bleeding*, es un proceso natural que ocurre cuando parte del agua de mezclado asciende hacia la superficie debido a la sedimentación de las partículas sólidas que conforman la mezcla. Durante las primeras horas posteriores al vaciado, los agregados y partículas de cemento comienzan a asentarse por efecto de la gravedad, desplazando parte del agua hacia niveles superiores. Como resultado, se forma una película superficial de agua que puede observarse en muchos concretos recién colocados.

Este fenómeno cumple una función importante durante las primeras etapas del endurecimiento debido a que contribuye a mantener húmeda la superficie del concreto. La presencia de agua exudada ayuda a compensar parcialmente las pérdidas ocasionadas por la evaporación y reduce el riesgo de que la superficie experimente contracciones excesivas. En condiciones favorables, la exudación puede proporcionar suficiente humedad para mantener un adecuado equilibrio hídrico hasta que el concreto alcance niveles de resistencia que le permitan soportar pequeñas deformaciones sin fisurarse.

La magnitud de la exudación depende de diversos factores relacionados con la composición de la mezcla. La relación agua-cemento constituye una de las variables más influyentes, ya que mezclas con mayores contenidos de agua suelen presentar mayores tasas de exudación. Asimismo, el contenido de cemento, la granulometría de los agregados, la presencia de materiales finos y el uso de aditivos pueden modificar significativamente el comportamiento exudativo del concreto.

Las mezclas con elevados contenidos de partículas finas tienden a reducir la exudación debido a que estas partículas incrementan la capacidad de retención de agua dentro de la matriz cementicia. De manera similar, algunos aditivos químicos pueden alterar la viscosidad de la pasta y limitar el movimiento ascendente del agua. Aunque una reducción moderada de la exudación puede resultar beneficiosa en determinados casos, una disminución excesiva puede incrementar la susceptibilidad del concreto a la contracción plástica cuando las condiciones ambientales favorecen la evaporación acelerada.

Por otro lado, la evaporación corresponde al proceso mediante el cual el agua presente en la superficie del concreto se transforma en vapor y es transferida al ambiente circundante. Este fenómeno ocurre de manera continua desde el momento en que el concreto es colocado y está influenciado principalmente por las condiciones climáticas existentes en el lugar de construcción. La velocidad de evaporación determina la cantidad de agua que abandona la superficie durante un período determinado y constituye uno de los factores más importantes relacionados con la fisuración temprana.

La temperatura ambiente ejerce una influencia directa sobre la evaporación debido a que el aire caliente posee una mayor capacidad para absorber humedad. Cuando la temperatura aumenta, la velocidad de evaporación también se incrementa, favoreciendo una pérdida más rápida de agua superficial. De igual manera, la temperatura del propio concreto puede afectar significativamente este proceso, ya que concretos colocados a temperaturas elevadas suelen experimentar mayores tasas de evaporación.

La humedad relativa representa otro factor determinante. Cuando el aire contiene poca humedad, existe una mayor diferencia entre la cantidad de vapor presente en la superficie del concreto y la del ambiente circundante, situación que favorece una evaporación acelerada. Por el contrario, ambientes con elevada humedad relativa reducen esta diferencia y disminuyen la velocidad de pérdida de agua.

La velocidad del viento también desempeña un papel importante al remover constantemente la capa de aire húmedo que se forma sobre la superficie del concreto. Este proceso mantiene activo el gradiente de humedad y permite que la evaporación continúe desarrollándose a una velocidad elevada. Incluso en condiciones moderadas de temperatura, la presencia de corrientes de aire intensas puede incrementar considerablemente el riesgo de fisuración.

La radiación solar directa contribuye adicionalmente a la evaporación al elevar la temperatura superficial del concreto y aumentar la energía disponible para la transformación del agua en vapor. Por esta razón, los pavimentos rígidos y otras estructuras horizontales expuestas directamente al sol suelen presentar mayores niveles

de vulnerabilidad durante las primeras horas posteriores al vaciado.

La relación entre exudación y evaporación constituye el elemento central para comprender la fisuración por contracción plástica. Mientras la velocidad de exudación sea igual o superior a la velocidad de evaporación, la superficie del concreto conserva un adecuado contenido de humedad y las deformaciones permanecen dentro de niveles tolerables. Sin embargo, cuando la evaporación supera la capacidad de reposición proporcionada por la exudación, la superficie comienza a secarse y a experimentar contracciones diferenciales respecto a las capas inferiores.

Estas contracciones generan tensiones de tracción que el concreto fresco aún no puede resistir debido a su limitada resistencia mecánica. Como consecuencia, aparecen fisuras superficiales que generalmente se desarrollan siguiendo patrones paralelos y perpendiculares a la dirección predominante de las tensiones. Este proceso puede ocurrir incluso antes de que el concreto complete su fraguado inicial, convirtiéndose en uno de los mecanismos de deterioro más tempranos que afectan a las estructuras de concreto.

Las investigaciones modernas han demostrado que el control de la relación entre exudación y evaporación constituye una de las estrategias más efectivas para prevenir la fisuración temprana. Entre las medidas más utilizadas se encuentran la protección de las superficies mediante barreras contra el viento, la reducción de la exposición solar, la aplicación temprana de métodos de curado y la incorporación de materiales capaces de suministrar agua adicional durante las primeras edades del concreto.

En este contexto, los polímeros superabsorbentes han despertado un interés creciente debido a su capacidad para actuar como reservorios internos de agua. Estos materiales pueden complementar el proceso de exudación tradicional al proporcionar una fuente adicional de humedad cuando la evaporación comienza a superar la capacidad natural de reposición de la mezcla. De esta manera, contribuyen a mantener un equilibrio hídrico más estable y reducen la probabilidad de aparición de fisuras por contracción plástica.

En síntesis, la exudación y la evaporación constituyen fenómenos complementarios que regulan el comportamiento hídrico del concreto durante sus

primeras etapas de endurecimiento. Mientras la exudación proporciona agua hacia la superficie, la evaporación provoca su pérdida hacia el ambiente. El equilibrio entre ambos procesos determina la estabilidad dimensional del concreto fresco y condiciona directamente la aparición de fisuras por contracción plástica. Comprender estos mecanismos resulta esencial para diseñar estrategias de prevención que permitan mejorar la durabilidad y desempeño de los pavimentos rígidos y demás estructuras de concreto.

2.2.6. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión es una de las propiedades mecánicas más importantes del concreto y constituye el parámetro más utilizado para evaluar su calidad, capacidad estructural y desempeño general. Desde los inicios de la ingeniería moderna, esta propiedad ha sido considerada el principal indicador de comportamiento del concreto debido a que la mayoría de las estructuras construidas con este material están diseñadas para soportar esfuerzos compresivos generados por cargas permanentes, cargas de servicio y acciones ambientales. Por esta razón, la resistencia a la compresión se ha consolidado como el criterio fundamental para el diseño, control de calidad y aceptación de mezclas cementicias en proyectos de construcción.

Desde un punto de vista conceptual, la resistencia a la compresión puede definirse como la máxima capacidad que posee el concreto para resistir esfuerzos de compresión antes de alcanzar la falla. Esta propiedad expresa el nivel de carga que el material puede soportar por unidad de área cuando es sometido a fuerzas que tienden a reducir su volumen o acortar sus dimensiones. Generalmente se expresa en megapascales (MPa) o kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm^2), dependiendo del sistema de unidades empleado.

La importancia de esta propiedad radica en que refleja de manera indirecta numerosos aspectos relacionados con la calidad interna del concreto. Una adecuada resistencia a la compresión suele indicar una hidratación eficiente del cemento, una buena compactación, una baja porosidad y una adecuada interacción entre la pasta cementicia y los agregados. En consecuencia, esta propiedad no solo permite evaluar la capacidad resistente del material, sino también inferir aspectos relacionados con su

durabilidad y comportamiento futuro.

El desarrollo de la resistencia a la compresión está estrechamente vinculado al proceso de hidratación del cemento. Cuando el agua entra en contacto con las partículas cementicias, se producen reacciones químicas que generan nuevos compuestos responsables de unir los agregados y formar una estructura sólida. Entre estos productos destaca el gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H), considerado el principal responsable de la resistencia mecánica del concreto. A medida que estas reacciones avanzan, la estructura interna se vuelve más densa y resistente, incrementándose progresivamente la capacidad para soportar cargas.

La evolución de la resistencia no ocurre de manera instantánea, sino que se desarrolla gradualmente con el tiempo. Durante los primeros días posteriores al vaciado, el concreto experimenta ganancias aceleradas de resistencia debido a la intensa actividad de hidratación. Posteriormente, el crecimiento continúa a un ritmo más lento durante semanas, meses e incluso años. No obstante, la resistencia medida a los 28 días suele utilizarse como referencia estándar para la evaluación y diseño de mezclas debido a que representa un nivel de madurez suficientemente representativo del comportamiento estructural del material.

Diversos factores influyen sobre el desarrollo de la resistencia a la compresión. Entre ellos, la relación agua-cemento es considerada uno de los más importantes. Esta relación determina la cantidad de agua disponible para la hidratación y la porosidad final de la matriz cementicia. Investigaciones desarrolladas desde los trabajos pioneros de Abrams demostraron que existe una relación inversa entre la cantidad de agua utilizada y la resistencia alcanzada. En términos generales, mezclas con menores relaciones agua-cemento desarrollan resistencias más elevadas debido a que generan estructuras internas más compactas y menos porosas.

El contenido y tipo de cemento también influyen significativamente sobre esta propiedad. Diferentes cementos poseen velocidades de hidratación y composiciones químicas particulares que afectan el desarrollo de resistencia. Asimismo, un incremento adecuado en el contenido de cemento puede favorecer la formación de mayores cantidades de productos de hidratación, aunque cantidades excesivas pueden generar

problemas asociados a la retracción y al calor de hidratación.

Las características de los agregados representan otro factor determinante. La resistencia, dureza, forma, textura superficial y granulometría de los agregados influyen directamente sobre la capacidad resistente del concreto. Agregados de alta calidad permiten una mejor transferencia de esfuerzos dentro de la matriz cementicia, mientras que agregados débiles o deficientemente graduados pueden convertirse en puntos vulnerables que limitan el desempeño mecánico del material.

La compactación adecuada constituye igualmente un requisito fundamental para alcanzar elevados niveles de resistencia. Durante el proceso de colocación, la presencia de vacíos o bolsas de aire puede reducir significativamente la capacidad resistente del concreto. Por esta razón, las técnicas de vibrado y consolidación buscan eliminar la mayor cantidad posible de espacios vacíos y garantizar una distribución homogénea de los componentes de la mezcla.

El curado representa otro de los factores más importantes para el desarrollo de la resistencia a la compresión. Mantener condiciones adecuadas de humedad y temperatura durante las primeras edades permite que las reacciones de hidratación continúen desarrollándose de manera eficiente. Cuando el concreto pierde agua prematuramente debido a evaporación excesiva o deficiencias en el curado, la hidratación se ve limitada y la resistencia final puede reducirse considerablemente. Este aspecto adquiere especial relevancia en regiones con climas cálidos o secos, donde el riesgo de pérdida temprana de humedad es elevado.

La resistencia a la compresión se determina mediante ensayos estandarizados realizados sobre especímenes cilíndricos o cúbicos elaborados bajo condiciones controladas. Durante la prueba, la muestra es sometida a una carga creciente hasta alcanzar la falla. El valor máximo registrado se divide entre el área transversal del espécimen, obteniéndose así la resistencia correspondiente. Este procedimiento permite comparar diferentes mezclas y verificar el cumplimiento de los requisitos establecidos en las especificaciones técnicas de cada proyecto.

En pavimentos rígidos, la resistencia a la compresión constituye un indicador

importante del nivel de calidad alcanzado por el concreto. Aunque el diseño estructural de estos sistemas suele estar más relacionado con la resistencia a la flexión, existe una estrecha correlación entre ambas propiedades. En general, concretos con mayores resistencias a compresión presentan también mejores desempeños frente a otras sollicitaciones mecánicas y una mayor durabilidad frente a los agentes de deterioro.

Las investigaciones recientes han demostrado que materiales innovadores como fibras, adiciones minerales y polímeros superabsorbentes pueden influir sobre el desarrollo de la resistencia a la compresión. En particular, los polímeros superabsorbentes han mostrado resultados prometedores al mejorar las condiciones de hidratación interna y favorecer una formación más completa de los productos cementicios responsables de la resistencia. Cuando son utilizados en dosificaciones adecuadas, estos materiales pueden contribuir al desarrollo de microestructuras más densas y homogéneas.

Asimismo, diversos estudios han señalado que la resistencia a la compresión no debe analizarse de forma aislada, sino como parte de un conjunto de propiedades que determinan el comportamiento integral del concreto. Factores como la resistencia a la flexión, el módulo de elasticidad, la durabilidad y la susceptibilidad a la fisuración complementan la información proporcionada por este parámetro y permiten obtener una evaluación más completa del desempeño estructural.

En síntesis, la resistencia a la compresión representa la propiedad mecánica más utilizada para evaluar la calidad y capacidad resistente del concreto. Su desarrollo depende de la interacción entre la composición de la mezcla, el proceso de hidratación, las condiciones de curado y las características de los materiales empleados. Comprender los mecanismos que influyen sobre esta propiedad resulta fundamental para diseñar concretos capaces de satisfacer las exigencias estructurales de los pavimentos rígidos y demás obras de infraestructura moderna.

2.2.7. Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión constituye una de las propiedades mecánicas más importantes del concreto, especialmente en elementos estructurales sometidos a esfuerzos flexionantes, como pavimentos rígidos, losas, vigas, plataformas industriales

y pistas aeroportuarias. A diferencia de la resistencia a la compresión, que evalúa la capacidad del material para soportar cargas que tienden a reducir su volumen, la resistencia a la flexión mide la capacidad del concreto para resistir esfuerzos combinados de compresión y tracción generados cuando una carga provoca la curvatura del elemento estructural.

En el ámbito de la ingeniería vial, esta propiedad adquiere una relevancia particular debido a que los pavimentos rígidos trabajan principalmente como placas apoyadas sobre una fundación elástica. Cuando una carga vehicular actúa sobre la superficie de la losa de concreto, se generan esfuerzos de flexión que producen compresión en una parte de la sección y tracción en la parte opuesta. Debido a que el concreto posee una elevada resistencia a la compresión pero una limitada capacidad para resistir esfuerzos de tracción, la resistencia a la flexión se convierte en uno de los parámetros más representativos para evaluar su comportamiento estructural.

La resistencia a la flexión puede definirse como la máxima tensión que el concreto es capaz de soportar antes de producirse la falla cuando se encuentra sometido a esfuerzos flexionantes. Este parámetro también es conocido como módulo de rotura y representa una medida indirecta de la capacidad del material para resistir esfuerzos de tracción. Generalmente se expresa en megapascales (MPa) o kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm^2), dependiendo de las especificaciones técnicas y normas aplicables.

La importancia de esta propiedad radica en que las fallas observadas en pavimentos rígidos suelen estar estrechamente relacionadas con esfuerzos de flexión generados por el tránsito vehicular. Cuando las tensiones inducidas superan la resistencia a la flexión del concreto, se producen fisuras que pueden evolucionar progresivamente hasta comprometer la funcionalidad y durabilidad de la infraestructura. Por esta razón, muchas metodologías modernas de diseño de pavimentos utilizan la resistencia a la flexión como uno de los principales parámetros de diseño estructural.

El desarrollo de la resistencia a la flexión está estrechamente vinculado con la calidad de la matriz cementicia y con la capacidad de la microestructura para transmitir esfuerzos entre la pasta de cemento y los agregados. Durante el proceso de hidratación, los productos cementicios formados generan enlaces que permiten distribuir las cargas

aplicadas sobre el material. A medida que la hidratación progresa y la microestructura se vuelve más compacta, la capacidad resistente frente a esfuerzos flexionantes también se incrementa.

Diversos factores influyen sobre el desarrollo de esta propiedad. Uno de los más importantes es la relación agua-cemento. Al igual que ocurre con la resistencia a la compresión, relaciones agua-cemento reducidas favorecen la formación de estructuras internas más densas y resistentes. Sin embargo, una reducción excesiva puede incrementar la susceptibilidad a la retracción y a la fisuración temprana, afectando indirectamente el desempeño a flexión del material.

El tipo y contenido de cemento también ejercen una influencia significativa sobre la resistencia a la flexión. Cementos con mayores capacidades de desarrollo resistente suelen generar concretos con mejores propiedades mecánicas. Asimismo, el adecuado contenido de cemento permite obtener una pasta capaz de proporcionar una unión eficiente entre los agregados y favorecer la transferencia de esfuerzos dentro de la matriz cementicia.

Las características de los agregados desempeñan igualmente un papel fundamental. La forma, textura superficial, tamaño máximo y resistencia de los agregados influyen directamente sobre la capacidad del concreto para resistir esfuerzos de flexión. Agregados angulares y de elevada resistencia suelen proporcionar mejores niveles de adherencia con la pasta cementicia, favoreciendo una distribución más eficiente de las tensiones internas.

La zona de transición interfacial entre la pasta de cemento y los agregados constituye uno de los sectores más críticos para el comportamiento a flexión. Esta región suele presentar mayores niveles de porosidad y constituye uno de los puntos donde frecuentemente se inicia la propagación de fisuras. Por ello, cualquier mejora en la calidad de esta zona puede traducirse en incrementos significativos de la resistencia a la flexión del concreto.

Las condiciones de curado también tienen una influencia determinante sobre esta propiedad. Un adecuado suministro de humedad durante las primeras edades permite

una hidratación más completa del cemento y favorece la formación de una microestructura más homogénea. Por el contrario, la pérdida prematura de agua puede limitar el desarrollo resistente y generar microfisuras que reducen la capacidad del concreto para soportar esfuerzos de flexión.

La resistencia a la flexión se determina generalmente mediante ensayos de laboratorio realizados sobre vigas prismáticas de concreto. Durante la prueba, la muestra es sometida a cargas controladas hasta alcanzar la falla. A partir de la carga máxima registrada y de las dimensiones del espécimen se calcula el módulo de rotura correspondiente. Este procedimiento permite evaluar la capacidad resistente del concreto bajo condiciones similares a las que experimentan los pavimentos durante su vida útil.

Existe una relación directa entre la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión; sin embargo, dicha relación no es estrictamente proporcional. Generalmente, a medida que aumenta la resistencia a la compresión también se incrementa la resistencia a la flexión, aunque esta última depende además de factores relacionados con la calidad de la microestructura y la capacidad del material para resistir esfuerzos de tracción. Por ello, la resistencia a la compresión no puede sustituir completamente la evaluación específica de la resistencia a la flexión en aplicaciones donde esta propiedad resulta crítica.

En los últimos años, numerosas investigaciones han explorado estrategias destinadas a incrementar la resistencia a la flexión mediante la incorporación de materiales modificadores. Entre las alternativas más estudiadas se encuentran las fibras metálicas, sintéticas y naturales, las cuales contribuyen a controlar la propagación de fisuras y mejorar la capacidad resistente después de iniciada la falla. Diversos estudios han demostrado que estos materiales pueden incrementar significativamente la capacidad de absorción de energía y mejorar el comportamiento estructural de pavimentos rígidos.

Asimismo, investigaciones recientes han evaluado el uso de polímeros superabsorbentes como una herramienta para mejorar indirectamente la resistencia a la flexión mediante la optimización del proceso de hidratación. Al proporcionar agua

adicional durante las primeras edades, estos materiales favorecen el desarrollo de una matriz cementicia más compacta y reducen la aparición de microfisuras asociadas a la pérdida prematura de humedad. Como consecuencia, es posible obtener mejoras en la capacidad resistente del concreto frente a esfuerzos flexionantes.

Desde la perspectiva de la durabilidad, una adecuada resistencia a la flexión contribuye a reducir la formación y propagación de grietas bajo cargas de servicio, mejorando el desempeño general de la estructura y prolongando su vida útil. Esta condición resulta particularmente importante en pavimentos rígidos, donde las cargas repetitivas del tránsito pueden acelerar el deterioro cuando el concreto posee una capacidad insuficiente para resistir esfuerzos flexionantes.

En síntesis, la resistencia a la flexión constituye una propiedad mecánica esencial para evaluar el comportamiento estructural del concreto en pavimentos rígidos y otros elementos sometidos a cargas flexionantes. Su desarrollo depende de factores relacionados con la composición de la mezcla, la calidad de los materiales, las condiciones de curado y la integridad de la microestructura. Comprender los mecanismos que influyen sobre esta propiedad resulta fundamental para diseñar concretos capaces de ofrecer elevados niveles de desempeño, seguridad y durabilidad en las infraestructuras modernas.

2.2.8. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad constituye una de las propiedades mecánicas fundamentales del concreto, ya que permite evaluar su rigidez y capacidad para deformarse bajo la acción de cargas externas. Aunque con frecuencia la atención se centra en propiedades como la resistencia a la compresión o la resistencia a la flexión, el módulo de elasticidad desempeña un papel igualmente importante debido a que determina la respuesta del material frente a esfuerzos aplicados durante su vida útil. Esta propiedad resulta especialmente relevante en pavimentos rígidos, donde las deformaciones generadas por el tránsito y las condiciones ambientales influyen directamente sobre el comportamiento estructural y la durabilidad de la infraestructura.

Desde el punto de vista mecánico, el módulo de elasticidad puede definirse como la relación existente entre el esfuerzo aplicado a un material y la deformación que

este experimenta dentro de su rango elástico. En otras palabras, representa la capacidad del concreto para resistir deformaciones cuando es sometido a cargas. Cuanto mayor sea el módulo de elasticidad, más rígido será el material y menor será la deformación producida para una misma carga aplicada.

Esta propiedad se fundamenta en la denominada Ley de Hooke, la cual establece que, dentro de ciertos límites, la deformación es proporcional al esfuerzo aplicado. En materiales ideales, esta relación es lineal; sin embargo, el concreto presenta un comportamiento más complejo debido a su naturaleza heterogénea y a la presencia de microfisuras internas. Como consecuencia, la relación esfuerzo-deformación del concreto no es perfectamente lineal, aunque el módulo de elasticidad continúa siendo una herramienta fundamental para caracterizar su comportamiento estructural.

El módulo de elasticidad suele expresarse en megapascales (MPa) o gigapascales (GPa) y representa uno de los parámetros más utilizados en el análisis y diseño de estructuras de concreto. Su conocimiento permite estimar deformaciones, deflexiones, redistribución de esfuerzos y comportamiento frente a cargas repetitivas, aspectos esenciales para garantizar la seguridad y funcionalidad de las obras de ingeniería civil.

La importancia del módulo de elasticidad en pavimentos rígidos radica en que la rigidez de la losa de concreto influye directamente sobre la distribución de cargas hacia las capas inferiores. Un concreto con un módulo de elasticidad elevado presenta una mayor capacidad para distribuir las cargas vehiculares sobre áreas más amplias, reduciendo las tensiones transmitidas a la base y a la subrasante. Como consecuencia, se minimizan las deformaciones y se mejora el desempeño estructural del pavimento frente a condiciones de servicio exigentes.

El desarrollo del módulo de elasticidad está estrechamente relacionado con la microestructura interna del concreto. A medida que avanza el proceso de hidratación del cemento, se forman nuevos productos cementicios que incrementan la densidad y cohesión de la matriz. Este proceso reduce la porosidad y fortalece la unión entre la pasta cementicia y los agregados, contribuyendo al incremento progresivo de la rigidez del material.

Entre los factores que influyen sobre el módulo de elasticidad, la resistencia a la compresión ocupa un lugar destacado. Numerosas investigaciones han demostrado que existe una correlación directa entre ambas propiedades. En términos generales, concretos con mayores resistencias a la compresión tienden a presentar módulos de elasticidad más elevados debido a la formación de microestructuras más compactas y resistentes. No obstante, esta relación no es absoluta, ya que otros factores también desempeñan un papel importante.

Las características de los agregados constituyen uno de los elementos que más influyen sobre el módulo de elasticidad. Debido a que los agregados representan la mayor parte del volumen del concreto, sus propiedades mecánicas afectan significativamente la rigidez global del material. Agregados de alta resistencia y elevado módulo de elasticidad contribuyen a incrementar la rigidez del concreto, mientras que agregados más deformables pueden reducirla. Asimismo, la forma, tamaño y distribución de los agregados influyen sobre la transferencia de esfuerzos dentro de la matriz cementicia.

La relación agua-cemento también afecta el desarrollo de esta propiedad. Mezclas con menores relaciones agua-cemento suelen generar estructuras internas más densas y menos porosas, favoreciendo mayores niveles de rigidez. Por el contrario, contenidos excesivos de agua incrementan la porosidad y reducen la capacidad del material para resistir deformaciones, disminuyendo el módulo de elasticidad.

Las condiciones de curado representan otro factor fundamental. Un adecuado suministro de humedad durante las primeras edades permite que las reacciones de hidratación se desarrollen de manera eficiente, favoreciendo la formación de una matriz cementicia más compacta. La pérdida prematura de agua puede limitar este proceso y afectar negativamente tanto la resistencia como la rigidez del concreto.

El módulo de elasticidad se determina experimentalmente mediante ensayos de compresión realizados sobre especímenes cilíndricos de concreto. Durante la prueba se registra simultáneamente la carga aplicada y la deformación producida, obteniéndose la curva esfuerzo-deformación característica del material. A partir de esta información se calcula el módulo de elasticidad correspondiente, el cual representa la pendiente de la

curva dentro de un rango específico de comportamiento.

Desde el punto de vista estructural, esta propiedad permite estimar fenómenos como deformaciones instantáneas, deflexiones bajo carga, distribución de esfuerzos y comportamiento frente a cargas repetitivas. En pavimentos rígidos, estas evaluaciones son esenciales para determinar la capacidad de la losa para soportar el tránsito vehicular sin experimentar deformaciones excesivas que comprometan su funcionalidad.

Las investigaciones recientes han demostrado que materiales innovadores como fibras, adiciones minerales y polímeros superabsorbentes pueden influir sobre el módulo de elasticidad mediante modificaciones en la microestructura del concreto. En particular, los polímeros superabsorbentes favorecen una hidratación más eficiente al proporcionar agua adicional durante las primeras edades del material. Este mecanismo contribuye a la formación de una matriz más homogénea y puede mejorar la rigidez del concreto cuando se emplean dosificaciones adecuadas.

Asimismo, diversos estudios han señalado que el módulo de elasticidad está estrechamente relacionado con la durabilidad de las estructuras. Concretos con niveles adecuados de rigidez suelen presentar una mejor distribución de esfuerzos internos y una menor susceptibilidad a deformaciones excesivas, condiciones que favorecen un mejor comportamiento a largo plazo frente a cargas de servicio y factores ambientales.

En el caso específico de los pavimentos rígidos, un adecuado módulo de elasticidad contribuye a optimizar la transferencia de cargas, reducir las deflexiones y mejorar la capacidad estructural del sistema. Sin embargo, niveles excesivamente elevados de rigidez también pueden incrementar la susceptibilidad a ciertos tipos de fisuración cuando el material no posee suficiente capacidad para disipar tensiones generadas por cambios volumétricos o térmicos. Por esta razón, el diseño moderno busca alcanzar un equilibrio adecuado entre resistencia, rigidez y capacidad de deformación.

En síntesis, el módulo de elasticidad representa una propiedad mecánica fundamental para evaluar la rigidez y comportamiento estructural del concreto. Su desarrollo depende de la calidad de los materiales, las condiciones de hidratación, la

composición de la mezcla y la integridad de la microestructura interna. Comprender esta propiedad resulta esencial para el diseño de pavimentos rígidos y otras estructuras de concreto capaces de soportar las exigencias mecánicas y ambientales propias de la infraestructura moderna.

2.2.9. Durabilidad del concreto

La durabilidad del concreto constituye una de las propiedades más importantes dentro de la ingeniería civil moderna, debido a que determina la capacidad de una estructura para conservar sus características funcionales, mecánicas y estéticas a lo largo del tiempo frente a las diversas condiciones de servicio y exposición ambiental. En la actualidad, el concepto de durabilidad ha adquirido una relevancia comparable a la resistencia mecánica, ya que una estructura no solo debe ser capaz de soportar las cargas para las cuales fue diseñada, sino también mantener su desempeño durante décadas con requerimientos mínimos de mantenimiento y reparación.

Tradicionalmente, la calidad del concreto se evaluaba principalmente a partir de su resistencia a la compresión. Sin embargo, el desarrollo de investigaciones relacionadas con el deterioro prematuro de estructuras evidenció que una elevada resistencia no garantiza necesariamente una adecuada vida útil. Como consecuencia, la durabilidad comenzó a ser considerada un criterio esencial dentro del diseño, producción y control de calidad del concreto, especialmente en infraestructuras sometidas a condiciones ambientales agresivas o a elevados niveles de sollicitación mecánica.

Desde una perspectiva técnica, la durabilidad puede definirse como la capacidad del concreto para resistir la acción de agentes físicos, químicos, mecánicos y ambientales sin experimentar deterioros significativos que comprometan su funcionalidad o seguridad estructural. Esta propiedad refleja la habilidad del material para conservar sus características originales durante el período de servicio previsto, manteniendo niveles aceptables de desempeño frente a los factores que actúan sobre él.

La importancia de la durabilidad es particularmente evidente en pavimentos rígidos, puentes, estructuras hidráulicas, obras marítimas y edificaciones expuestas a ambientes severos. En estos casos, la interacción continua con agua, variaciones de

temperatura, agentes químicos, cargas repetitivas y otros factores de deterioro puede acelerar el envejecimiento de los materiales y reducir significativamente la vida útil de la infraestructura. Por ello, el diseño de concretos durables constituye una prioridad dentro de la ingeniería contemporánea.

La durabilidad del concreto está estrechamente relacionada con su microestructura interna. Un concreto con baja porosidad, adecuada densidad y una red de poros poco conectada presenta una mayor capacidad para impedir el ingreso de agentes agresivos. En contraste, materiales con elevados niveles de vacíos o fisuras permiten una mayor penetración de agua, gases y sustancias químicas, incrementando la vulnerabilidad frente a procesos de deterioro. En consecuencia, la calidad de la matriz cementicia y la integridad de su microestructura desempeñan un papel fundamental en el comportamiento a largo plazo del material.

Uno de los principales factores que afectan la durabilidad es la permeabilidad del concreto. Esta propiedad determina la facilidad con la que líquidos, gases o sustancias disueltas pueden desplazarse a través de la estructura interna del material. Una elevada permeabilidad favorece la penetración de agentes agresivos que pueden desencadenar procesos de deterioro físico y químico. Por esta razón, gran parte de las estrategias modernas orientadas a incrementar la durabilidad buscan reducir la conectividad de los poros y mejorar la compacidad de la matriz cementicia.

Las fisuras constituyen otro elemento crítico relacionado con la durabilidad. Aunque algunas fisuras pueden ser inevitables debido a la naturaleza del concreto, su presencia incrementa significativamente la vulnerabilidad de la estructura. Las fisuras actúan como vías preferenciales para el ingreso de agua, cloruros, sulfatos, dióxido de carbono y otros agentes agresivos que pueden acelerar el deterioro. En pavimentos rígidos, las fisuras tempranas generadas por contracción plástica pueden convertirse en puntos de inicio para mecanismos de degradación que afectan el desempeño futuro de la infraestructura.

Entre los principales mecanismos de deterioro que afectan la durabilidad del concreto destaca la corrosión de las armaduras de acero. Este proceso ocurre cuando agentes como los cloruros o la carbonatación alcanzan el refuerzo metálico y alteran las

condiciones químicas que normalmente lo protegen. La corrosión genera expansión del acero debido a la formación de óxidos, produciendo tensiones internas que pueden provocar desprendimientos, fisuración y pérdida de capacidad estructural.

El ataque por sulfatos constituye otro mecanismo importante de deterioro. Los sulfatos presentes en suelos, aguas subterráneas o ambientes industriales pueden reaccionar con determinados componentes de la pasta de cemento, generando productos expansivos que producen fisuración y pérdida de resistencia. La magnitud de este fenómeno depende de la composición del cemento, la permeabilidad del concreto y las condiciones de exposición.

La carbonatación es un proceso químico que ocurre cuando el dióxido de carbono presente en la atmósfera penetra en el concreto y reacciona con compuestos alcalinos de la pasta cementicia. Este fenómeno reduce el pH del material y puede favorecer la corrosión de las armaduras cuando alcanza la profundidad donde se encuentra el acero de refuerzo. La velocidad de carbonatación está influenciada por factores como la porosidad, la humedad y la calidad general del concreto.

Los ciclos de humedad y secado también afectan la durabilidad debido a los cambios volumétricos que generan dentro del material. La repetida absorción y pérdida de agua puede producir tensiones internas, favorecer procesos de retracción y contribuir a la propagación de fisuras existentes. De manera similar, las variaciones térmicas provocan expansiones y contracciones que, cuando son repetitivas, pueden acelerar el deterioro de la estructura.

En regiones sometidas a bajas temperaturas, los ciclos de congelamiento y deshielo representan una amenaza adicional para la durabilidad. El agua presente dentro de los poros se expande al congelarse, generando presiones internas capaces de producir fisuración progresiva y pérdida de material superficial. Aunque este fenómeno no tiene una incidencia significativa en muchas zonas tropicales, constituye un factor determinante en países con climas fríos.

La calidad de los materiales empleados influye directamente sobre la durabilidad del concreto. La selección adecuada del cemento, los agregados, el agua y los aditivos

permite desarrollar mezclas más resistentes frente a los mecanismos de deterioro. Asimismo, el control de la relación agua-cemento resulta fundamental debido a que una menor cantidad de agua generalmente conduce a estructuras más compactas y menos permeables.

Las condiciones de curado representan otro aspecto crítico. Un curado adecuado favorece una hidratación más completa del cemento y contribuye a la formación de una microestructura más densa y resistente. Por el contrario, la pérdida prematura de humedad puede incrementar la porosidad, favorecer la aparición de fisuras y reducir significativamente la capacidad del concreto para resistir agentes agresivos.

Las investigaciones recientes han demostrado que los materiales innovadores pueden desempeñar un papel importante en la mejora de la durabilidad. Entre ellos destacan las fibras, las adiciones minerales y los polímeros superabsorbentes. Estos últimos han mostrado resultados especialmente prometedores debido a su capacidad para proporcionar curado interno, mejorar la hidratación del cemento y reducir la formación de fisuras tempranas. Como consecuencia, contribuyen al desarrollo de concretos con microestructuras más homogéneas y menos susceptibles a procesos de deterioro.

En pavimentos rígidos, la durabilidad adquiere una relevancia estratégica debido a que influye directamente sobre los costos de mantenimiento y sobre la vida útil de la infraestructura. Un pavimento durable requiere menos intervenciones correctivas, mantiene mejores niveles de servicio y genera menores costos operativos durante su período de funcionamiento. Por esta razón, las tendencias actuales en ingeniería vial priorizan cada vez más el desarrollo de concretos capaces de combinar elevada resistencia mecánica con una excelente durabilidad.

En síntesis, la durabilidad del concreto representa la capacidad del material para conservar sus propiedades y desempeño frente a las acciones del ambiente y las condiciones de servicio a lo largo del tiempo. Esta propiedad depende de factores relacionados con la composición de la mezcla, la calidad de la microestructura, la presencia de fisuras, las condiciones de exposición y los procedimientos constructivos. Comprender los mecanismos que influyen sobre la durabilidad resulta fundamental para

diseñar pavimentos rígidos y estructuras de concreto capaces de ofrecer un comportamiento seguro, eficiente y sostenible durante toda su vida útil.

El análisis desarrollado a lo largo de este capítulo permitió comprender la importancia que tienen la fisuración por contracción plástica y las propiedades mecánicas dentro del comportamiento integral del concreto utilizado en pavimentos rígidos. Ambos aspectos constituyen elementos fundamentales para evaluar la calidad, desempeño y durabilidad de las estructuras, debido a que influyen directamente sobre su capacidad para resistir las exigencias mecánicas y ambientales a las que estarán sometidas durante su vida útil.

La revisión de los referentes teóricos evidenció que la fisuración por contracción plástica continúa siendo uno de los principales desafíos de la tecnología del concreto. Las investigaciones analizadas demuestran que este fenómeno se origina por el desequilibrio entre la evaporación superficial y la capacidad de reposición interna de agua, generando tensiones tempranas que pueden producir fisuras antes de que el material desarrolle suficiente resistencia. Asimismo, los estudios revisados muestran que la presencia de estas fisuras puede afectar negativamente la durabilidad y favorecer la aparición de procesos de deterioro a largo plazo.

Del mismo modo, se observó que las propiedades mecánicas del concreto constituyen indicadores esenciales para determinar su comportamiento estructural. La resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad permiten evaluar la capacidad del material para soportar cargas, distribuir esfuerzos y mantener su estabilidad durante el servicio. Estas propiedades dependen de múltiples factores relacionados con la calidad de los materiales, el diseño de mezcla, el proceso de hidratación y las condiciones de curado, lo que evidencia la complejidad inherente al comportamiento del concreto.

Las nociones básicas desarrolladas permitieron comprender la interacción existente entre los componentes del concreto, el funcionamiento estructural de los pavimentos rígidos y los mecanismos que intervienen en la formación de fisuras tempranas. Asimismo, se destacó la relevancia de fenómenos como la exudación y la evaporación, cuya influencia resulta determinante durante las primeras horas posteriores

al vaciado. El análisis de estos procesos permitió establecer una base conceptual sólida para entender la relación entre el control de la humedad y el desarrollo de las propiedades mecánicas.

Por otra parte, el estudio de la durabilidad evidenció que la calidad del concreto no debe evaluarse únicamente en función de la resistencia alcanzada, sino también considerando su capacidad para conservar sus características frente a agentes físicos, químicos y ambientales. La reducción de fisuras, el control de la permeabilidad y la optimización de la microestructura constituyen factores esenciales para garantizar una vida útil prolongada y reducir los costos asociados al mantenimiento de la infraestructura.

Los contenidos abordados también permitieron identificar la importancia de las tecnologías innovadoras orientadas al mejoramiento del concreto. Los avances científicos recientes demuestran que materiales como fibras, aditivos especializados y polímeros superabsorbentes pueden contribuir significativamente al control de la fisuración y al fortalecimiento de las propiedades mecánicas. Estas soluciones representan una respuesta a las crecientes exigencias de la infraestructura moderna y reflejan la evolución permanente de la ingeniería de materiales.

En conjunto, este capítulo proporciona el sustento teórico necesario para comprender la variable dependiente analizada en la presente obra, estableciendo las bases conceptuales que explican los mecanismos de fisuración y el comportamiento mecánico del concreto en pavimentos rígidos. Estos conocimientos resultan indispensables para interpretar adecuadamente los efectos derivados de la incorporación de poliacrilato de sodio y evaluar su potencial como alternativa tecnológica para la reducción de fisuras y el mejoramiento del desempeño estructural.

A partir de los fundamentos desarrollados en los capítulos precedentes, es posible avanzar hacia el análisis práctico de la investigación, donde se examinará la aplicación del poliacrilato de sodio en mezclas de concreto para pavimentos rígidos y su influencia sobre la fisuración por contracción plástica, la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad. De esta manera, el estudio transita desde la comprensión teórica de las variables hacia la evaluación experimental de una

solución innovadora orientada a la construcción de infraestructuras más resistentes, durables y sostenibles.

CAPÍTULO III

CASO DE ESTUDIO: INFLUENCIA DEL POLIACRILATO DE SODIO EN CONCRETOS PARA PAVIMENTOS RÍGIDOS

Los avances científicos y tecnológicos en el campo de los materiales de construcción han permitido desarrollar nuevas alternativas destinadas a mejorar el desempeño del concreto frente a las exigencias cada vez mayores de la infraestructura moderna. Entre estas innovaciones, los polímeros superabsorbentes han despertado un interés creciente debido a su capacidad para modificar los procesos de hidratación, controlar la humedad interna y contribuir a la reducción de fenómenos que afectan la durabilidad de las estructuras. Dentro de este grupo de materiales, el poliacrilato de sodio destaca por sus propiedades de absorción y liberación controlada de agua, características que lo convierten en una alternativa prometedora para aplicaciones en pavimentos rígidos.

Los capítulos anteriores permitieron comprender los fundamentos teóricos relacionados con el poliacrilato de sodio, sus propiedades y mecanismos de funcionamiento, así como los principales aspectos asociados a la fisuración por contracción plástica y al comportamiento mecánico del concreto. La revisión de antecedentes evidenció que el control de la pérdida temprana de humedad constituye uno de los principales desafíos para la construcción de pavimentos durables, especialmente en regiones donde las condiciones climáticas favorecen la evaporación acelerada del agua durante las primeras horas posteriores al vaciado.

Asimismo, se identificó que la fisuración temprana representa uno de los problemas más frecuentes en estructuras de concreto, debido a que puede afectar tanto la calidad superficial como la durabilidad de largo plazo. Las fisuras originadas durante las etapas iniciales de endurecimiento pueden convertirse en vías preferenciales para el ingreso de agentes agresivos, favoreciendo procesos de deterioro que reducen la vida útil de la infraestructura. En consecuencia, el desarrollo de tecnologías orientadas a

minimizar este fenómeno constituye una prioridad dentro de la ingeniería de pavimentos.

De manera paralela, las propiedades mecánicas continúan siendo uno de los principales indicadores utilizados para evaluar la calidad y capacidad estructural del concreto. La resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad permiten determinar la respuesta del material frente a diferentes condiciones de carga y constituyen parámetros fundamentales para el diseño de pavimentos rígidos. Cualquier tecnología orientada a mejorar el desempeño del concreto debe demostrar no solo su capacidad para reducir la fisuración, sino también su influencia sobre estas propiedades mecánicas esenciales.

En este contexto, el presente capítulo desarrolla el caso de estudio relacionado con la incorporación de poliacrilato de sodio en mezclas de concreto destinadas a pavimentos rígidos. El análisis tiene como finalidad evaluar experimentalmente la influencia de diferentes dosificaciones del polímero sobre la fisuración por contracción plástica y sobre las principales propiedades mecánicas del concreto. De esta manera, se busca determinar si la incorporación de este material puede contribuir simultáneamente a mejorar la durabilidad y mantener o incrementar la capacidad resistente de las mezclas.

Para alcanzar este propósito, se presenta inicialmente la metodología empleada durante el desarrollo experimental, incluyendo el diseño de investigación, los materiales utilizados, la preparación de las mezclas, los procedimientos de ensayo y las técnicas de evaluación aplicadas. Posteriormente, se exponen los resultados obtenidos para cada una de las variables analizadas, acompañados de su respectiva interpretación y discusión en función de los fundamentos teóricos desarrollados en los capítulos anteriores.

La importancia de este caso de estudio radica en que proporciona evidencia experimental sobre una tecnología que aún se encuentra en proceso de consolidación dentro del campo de la ingeniería civil. Los resultados obtenidos permiten comprender de manera más precisa la interacción entre el poliacrilato de sodio y la matriz cementicia, así como identificar las ventajas y limitaciones asociadas a su utilización en pavimentos rígidos. Además, aportan información relevante para futuras investigaciones

orientadas al desarrollo de concretos más resistentes, durables y sostenibles.

En consecuencia, este capítulo representa el vínculo entre la teoría y la práctica, permitiendo contrastar los conceptos desarrollados previamente con los resultados obtenidos mediante la experimentación. Su contenido constituye el núcleo analítico de la presente obra y proporciona los elementos necesarios para valorar el potencial del poliacrilato de sodio como una alternativa innovadora para el mejoramiento del desempeño del concreto en infraestructura vial.

3.1. CONTEXTO DEL ESTUDIO

La creciente demanda de infraestructuras viales más resistentes, duraderas y sostenibles ha impulsado la búsqueda de materiales innovadores capaces de mejorar el desempeño del concreto utilizado en pavimentos rígidos. En las últimas décadas, el aumento del tránsito vehicular, las mayores exigencias de carga y la necesidad de reducir los costos asociados al mantenimiento han generado un interés creciente por el desarrollo de tecnologías que permitan optimizar las propiedades mecánicas del concreto y minimizar los mecanismos de deterioro que afectan su vida útil.

Dentro de este escenario, la fisuración por contracción plástica continúa representando uno de los problemas más recurrentes durante las primeras etapas de endurecimiento del concreto. Este fenómeno se presenta cuando la pérdida de humedad superficial ocurre a una velocidad superior a la capacidad de reposición interna de agua, generando tensiones de tracción que pueden producir fisuras antes de que el material alcance una resistencia suficiente. Aunque estas fisuras suelen originarse durante las primeras horas posteriores al vaciado, sus efectos pueden extenderse durante toda la vida útil de la estructura, favoreciendo procesos de deterioro y reduciendo la durabilidad de los pavimentos.

La problemática adquiere especial relevancia en pavimentos rígidos debido a las características propias de este tipo de infraestructura. Las losas de concreto presentan amplias superficies expuestas a la acción directa del ambiente, situación que incrementa la susceptibilidad a la evaporación acelerada del agua durante las etapas iniciales de endurecimiento. Asimismo, las exigencias operativas a las que están sometidos los pavimentos requieren concretos capaces de desarrollar adecuadas propiedades

mecánicas y mantener su integridad estructural durante largos períodos de servicio.

Frente a esta realidad, diversas investigaciones han orientado sus esfuerzos hacia el desarrollo de materiales capaces de mejorar las condiciones internas de hidratación del concreto y reducir la aparición de fisuras tempranas. Entre las alternativas más prometedoras destacan los polímeros superabsorbentes, materiales que poseen la capacidad de absorber grandes cantidades de agua durante el mezclado y liberarla posteriormente de manera gradual conforme disminuye la humedad interna del sistema cementicio.

Dentro de este grupo de materiales, el poliacrilato de sodio ha despertado un interés particular debido a sus propiedades físicas y químicas. Su capacidad para actuar como reservorio interno de agua permite implementar mecanismos de curado interno que complementan los métodos tradicionales de conservación de humedad. Esta característica ofrece la posibilidad de reducir los efectos asociados a la evaporación temprana, favorecer una hidratación más eficiente del cemento y contribuir al desarrollo de una microestructura más homogénea y resistente.

El presente estudio se desarrolla en el contexto de la búsqueda de soluciones innovadoras para mejorar el comportamiento del concreto destinado a pavimentos rígidos. La investigación se centra en evaluar la influencia de diferentes dosificaciones de poliacrilato de sodio sobre variables relacionadas con la fisuración por contracción plástica y las propiedades mecánicas del concreto, considerando que ambos aspectos constituyen indicadores fundamentales para determinar el desempeño y la durabilidad de la infraestructura vial.

La elección de estas variables responde a la necesidad de analizar simultáneamente los efectos del polímero sobre el comportamiento inicial y el desempeño estructural del material. Por una parte, se busca determinar si la incorporación de poliacrilato de sodio contribuye a reducir la formación de fisuras asociadas a la pérdida temprana de humedad. Por otra, se pretende evaluar su influencia sobre propiedades mecánicas fundamentales como la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad, parámetros ampliamente utilizados en el diseño y evaluación de pavimentos rígidos.

El estudio se enmarca dentro de las tendencias actuales de innovación en materiales de construcción, las cuales priorizan el desarrollo de soluciones capaces de incrementar la vida útil de las estructuras, optimizar el uso de recursos y reducir la necesidad de intervenciones de mantenimiento. Desde esta perspectiva, el empleo de polímeros superabsorbentes representa una alternativa alineada con los principios de sostenibilidad y eficiencia que orientan la evolución de la ingeniería civil contemporánea.

Asimismo, la investigación responde a la necesidad de ampliar el conocimiento existente sobre el comportamiento del poliacrilato de sodio en sistemas cementicios, particularmente en aplicaciones relacionadas con infraestructura vial. Aunque los estudios internacionales han reportado resultados favorables respecto al uso de polímeros superabsorbentes, aún existe la necesidad de generar evidencia experimental que permita comprender con mayor precisión su comportamiento bajo diferentes condiciones de dosificación y su impacto sobre las propiedades del concreto.

En este contexto, el caso de estudio constituye una oportunidad para analizar experimentalmente el potencial del poliacrilato de sodio como material modificador del concreto para pavimentos rígidos. Los resultados obtenidos permitirán valorar su capacidad para reducir la fisuración por contracción plástica y mejorar el desempeño mecánico del material, aportando información relevante para futuras aplicaciones en proyectos de infraestructura y para el desarrollo de nuevas líneas de investigación en tecnología del concreto.

3.2. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

La metodología constituye el conjunto de procedimientos, técnicas y criterios científicos que permiten desarrollar una investigación de manera sistemática y garantizar la validez de los resultados obtenidos. En el presente estudio, la metodología fue diseñada con el propósito de evaluar experimentalmente la influencia del poliacrilato de sodio sobre la fisuración por contracción plástica y las propiedades mecánicas del concreto destinado a pavimentos rígidos. Para ello, se estableció un proceso de investigación que permitió analizar el comportamiento de diferentes mezclas de concreto modificadas con distintas dosificaciones del polímero superabsorbente.

El enfoque metodológico adoptado corresponde a una investigación de naturaleza cuantitativa, debido a que las variables fueron medidas mediante procedimientos experimentales y expresadas a través de datos numéricos susceptibles de análisis estadístico. Este enfoque permitió determinar objetivamente la magnitud de los cambios producidos por la incorporación del poliacrilato de sodio y establecer comparaciones entre las distintas mezclas evaluadas.

Asimismo, la investigación presenta un alcance explicativo debido a que no se limitó únicamente a describir el comportamiento observado, sino que buscó identificar y explicar la influencia que ejerce el poliacrilato de sodio sobre la variable dependiente. El interés principal radicó en comprender la relación existente entre la incorporación del polímero y las variaciones registradas en la fisuración por contracción plástica, la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad del concreto.

Desde el punto de vista del diseño metodológico, el estudio corresponde a una investigación experimental. Este tipo de diseño se caracteriza por la manipulación deliberada de una variable independiente con la finalidad de observar sus efectos sobre una o más variables dependientes. En este caso, la variable manipulada estuvo representada por las diferentes dosificaciones de poliacrilato de sodio incorporadas a las mezclas de concreto, mientras que las variables de respuesta estuvieron asociadas a la fisuración por contracción plástica y a las propiedades mecánicas evaluadas.

La investigación se desarrolló bajo condiciones controladas de laboratorio, permitiendo minimizar la influencia de factores externos y garantizar que las diferencias observadas entre las mezclas fueran atribuibles principalmente al efecto del polímero superabsorbente. Este control experimental resultó fundamental para asegurar la confiabilidad de los resultados y facilitar la comparación entre los distintos tratamientos evaluados.

Para el desarrollo del estudio se elaboraron diferentes diseños de mezcla considerando un concreto patrón o mezcla de control y varias mezclas experimentales modificadas mediante la incorporación de poliacrilato de sodio en proporciones previamente definidas. El concreto patrón permitió establecer una referencia para

comparar el comportamiento de las mezclas modificadas y determinar el impacto real de la incorporación del polímero sobre las propiedades analizadas.

Los materiales utilizados incluyeron cemento hidráulico, agregados finos, agregados gruesos, agua de mezclado y poliacrilato de sodio. Todos los materiales fueron seleccionados de acuerdo con las especificaciones técnicas aplicables para la elaboración de concretos destinados a pavimentos rígidos. Antes de su utilización, los agregados fueron caracterizados mediante ensayos físicos que permitieron determinar propiedades relevantes para el diseño de mezcla, tales como granulometría, peso específico, absorción y contenido de humedad.

El diseño de mezcla fue realizado siguiendo procedimientos establecidos en normas técnicas ampliamente aceptadas para la producción de concreto estructural. Las proporciones de los materiales fueron definidas considerando los requisitos de resistencia mecánica establecidos para pavimentos rígidos, así como las características particulares de los materiales disponibles. Posteriormente, se incorporó el poliacrilato de sodio en diferentes porcentajes respecto al peso del cemento, con la finalidad de evaluar su influencia sobre el comportamiento del concreto.

La preparación de las mezclas se realizó mediante procedimientos estandarizados que garantizaron una adecuada distribución de los materiales dentro de la matriz cementicia. Durante el proceso de mezclado se controlaron variables como el tiempo de mezclado, la secuencia de incorporación de materiales y las condiciones ambientales del laboratorio, con el propósito de asegurar la uniformidad de los especímenes elaborados.

Una vez preparadas las mezclas, se procedió a la fabricación de los especímenes necesarios para cada ensayo. Las muestras fueron moldeadas utilizando equipos y procedimientos normalizados que permitieron garantizar dimensiones uniformes y condiciones adecuadas de compactación. Posteriormente, los especímenes fueron sometidos a procesos controlados de curado con el fin de favorecer el desarrollo adecuado de las reacciones de hidratación del cemento.

La evaluación de la fisuración por contracción plástica se realizó mediante

procedimientos diseñados para simular condiciones favorables a la evaporación y al desarrollo de tensiones superficiales. Las observaciones permitieron registrar la aparición de fisuras, determinar su longitud, ancho o densidad, y comparar el comportamiento de las diferentes mezclas frente al concreto patrón. Esta evaluación constituyó uno de los principales indicadores para analizar la capacidad del poliacrilato de sodio para reducir la incidencia de fisuración temprana.

La resistencia a la compresión fue determinada mediante ensayos realizados sobre especímenes cilíndricos sometidos a cargas crecientes hasta alcanzar la falla. Los resultados obtenidos permitieron cuantificar la capacidad resistente de cada mezcla y evaluar la influencia del polímero sobre el desarrollo de esta propiedad mecánica fundamental. Los ensayos fueron ejecutados en edades previamente establecidas para garantizar la comparabilidad de los resultados.

De manera complementaria, la resistencia a la flexión fue evaluada mediante ensayos aplicados a vigas prismáticas de concreto. Este parámetro resultó particularmente relevante debido a su estrecha relación con el comportamiento estructural de los pavimentos rígidos. Los resultados obtenidos permitieron determinar la capacidad de las mezclas para resistir esfuerzos flexionantes y establecer posibles mejoras asociadas a la incorporación del poliacrilato de sodio.

Asimismo, se determinó el módulo de elasticidad mediante procedimientos normalizados que permitieron evaluar la rigidez del concreto y su capacidad para deformarse bajo la acción de cargas. Esta propiedad proporcionó información complementaria respecto al comportamiento mecánico de las mezclas y permitió analizar posibles modificaciones en la respuesta estructural del material como consecuencia de la incorporación del polímero.

Una vez obtenidos los resultados experimentales, se realizó el procesamiento y análisis de la información mediante herramientas estadísticas descriptivas. Los datos fueron organizados en tablas y representaciones gráficas que facilitaron la comparación entre tratamientos y permitieron identificar tendencias asociadas al comportamiento de las distintas dosificaciones evaluadas. Asimismo, se calcularon indicadores de variación y porcentajes de mejora respecto al concreto patrón con el propósito de cuantificar la

magnitud de los efectos observados.

La interpretación de los resultados se realizó considerando los fundamentos teóricos desarrollados en los capítulos anteriores y los hallazgos reportados por investigaciones previas relacionadas con polímeros superabsorbentes y tecnología del concreto. Este procedimiento permitió establecer relaciones entre la evidencia experimental y los mecanismos de funcionamiento atribuidos al poliacrilato de sodio, proporcionando una explicación integral de los resultados obtenidos.

En conjunto, la metodología aplicada permitió evaluar de manera rigurosa la influencia del poliacrilato de sodio sobre la fisuración por contracción plástica y las propiedades mecánicas del concreto para pavimentos rígidos. El enfoque experimental adoptado proporcionó evidencia objetiva sobre el comportamiento del material y generó información relevante para valorar su potencial aplicación en el desarrollo de infraestructuras más resistentes, durables y sostenibles.

3.3. MATERIALES Y DISEÑO EXPERIMENTAL

La selección adecuada de los materiales y la estructuración del diseño experimental constituyen aspectos fundamentales para garantizar la validez y confiabilidad de una investigación orientada al estudio del comportamiento del concreto. En el presente caso de estudio, ambos componentes fueron planificados con el propósito de evaluar de manera objetiva la influencia del poliacrilato de sodio sobre la fisuración por contracción plástica y las propiedades mecánicas del concreto empleado en pavimentos rígidos. Para ello, se establecieron procedimientos que permitieron controlar las variables involucradas y asegurar condiciones homogéneas durante el desarrollo experimental.

El programa experimental fue diseñado considerando la elaboración de una mezcla patrón y diversas mezclas modificadas mediante la incorporación de poliacrilato de sodio en diferentes proporciones. Esta estrategia permitió comparar el comportamiento del concreto convencional con el de los concretos modificados y determinar el efecto generado por el polímero sobre las variables de interés. La comparación entre tratamientos facilitó la identificación de tendencias y la cuantificación de las mejoras o variaciones producidas por la incorporación del material

superabsorbente.

3.3.1. Materiales empleados

Los materiales utilizados para la elaboración del concreto fueron seleccionados de acuerdo con los requisitos técnicos establecidos para la construcción de pavimentos rígidos. Cada componente desempeñó una función específica dentro de la mezcla y fue previamente caracterizado para garantizar su calidad y compatibilidad con los objetivos de la investigación.

Cemento

El cemento hidráulico constituyó el principal material aglomerante utilizado en la elaboración de las mezclas. Su función consistió en reaccionar químicamente con el agua para formar los productos de hidratación responsables de la resistencia y cohesión del concreto. La selección del cemento se realizó considerando sus propiedades físicas y químicas, así como su capacidad para desarrollar las resistencias requeridas en aplicaciones de infraestructura vial.

Antes de su utilización, se verificó que el material cumpliera con las especificaciones técnicas correspondientes, garantizando condiciones adecuadas de almacenamiento para evitar procesos de hidratación prematura o contaminación que pudieran afectar su desempeño.

Agregado fino

El agregado fino estuvo conformado por arena natural debidamente seleccionada y libre de impurezas perjudiciales. Este material cumplió la función de llenar los espacios existentes entre las partículas de agregado grueso, contribuyendo a mejorar la cohesión de la mezcla y favoreciendo la trabajabilidad del concreto fresco.

Las características granulométricas del agregado fino fueron evaluadas mediante ensayos normalizados con la finalidad de verificar que su distribución de tamaños permitiera obtener mezclas estables y con adecuada compactación. Asimismo, se determinaron propiedades como peso específico, absorción y contenido de humedad para garantizar precisión durante el proceso de dosificación.

Agregado grueso

El agregado grueso estuvo constituido por piedra triturada de origen pétreo seleccionada de acuerdo con las especificaciones aplicables para concretos destinados a pavimentos rígidos. Este material representa el principal componente estructural del concreto y contribuye significativamente al desarrollo de resistencia mecánica y estabilidad dimensional.

Se evaluaron propiedades físicas relacionadas con granulometría, peso específico, absorción y resistencia, debido a que estas características influyen directamente sobre el comportamiento final del concreto. La calidad del agregado grueso resulta especialmente importante en pavimentos rígidos debido a las elevadas sollicitaciones mecánicas a las que estas estructuras se encuentran sometidas durante su vida útil.

Agua de mezclado

El agua utilizada para la elaboración del concreto cumplió una doble función dentro de la mezcla. Por un lado, participó directamente en las reacciones de hidratación del cemento y, por otro, proporcionó la trabajabilidad necesaria para el mezclado, transporte y colocación del material.

La calidad del agua constituye un factor relevante debido a que la presencia de sustancias contaminantes puede afectar las propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto. Por esta razón, se empleó agua apta para la elaboración de mezclas cementicias, garantizando condiciones adecuadas para el desarrollo de los procesos de hidratación.

Poliacrilato de sodio

El poliacrilato de sodio constituyó la variable independiente de la investigación. Este material corresponde a un polímero superabsorbente caracterizado por su capacidad para absorber grandes cantidades de agua y liberarla gradualmente conforme disminuye la humedad interna del sistema cementicio.

Su incorporación en las mezclas tuvo como finalidad evaluar su capacidad para

actuar como reservorio interno de agua, favorecer el curado interno del concreto y reducir la incidencia de fisuración por contracción plástica. Asimismo, se analizó su influencia sobre propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad.

Las diferentes dosificaciones fueron establecidas considerando antecedentes científicos y estudios previos relacionados con la utilización de polímeros superabsorbentes en materiales cementicios.

3.3.2. Diseño experimental

El diseño experimental se estructuró bajo un enfoque comparativo que permitió evaluar el comportamiento de diferentes tratamientos mediante la modificación controlada de la variable independiente. La investigación contempló la elaboración de un grupo de control y varios grupos experimentales con distintas proporciones de poliacrilato de sodio.

El grupo de control estuvo representado por una mezcla convencional de concreto para pavimentos rígidos sin incorporación de polímero. Esta mezcla sirvió como referencia para establecer comparaciones y determinar el efecto generado por la adición del poliacrilato de sodio sobre las variables analizadas.

Por su parte, los grupos experimentales fueron elaborados incorporando diferentes porcentajes de poliacrilato de sodio respecto al peso del cemento. Cada tratamiento mantuvo constantes las demás condiciones de diseño, permitiendo que las diferencias observadas pudieran atribuirse principalmente al efecto del polímero superabsorbente.

El diseño contempló la fabricación de especímenes suficientes para cada ensayo programado, garantizando la repetibilidad de los resultados y la obtención de información estadísticamente representativa. Las muestras fueron distribuidas entre los distintos tratamientos considerando criterios de uniformidad y control experimental.

3.3.3. Variables evaluadas

Las variables dependientes consideradas dentro del estudio fueron seleccionadas

debido a su relevancia para el desempeño de pavimentos rígidos.

La primera variable evaluada correspondió a la fisuración por contracción plástica, analizada mediante la observación y cuantificación de fisuras desarrolladas durante las primeras etapas de endurecimiento del concreto. Este parámetro permitió determinar la capacidad del poliacrilato de sodio para reducir los efectos asociados a la pérdida prematura de humedad.

La segunda variable estuvo relacionada con la resistencia a la compresión, propiedad mecánica fundamental para evaluar la calidad estructural del concreto y su capacidad para soportar cargas compresivas.

La tercera variable correspondió a la resistencia a la flexión, parámetro especialmente importante en pavimentos rígidos debido a que estos elementos trabajan predominantemente sometidos a esfuerzos flexionantes generados por el tránsito vehicular.

Finalmente, se evaluó el módulo de elasticidad con el propósito de analizar la influencia del polímero sobre la rigidez del concreto y su comportamiento frente a deformaciones inducidas por cargas externas.

3.3.4. Preparación de especímenes

La elaboración de los especímenes se realizó siguiendo procedimientos normalizados para garantizar uniformidad y reproducibilidad. Los materiales fueron dosificados de acuerdo con las proporciones establecidas en el diseño de mezcla y posteriormente sometidos a procesos de mezclado controlado.

Una vez obtenida la mezcla fresca, el concreto fue colocado en moldes previamente acondicionados y compactado mediante procedimientos apropiados para eliminar vacíos y asegurar una adecuada distribución de los materiales. Posteriormente, los especímenes fueron almacenados bajo condiciones controladas hasta alcanzar los tiempos establecidos para cada ensayo.

3.3.5. Consideraciones experimentales

Durante todo el proceso experimental se mantuvieron constantes variables

relacionadas con la calidad de los materiales, procedimientos de mezclado, condiciones de curado y métodos de ensayo. Este control permitió minimizar la influencia de factores externos y garantizar que las diferencias observadas entre tratamientos estuvieran asociadas principalmente al efecto del poliacrilato de sodio.

La aplicación de este diseño experimental permitió generar información confiable sobre el comportamiento del concreto modificado con polímero superabsorbente y proporcionó la base necesaria para evaluar su potencial utilización en pavimentos rígidos de alta durabilidad. Asimismo, facilitó la comparación sistemática entre tratamientos y permitió establecer relaciones entre la dosificación del poliacrilato de sodio y las variaciones observadas en las propiedades físicas y mecánicas analizadas.

3.4. RESULTADOS

La fase experimental desarrollada en la presente investigación permitió evaluar el comportamiento del concreto modificado con poliacrilato de sodio y determinar su influencia sobre la fisuración por contracción plástica y las principales propiedades mecánicas requeridas en pavimentos rígidos. Los resultados obtenidos constituyen la evidencia práctica necesaria para verificar los planteamientos teóricos desarrollados en los capítulos anteriores y valorar el potencial de este polímero superabsorbente como material innovador para la mejora del desempeño del concreto.

El análisis de resultados se orienta a identificar las variaciones generadas por las diferentes dosificaciones de poliacrilato de sodio en comparación con el concreto patrón. Para ello, se consideran indicadores relacionados con la reducción de fisuras tempranas, el desarrollo de resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad, variables que representan aspectos fundamentales para la durabilidad y capacidad estructural de los pavimentos rígidos.

La incorporación de polímeros superabsorbentes modifica diversos procesos internos del concreto, especialmente aquellos relacionados con la disponibilidad de agua durante las etapas iniciales de hidratación. Como consecuencia, se espera observar diferencias en el comportamiento de las mezclas evaluadas respecto al concreto convencional. Estas diferencias permiten comprender de manera más precisa los mecanismos mediante los cuales el poliacrilato de sodio influye sobre la microestructura

del material y sobre sus propiedades físicas y mecánicas.

Los resultados presentados en esta sección han sido organizados de acuerdo con las variables analizadas durante el programa experimental. En primer lugar, se exponen los hallazgos relacionados con la fisuración por contracción plástica, debido a que esta variable constituye uno de los principales indicadores asociados a la durabilidad temprana del concreto. Posteriormente, se presentan los resultados correspondientes a las propiedades mecánicas, permitiendo evaluar el efecto del polímero sobre la capacidad resistente y el comportamiento estructural de las mezclas.

Cada conjunto de resultados es acompañado por su respectivo análisis e interpretación, estableciendo relaciones entre los datos obtenidos, los fundamentos teóricos revisados previamente y los hallazgos reportados por investigaciones similares. Este procedimiento permite comprender no solo las diferencias observadas entre tratamientos, sino también las razones que explican dichas variaciones desde una perspectiva científica y tecnológica.

La evaluación integral de los resultados permitirá determinar si la incorporación de poliacrilato de sodio constituye una alternativa técnicamente viable para reducir la fisuración por contracción plástica y mejorar el desempeño mecánico del concreto empleado en pavimentos rígidos. Asimismo, facilitará la identificación de las dosificaciones más favorables y proporcionará criterios que puedan servir como referencia para futuras aplicaciones e investigaciones relacionadas con el uso de polímeros superabsorbentes en materiales cementicios.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada una de las variables evaluadas durante el desarrollo experimental, iniciando con el análisis de la fisuración por contracción plástica y continuando con las propiedades mecánicas del concreto.

Para cumplir con los objetivos estipulados por el indagador, se hizo necesario elaborar 4 diseños de mezclas diferenciadas únicamente por el porcentaje de adición de poliacrilato de sodio al concreto (0.0%, 0.05%, 0.065% y 0.08%), por ello para un mejor entendimiento se elaboró la siguiente codificación:

Tabla 12. Descripción de los diseños de mezcla empleados por la tesis

Descripción	
Diseño patrón	Concreto patrón
D1- 0.05% P.S.	Concreto con adición de Poliacrilato de sodio en dosis de 0.05%
D2- 0.065% P.S.	Concreto con adición de Poliacrilato de sodio en dosis de 0.065%
D3- 0.08% P.S.	Concreto con adición de Poliacrilato de sodio en dosis de 0.08%

Resultado de ensayo: Caracterización de los agregados

Se usó como AG a la piedra chancada de la cantera Chancadora Uniconsac y como AF a la arena gruesa de la cantera del Río Cunas, se consiguió la muestra en concordancia a la normativa MTC E 201, a ello le acompañó un cuarteo y se logró alcanzar la información siguiente:

Tabla 13. Caracterización de los agregados

Descripción	Agregado Fino	Agregado Grueso
Procedencia	Río Cunas	Chancadora Uniconsac
Peso Unitario Suelto (kg/m ³)	1466	1431
Peso Unitario Compactado (kg/m ³)	1593	1543
Peso Específico (kg/m ³)	2512	2659
Módulo de Fineza	2.58	7.67
Tamaño Máximo Nominal	-	3/4"
Absorción (%)	2.17	0.85
Contenido de humedad (%)	0.77	0.26
Porcentaje de la Malla N°200	4.57	0.69

Tabla 14. Caracterización del poliacrilato de sodio

Características	Valoración
Composición	Polímero de alto peso molecular
Forma	Sólido cristalino
Color	Blanco
Olor	Ninguno
Ph	< 7.0
Temperatura de ignición	No aplicable
Punto de fusión	No aplicable
Punto de inflamación	No aplicable
Presión de vapor	No aplicable
Densidad	0.56 - 0.7 g/cc
Capacidad de absorbancia (g/g)	250 - 400 (agua desionizada)
Porcentaje soluble	Menor del 5%

Con los resultados obtenidos y empleando la metodología ACI 211, se obtuvo la cantidad exacta de cada componente de concreto, tal como se detalla a continuación:

Tabla 15. Dosificación de los componentes del concreto

Descripción	Cemento	Agua	Piedra - Huso 5	Arena	Poliacrilato de sodio
Diseño patrón	459.64	219.87	993.18	649.36	0.00
D1- 0.05% P.S.	459.64	219.85	993.18	648.45	0.23
D2 - 0.065% P.S.	459.64	219.85	993.18	648.15	0.30
D3 - 0.08% P.S.	459.64	219.85	993.18	647.87	0.37

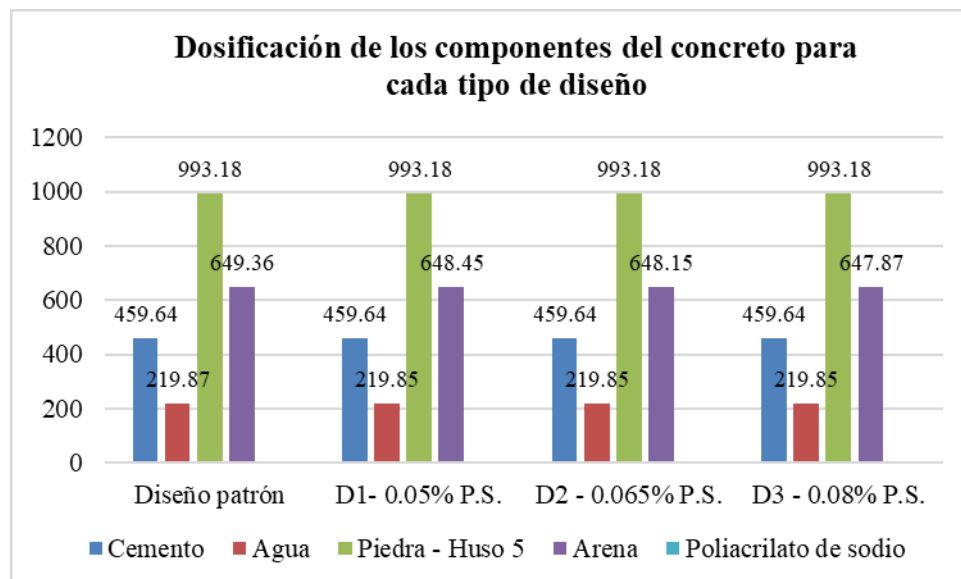


Figura 18. Dosificación de los componentes del concreto.

Resultado de ensayo: Temperatura del concreto

Se realizó el control de temperatura de concreto, obteniendo la siguiente información:

Tabla 16. Resultados de temperatura del concreto

Descripción	Promedio (°C)	Valor porcentual de la temperatura del concreto respecto al diseño patrón
Diseño patrón	15.00	100.00%
D1- 0.05% P.S.	14.80	98.67%
D2 - 0.065% P.S.	13.10	87.33%
D3 - 0.08% P.S.	12.80	85.33%

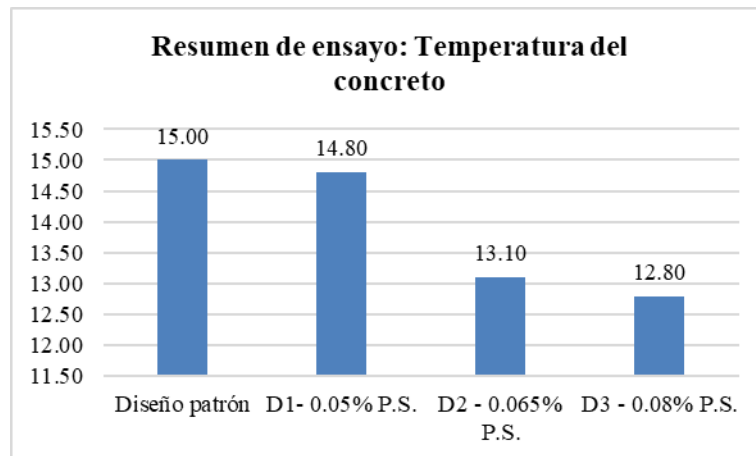


Figura 19. Resumen de los ensayos de temperatura del concreto.

La temperatura del concreto disminuye en relación al incrementó de dosis de poliacrilato de sodio, siendo la mayor reducción al usar la dosis al 0.08%, logrando una disminución del 14.67% respecto al concreto patrón.

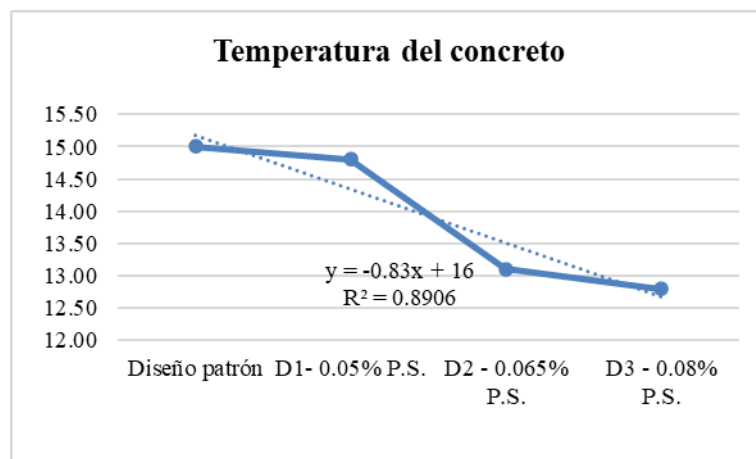


Figura 20. Tendencia de temperatura del concreto.

La figura 20 expone la correlación entre la variable independiente y la variable dependiente, mostrando el coeficiente de correlación alto de $R=0.944$, aseverando que mientras se adicione poliacrilato de sodio se incrementará la temperatura del concreto, mientras que el coeficiente de determinación $R^2=0.8906$ admite aseverar que, la adición de poliacrilato de sodio tendrá un impacto en los resultados de la temperatura del

concreto en un 89%.

Resultado de ensayo: Revenimiento del concreto

Se realizó la prueba de asentamiento del concreto, obteniendo la siguiente información:

Tabla 17. Resultados de asentamiento del concreto

Descripción	Slump (pulgadas)	Valor porcentual del asentamiento del concreto respecto al diseño patrón
Diseño patrón	3 2/5	100.00%
D1- 0.05% P.S.	4	117.07%
D2 - 0.065% P.S.	5	146.34%
D3 - 0.08% P.S.	5 5/6	170.73%

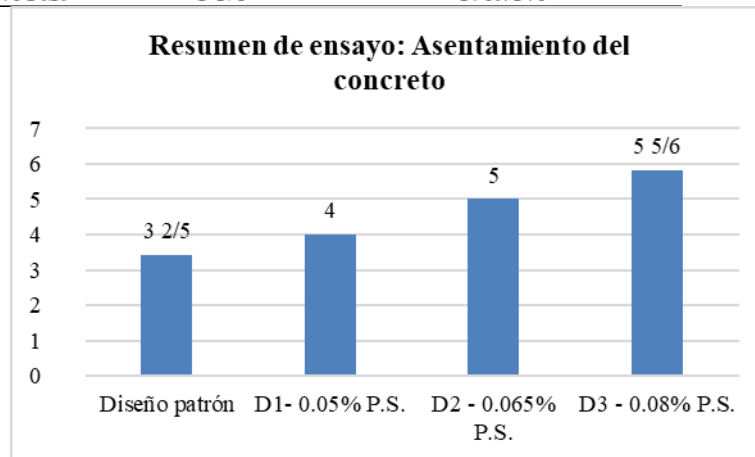


Figura 21. Resumen de los ensayos de asentamiento del concreto.

El Slump de la mezcla se acrecienta en relación al incremento de la dosis de poliacrilato de sodio, obteniendo el mayor valor al usar la dosis al 0.08%, logrando un aumento del 70.73% respecto al CP (concreto patrón).

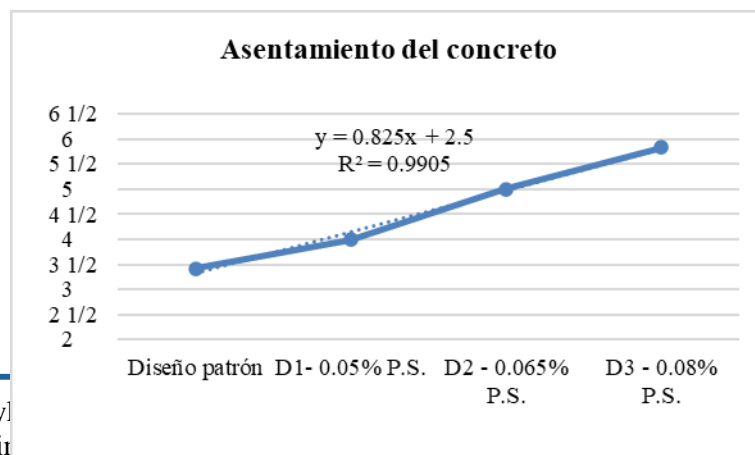


Figura 22. Tendencia de asentamiento del concreto.

La figura 22 exhibe la correlación existente entre la VI y la VD, el coeficiente de correlación de $R=0.995$ simboliza una correspondencia muy alta, demostrando que a medida que se añada la dosis de poliacrilato de sodio se incrementa el asentamiento del concreto, por otro lado el coeficiente de determinación $R^2=0.9905$ representando un 99% de que los valores de asentamiento del concreto serán modificados por la incorporación de poliacrilato de sodio.

Resultado de ensayo: Tiempo de fragua del concreto

Los ensayos de tiempo de fragua realizados por el tesista permitieron alcanzar la siguiente información:

Tabla 18. Resultados de tiempo de fragua inicial del concreto

Descripción	TFI del concreto (minutos)	Valor porcentual del TFI respecto al diseño patrón
Diseño patrón	294.00	100.00%
D1- 0.05% P.S.	297.67	101.25%
D2 - 0.065% P.S.	304.33	103.51%
D3 - 0.08% P.S.	309.33	105.22%

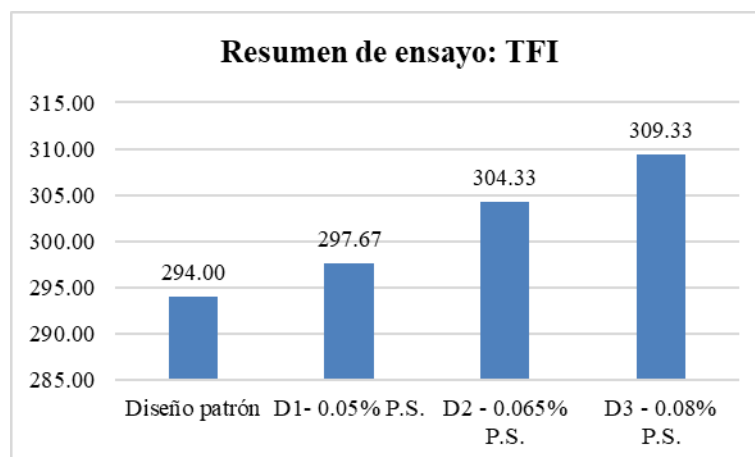


Figura 23. Resumen de los ensayos de TFI.

El TFI del concreto se acrecienta a medida que se incorpora la dosis de poliacrilato de sodio, obteniendo el mayor valor al adicionar la

dosis al 0.08%, logrando un aumento del 5.22% en relación al CP (concreto patrón).

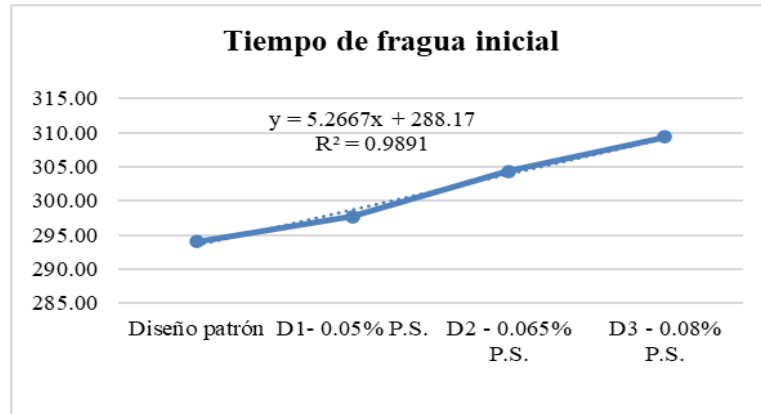


Figura 24. Tendencia de TFI del concreto

La figura 24 muestra la analogía existente entre la VI y la VD, el coeficiente de correlación de $R=0.995$ simboliza una correlación muy alta, confirmando que según se amplía la dosis de poliacrilato de sodio se incrementa el TFI del concreto, a la par el coeficiente de determinación $R^2=0.9891$ indica un 99% de que los valores de TFI del concreto serán afectados por la adición de poliacrilato de sodio.

Tabla 19. Resultados de tiempo de fragua final del concreto

Descripción	Tiempo de fragua final del concreto (minutos)	Valor porcentual del TFF respecto al diseño patrón
Diseño patrón	353.67	100.00%
D1- 0.05% P.S.	362.00	102.36%
D2 - 0.065% P.S.	370.67	104.81%
D3 - 0.08% P.S.	382.67	108.20%

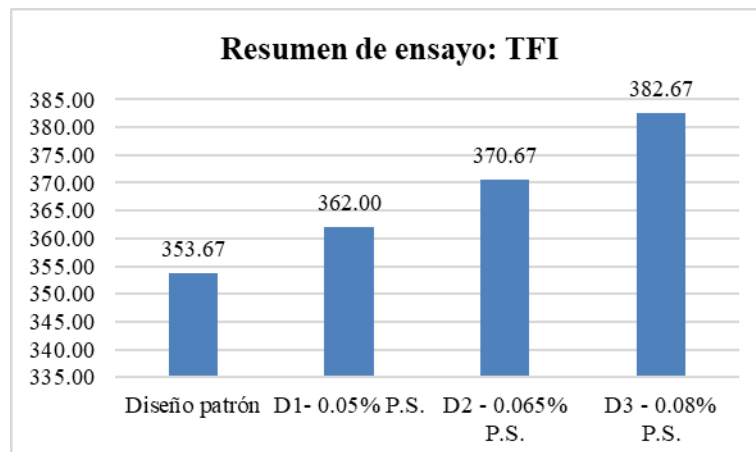


Figura 25. Resumen de los ensayos de TFF.

El TFF del concreto se aumenta según se va incorporando la dosis de poliacrilato de sodio, obteniendo el mayor valor al usar la dosis al 0.08%, logrando un aumento del 8.20% en relación al concreto patrón.

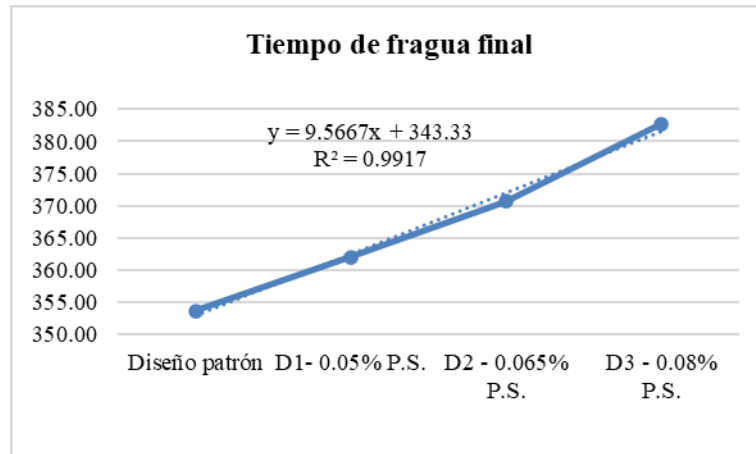


Figura 26. Tendencia de TFF del concreto

La figura 26 expone la relación entre la VD y la VI, el coeficiente de correlación de $R=0.996$ simboliza una correlación muy alta, ratificando que a medida que se extiende la dosis de poliacrilato de sodio se incrementa el TFF del concreto, así mismo el coeficiente de determinación $R^2=0.9917$ indica un 99% de que los valores obtenidos del TFF del concreto tendrán variaciones por la adición de poliacrilato de sodio.

Resultado de ensayo: Exudación del concreto

Los datos alcanzados mediante la prueba de exudación del concreto son:

Tabla 20. Resultados de exudación del concreto

Descripción	Exudación del concreto (%)	Valor porcentual de la exudación del concreto respecto al diseño patrón
Diseño patrón	1.89	100.00%
D1- 0.05% P.S.	1.58	83.57%
D2 - 0.065% P.S.	1.34	70.85%
D3 - 0.08% P.S.	0.94	50.00%

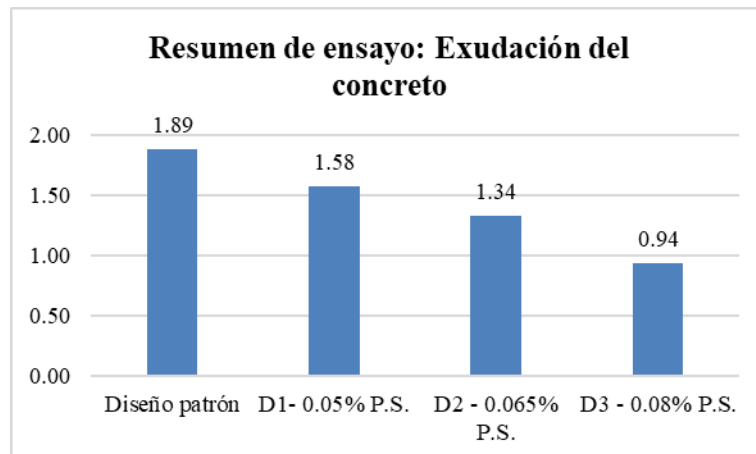


Figura 27. Resumen de los ensayos de exudación del concreto

La exudación del concreto se reduce de manera proporcional al incremento de poliacrilato de sodio, obteniendo la mayor reducción al utilizar la dosis al 0.08%, logrando una reducción del 50% en relación al concreto patrón.

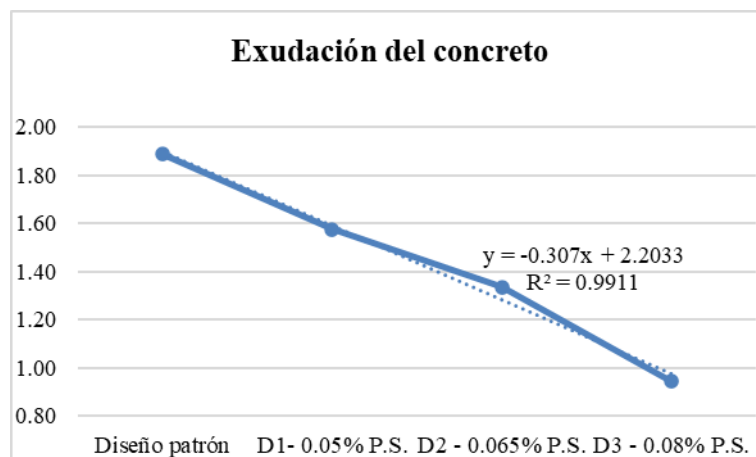


Figura 28. Tendencia de la exudación del concreto

La figura 28 muestra la relación entre la VD y la VI, el coeficiente de correlación de $R=0.996$ evidencia una correlación muy alta, confirmando que a medida que se acrecienta la dosis de poliacrilato de sodio se reduce la exudación del concreto, así mismo el coeficiente de determinación $R^2=0.9911$ indica un 99% de que los resultados de exudación del concreto se modificarán por la adición de poliacrilato de sodio.

Resultado de ensayo: Resistencia a compresión del concreto

Las pruebas se ejecutaron en especímenes cilíndricos de dimensiones de 4 x 8 pulgadas, obteniendo la siguiente información:

Tabla 21. Resultados de resistencia a compresión del concreto a los 28 días

Descripción	Resistencia a compresión del concreto a los 28 días (kg/cm ²)	Valor porcentual de resistencia a compresión del concreto respecto al diseño patrón
Diseño patrón	385.48	100.00%
D1- 0.05% P.S.	418.18	108.48%
D2 - 0.065% P.S.	440.12	114.17%
D3 - 0.08% P.S.	375.05	97.29%

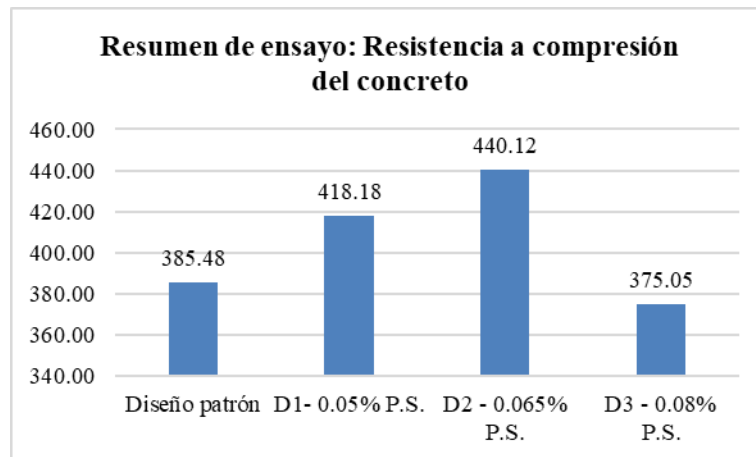


Figura 29. Resumen de los ensayos de resistencia a compresión del concreto.

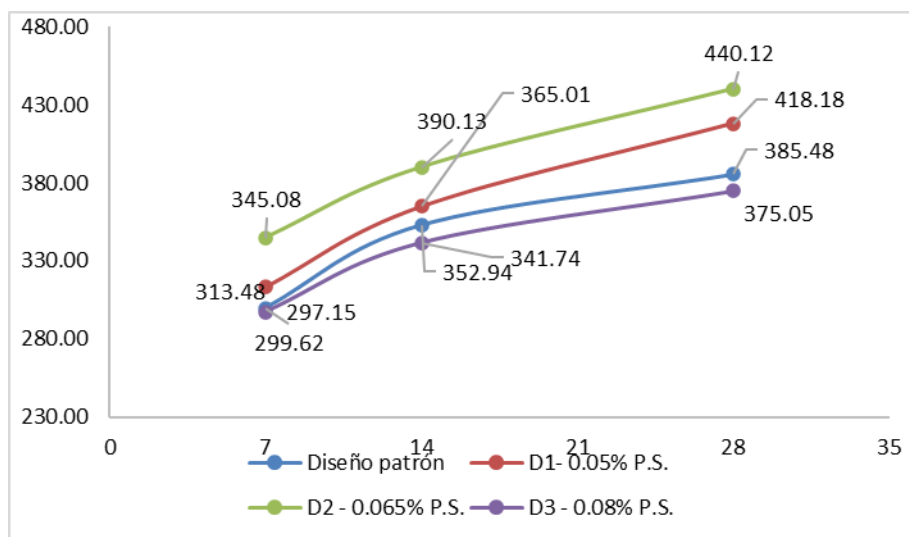


Figura 30. Curva de desarrollo de resistencia a compresión del concreto.

La capacidad de soporte a esfuerzos de compresión del hormigón

tiene su mayor aumento al adicionar poliacrilato de sodio en la dosis del 0.065%, logrando un incremento del 14.17% respecto al concreto patrón, de ninguna manera se aplicará la dosis del 0.08% ya que ocasiona una reducción de los resultados del $f'c$.

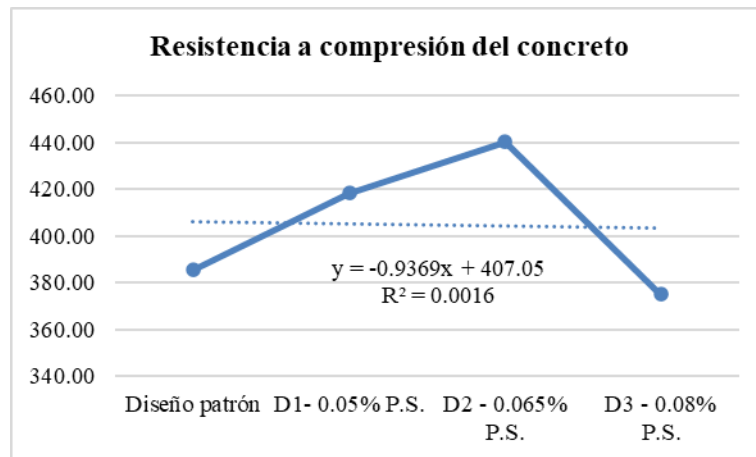


Figura 31. Tendencia de resistencia a la compresión del concreto

La figura 31 representa la relación entre la VD y la VI, el coeficiente de correlación de $R=0.04$ representa una correlación baja, lo que simboliza que la máxima dosis de aplicación es de 0.65% de poliacrilato de sodio y que si se usa una dosis mayor se obtienen resultados desfavorables para el concreto, mientras que el coeficiente de determinación $R^2=0.0016$ representando un 0.16% de que los resultados del $f'c$ del concreto se incrementaran a medida en concordancia a la adición del poliacrilato de sodio.

Resultado de ensayo: Resistencia a flexión del concreto

Se realizó el ensayo de resistencia a flexión del concreto en vigas, obteniendo la siguiente información:

Tabla 22. Resultados de resistencia a flexión del concreto a los 28 días

Descripción	Resistencia a flexión del concreto a los 28 días (kg/cm²)	Valor porcentual de resistencia a flexión del concreto respecto al diseño patrón
Diseño patrón	42.45	100.00%
D1- 0.05% P.S.	48.53	114.31%
D2 - 0.065% P.S.	51.56	121.45%
D3 - 0.08% P.S.	46.53	109.61%

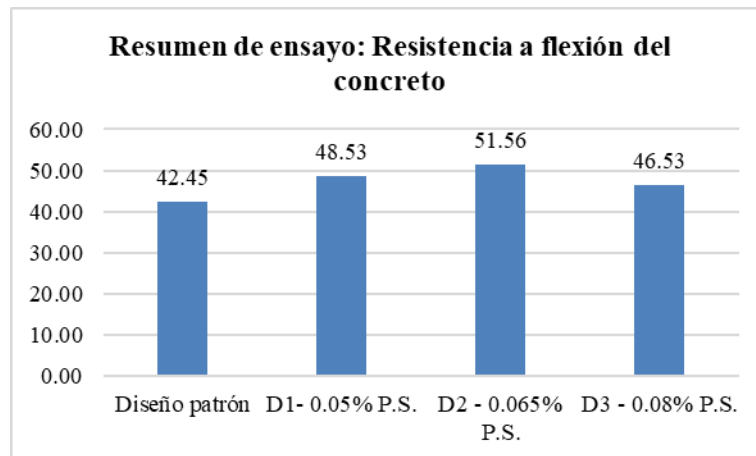


Figura 32. Resumen de los ensayos de resistencia a flexión del concreto.

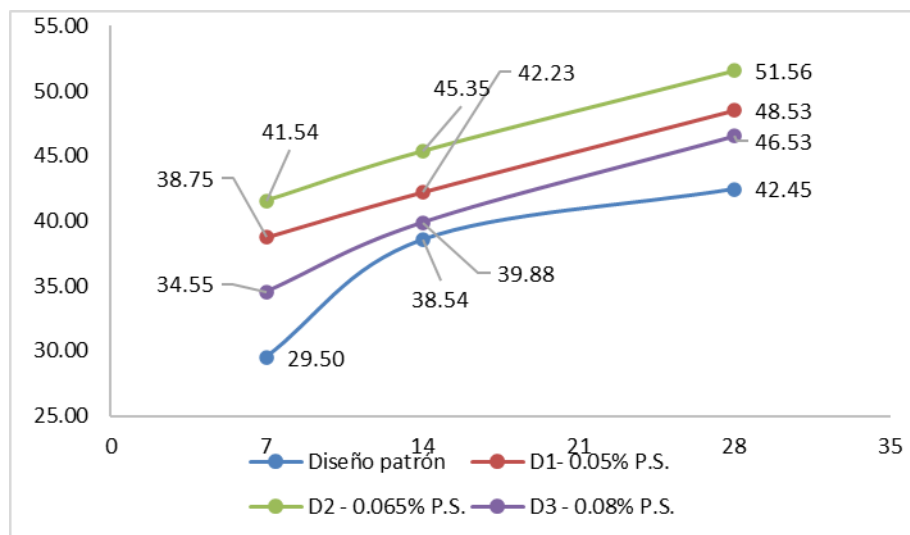


Figura 33. Curva de desarrollo de resistencia a flexión del concreto.

La resistencia a flexión del concreto tiene su mayor aumento al adicionar poliacrilato de sodio en la dosis del 0.065%, logrando un acrecentamiento del 21.45% en relación al CP (concreto patrón), de ninguna manera se aplicará la dosis del 0.08% ya que ocasiona una reducción de los valores de resistencia a flexión.

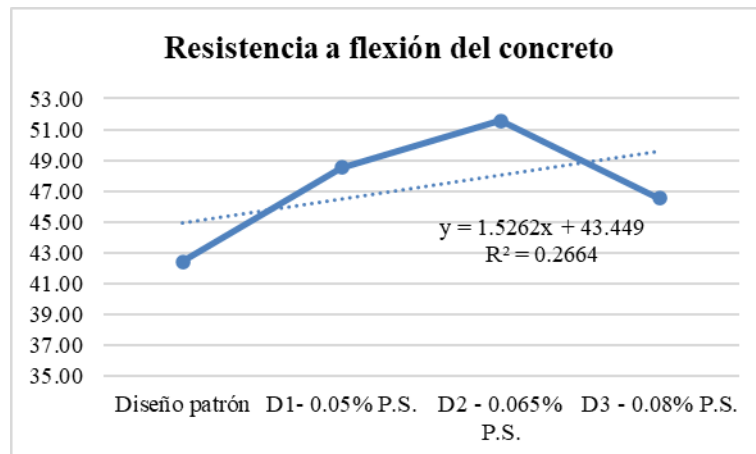


Figura 34. Tendencia de resistencia a la flexión del concreto

La figura 34 muestra la relación entre la VD y la VI, el coeficiente de correlación de $R=0.516$ constituye una correlación baja, lo que simboliza que la máxima dosis de aplicación es de 0.65% de poliacrilato de sodio y que si se usa una dosis mayor se obtienen resultados desfavorables para el concreto, mientras que el coeficiente de determinación $R^2=0.2664$ indicando un 26% de que los resultados de resistencia a flexión del hormigón se incrementaran a medida que se adiciona el poliacrilato de sodio.

Resultado de ensayo: Contenido de aire

Los datos alcanzados por la prueba fueron:

Tabla 23. Resultados de contenido de aire del concreto en estado fresco

Descripción	Contenido de aire (%)	Valor porcentual del contenido de aire del concreto respecto al diseño patrón
Diseño patrón	1.52	100.00%
D1- 0.05% P.S.	1.42	93.41%
D2 - 0.065% P.S.	1.42	93.41%
D3 - 0.08% P.S.	1.35	89.01%

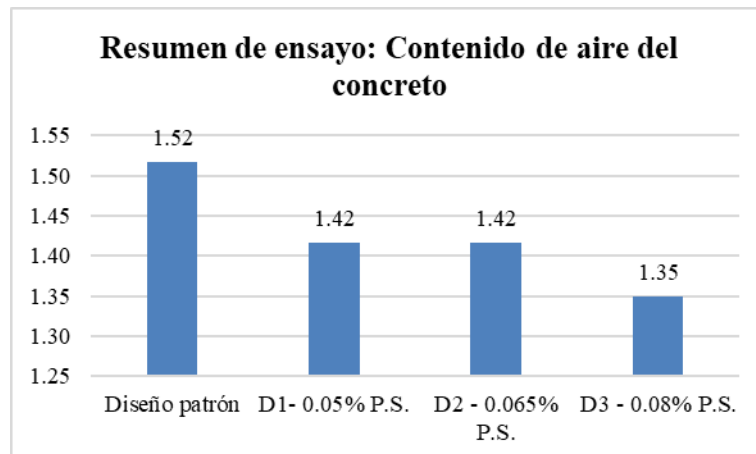


Figura 35. Resumen de los ensayos de contenido de aire del concreto

El contenido de aire del concreto en estado fresco disminuye según se va incorporando la dosis de poliacrilato de sodio, obteniendo la mayor reducción al usar la dosis al 0.08%, logrando una disminución del 10.99% en correspondencia al CP (concreto patrón).

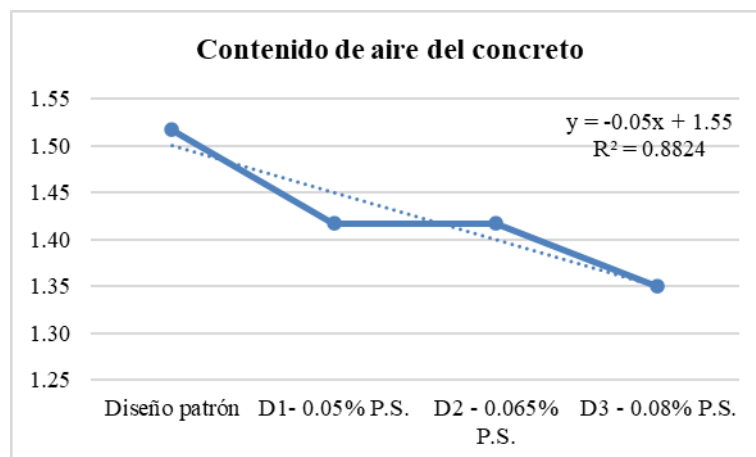


Figura 36. Tendencia de contenido de aire del concreto

La figura 36 muestra la correspondencia entre la VD y la VI, el coeficiente de correlación de $R=0.9394$ simboliza una correlación muy alta, ratificando que según se agranda la dosis de poliacrilato de sodio se incrementa el contenido de aire del concreto en estado fresco, mientras que el coeficiente de determinación $R^2=0.8824$ indicando un 88% de que los valores de contenido de aire del concreto estaran dependientes de la adición de poliacrilato de sodio.

Resultado de ensayo: Rendimiento del concreto

Se obtuvo la siguiente información:

Tabla 24. Resultados de rendimiento del concreto

Descripción	Rendimiento	Valor porcentual del rendimiento del concreto respecto al diseño patrón
Diseño patrón	0.997	100.00%
D1 - 0.05% P.S.	1.007	101.00%
D2 - 0.065% P.S.	1.010	101.34%
D3 - 0.08% P.S.	1.017	102.01%

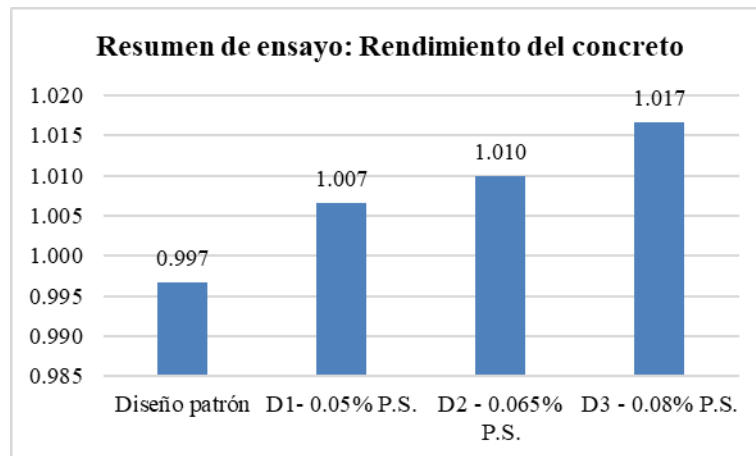


Figura 37. Resumen de los ensayos de rendimiento del concreto

Los valores del rendimiento del concreto se acrecientan a medida que se adiciona la dosis de poliacrilato de sodio, obteniendo el mayor valor al emplear la dosis al 0.08%, logrando un aumento del 2.01% en relación al CP (concreto patrón).

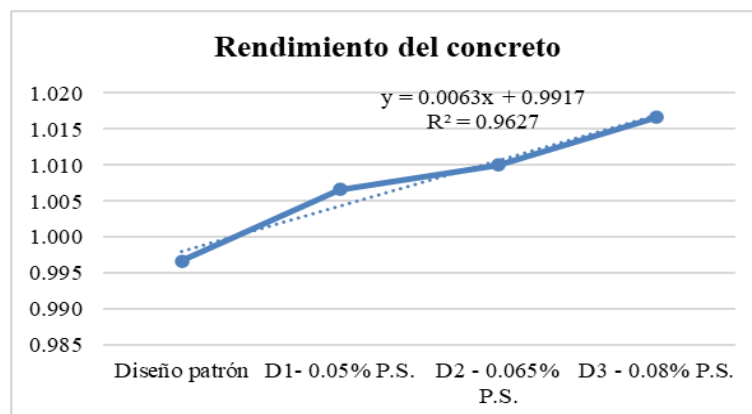


Figura 38. Tendencia de rendimiento del concreto

La figura 38 muestra la relación entre la VD y la VI, el coeficiente de correlación de $R=0.981$ simboliza una correlación muy alta, reafirmando que a medida que se amplía la dosis de poliacrilato de sodio se incrementa el rendimiento del concreto, así mismo el coeficiente de determinación $R^2=0.9627$ representa un 96% de que los valores de rendimiento del concreto se modificaran por la adición de poliacrilato de sodio.

Resultado de ensayo: Peso unitario del concreto

Los datos alcanzados por la prueba de peso unitario fueron:

Tabla 25. Resultados de peso unitario del concreto

Descripción	Peso unitario	Valor porcentual de la temperatura del concreto respecto al diseño patrón
Diseño patrón	2326.00	100.00%
D1- 0.05% P.S.	2311.33	99.37%
D2 - 0.065% P.S.	2297.67	98.78%
D3 - 0.08% P.S.	2281.67	98.09%

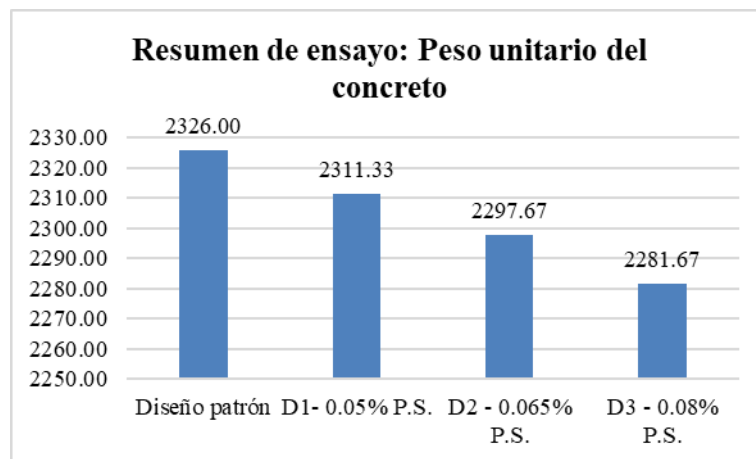


Figura 39. Resumen de los ensayos de peso unitario del concreto

El peso unitario del hormigón se reduce según se le va incorporando la dosis de poliacrilato de sodio, obteniendo la máxima reducción al emplear la dosis al 0.08%, logrando una reducción del

1.91% respecto al concreto patrón.

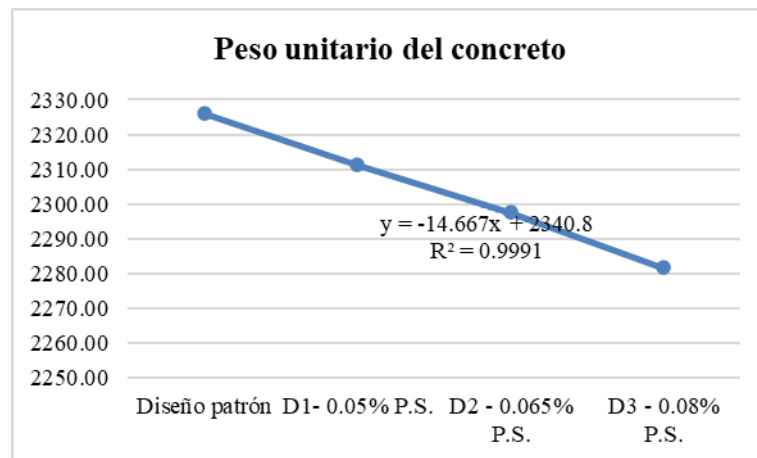


Figura 40. Tendencia de peso unitario del concreto

La figura 40 muestra la relación entre la VD y la VI, el coeficiente de correlación de $R=0.999$ simboliza una correlación muy alta, revalidando que a medida que se desarrolla la dosis de poliacrilato de sodio se disminuye el peso unitario del concreto, siendo el coeficiente de determinación $R^2=0.9991$ indicando un 99% de que los valores de peso unitario del concreto serán modificados por la adición de poliacrilato de sodio.

Resultado de ensayo: Módulo de elasticidad del concreto

Lo resultados alcanzados por la prueba de módulo de elasticidad del concreto fueron:

Tabla 26. Resultados de módulo de elasticidad del concreto

Descripción	Módulo de elasticidad secante	Valor porcentual del módulo de elasticidad del concreto respecto al diseño patrón
Diseño patrón	26166.27	100.00%
D1- 0.05% P.S.	26742.83	102.20%
D2 - 0.065% P.S.	26879.77	102.73%
D3 - 0.08% P.S.	25448.60	97.26%

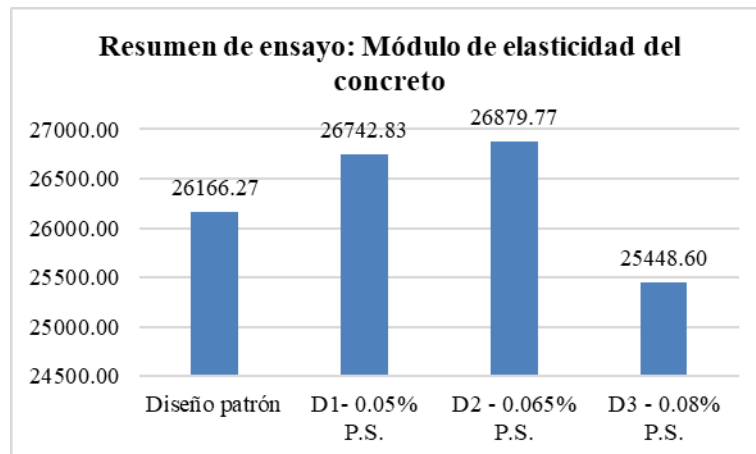


Figura 41. Resumen de los ensayos de módulo de elasticidad secante del concreto

El módulo de elasticidad del concreto tiene su mayor incremento al adicionar poliacrilato de sodio en la dosis del 0.065%, logrando un aumento del 2.73% en relación al CP, de ninguna manera se aplicará la dosis del 0.08% ya que ocasiona una reducción de los valores de módulo de elasticidad.

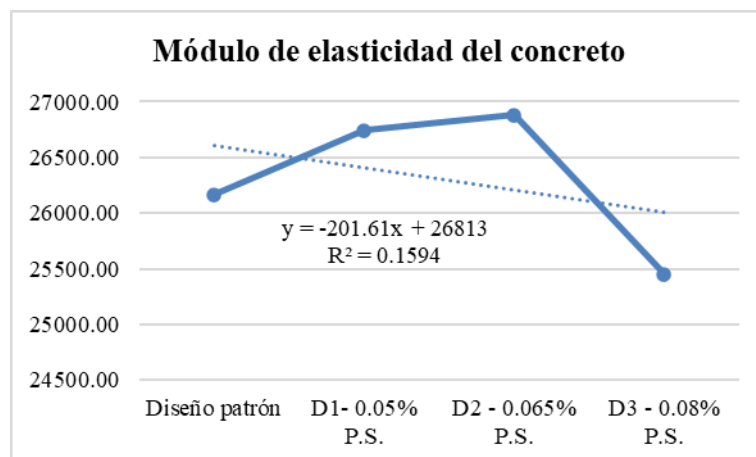


Figura 42. Tendencia de módulo de elasticidad del concreto.

La figura 42 muestra la correspondencia entre la VD y la VI, el coeficiente de correlación de $R=0.399$ simboliza una correlación baja, lo que simboliza que la máxima dosis de aplicación es de 0.65% de poliacrilato de sodio y que si se usa una dosis mayor se obtienen resultados desfavorables para el concreto, mientras que el coeficiente de determinación $R^2=0.1594$ representa un 16% de que los valores de módulo de elasticidad del concreto se incrementaran según se adicione el

poliacrilato de sodio.

Resultado de: Promedio de fisuras

Los valores alcanzados por la tesis fueron:

Tabla 27. Resultados de promedio de fisuras

Descripción	Promedio de fisuras	Valor porcentual de promedio de fisuras del concreto respecto al diseño patrón
Diseño patrón	0.64	100.00%
D1 - 0.05% P.S.	0.44	68.61%
D2 - 0.065% P.S.	0.23	35.15%
D3 - 0.08% P.S.	0.10	14.81%

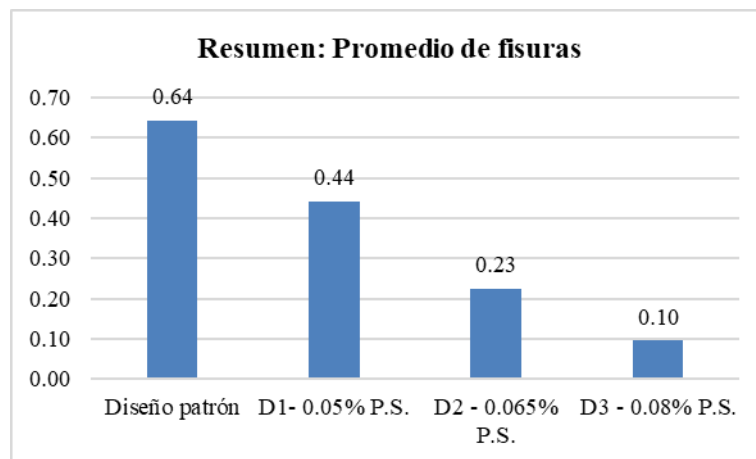


Figura 43. Resumen de promedio de fisuras.

El promedio de fisuras disminuye a medida que se incorpora la dosis de poliacrilato de sodio, obteniendo la mayor reducción al emplear la dosis al 0.08%, logrando una reducción del 85.19% respecto al concreto patrón.

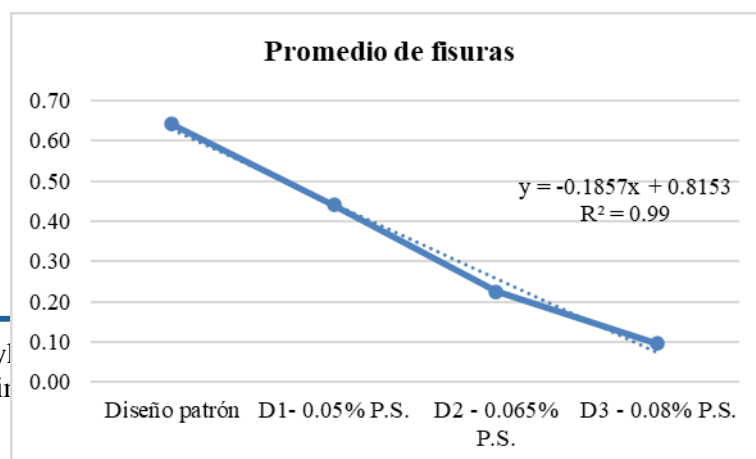


Figura 44. Tendencia de promedio de fisuras.

La figura 44 muestra la correspondencia entre la VD y la VI, el coeficiente de correlación de $R=0.995$ constituye una correlación muy alta, confirmando que a medida que se acrecienta la dosis de poliacrilato de sodio se disminuye el promedio de fisuras, mientras que el coeficiente de determinación $R^2=0.99$ simboliza un 99% de que los valores del promedio de fisuras se verán afectados por la adición de poliacrilato de sodio.

Resultado de: Tasa de evaporación del concreto

Los valores alcanzados fueron:

Tabla 28. Resultados de tasa de evaporación del concreto

Descripción	Tasa de evaporación	Valor porcentual de tasa de evaporación del concreto respecto al diseño patrón
Diseño patrón	1.147	100.00%
D1- 0.05% P.S.	1.150	100.29%
D2 - 0.065% P.S.	1.153	100.58%
D3 - 0.08% P.S.	1.160	101.16%

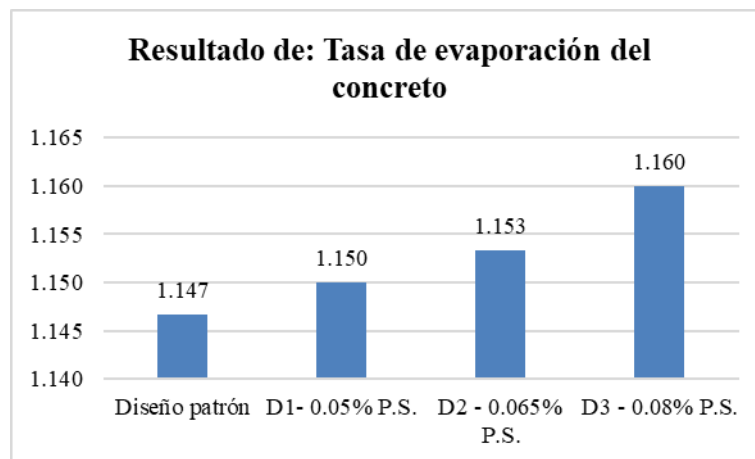


Figura 45. Resumen de los ensayos de tasa de evaporación del concreto

La tasa de evaporación del concreto se agranda a medida que se incorpora la dosis de poliacrilato de sodio, obteniendo el mayor valor al incorporar la dosis al 0.08%, logrando un aumento del 1.16% en relación

al CP.

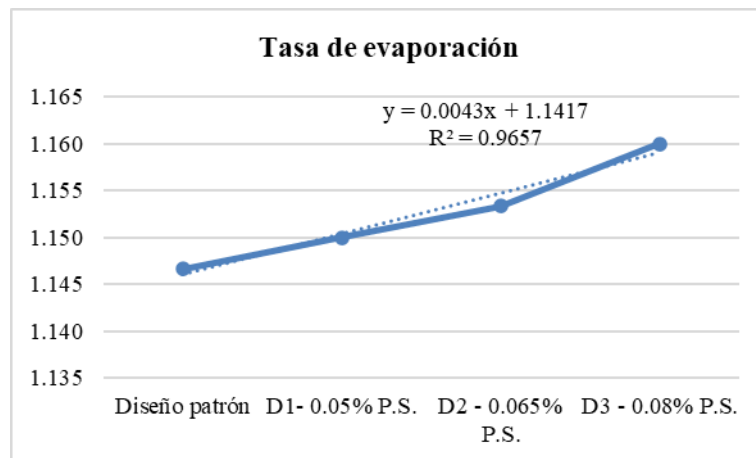


Figura 46. Tendencia de tasa de evaporación del concreto

La figura 46 admite la relación existente entre la VD y la VI, el coeficiente de correlación de $R=0.983$ simbolizando una correlación muy alta, reafirmando que a medida que se acrecienta la dosis de poliacrilato de sodio se agranda la tasa de evaporación del concreto, así mismo el coeficiente de determinación $R^2=0.9657$ simboliza un 97% de que los valores de tasa de evaporación del concreto serán afectados por la adición de poliacrilato de sodio.

Resultado de ensayo: Relación de reducción de grietas

Se realizó el ensayo de CRR, obteniendo la siguiente información:

Tabla 29. Resultados de relación de reducción de grietas

Descripción	CRR
Diseño patrón	0.00
D1- 0.05% P.S.	31.92
D2 - 0.065% P.S.	65.12
D3 - 0.08% P.S.	85.07

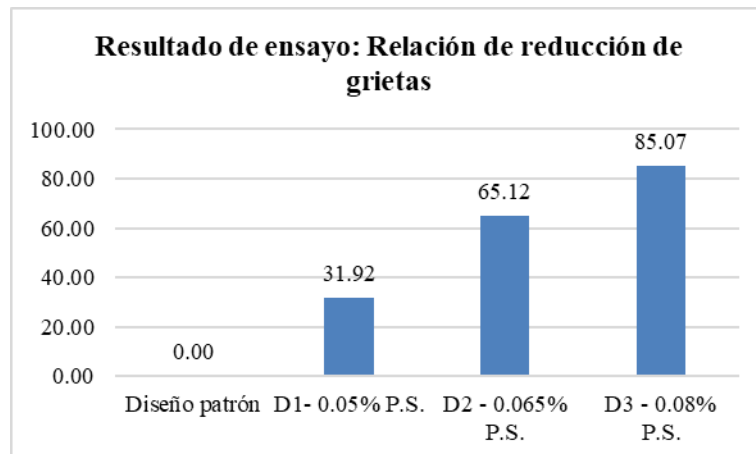


Figura 47. Resumen de los ensayos de relación de reducción de grietas

Los valores de CRR van incrementándose a medida que se adiciona el poliacrilato de sodio, siendo la dosis del 0.08% quien reduce las fisuras en 85.07%.

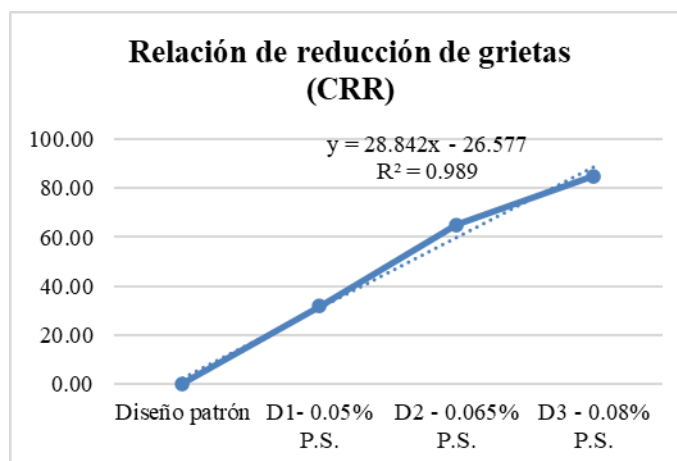


Figura 48. Tendencia de CRR.

La figura 48 exhibe la correspondencia entre la VD y la VI, el coeficiente de correlación de $R=0.99448$ simboliza una correlación muy alta, revalidando que a medida que se agranda la dosis de poliacrilato de sodio se incrementa el CRR, mientras que el coeficiente de determinación $R^2=0.989$ indica un 99% de que los valores del CRR se verán interferidos por la adición de poliacrilato de sodio.

4.1.1. Contratación de

hipótesis Análisis de resultados

Se analizaron los valores de fisuración por contracción plástica, $f'c$, resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad del concreto en pavimentos rígidos con $f'c= 300 \text{ kg/cm}^2$. Se utilizó tablas, gráficos estadísticos y medidas descriptivas con el software estadístico SPSS versión 28.

Fisuración por contracción plástica

Para el análisis del nivel de fisuración por contracción plástica se examinó el promedio de fisuras, la tasa de evaporación, CRR y exudación del concreto aplicado a pavimentos rígidos con $f'c= 300 \text{ kg/cm}^2$.

1.1 Promedio de fisuras

En la Tabla 30, se estudió las medidas descriptivas del promedio de fisura en pavimentos rígidos con $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ que se compararon la muestra patrón y los tratamientos con la incorporación de poliacrilato de sodio al 0.05%, 0.065% y 0.08%.

Se observa que el promedio de fisura es menor cuando se adiciona 0.08% de poliacrilato de sodio y la dispersión es homogénea como en los demás tratamientos.

Tabla 30. Medidas descriptivas del promedio de fisuras por tratamiento

Tratamiento		Promedio de fisuras		
		Media	Desviación estándar	Varianza
Diseño patrón		0.6425	0.0066	1.03
D1- 0.05% P.S.		0.4408	0.0038	0.86
D2 - 0.065% P.S.		0.2258	0.0118	5.23
D3 - 0.08% P.S.		0.0952	0.0064	6.72

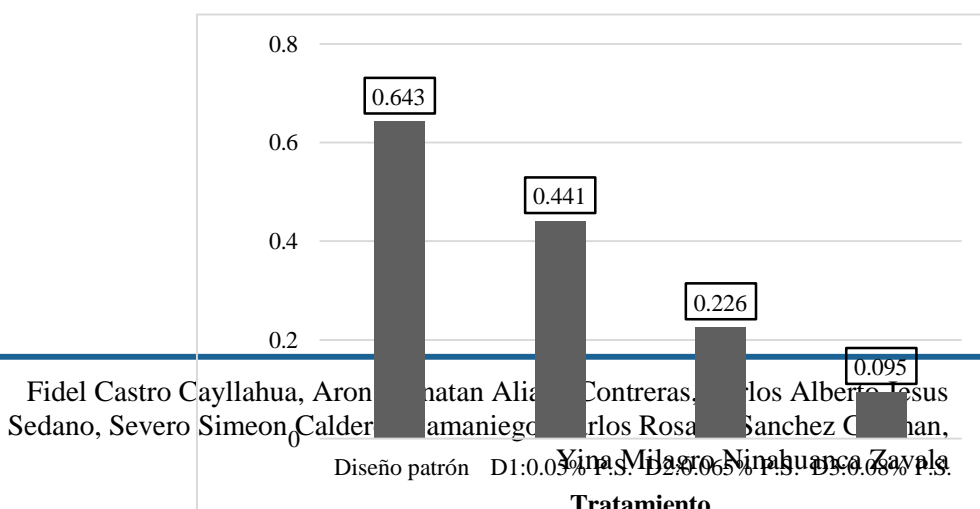


Figura 49. Promedio de fisuras por tratamiento.

1.2 Tasa de evaporación

En la Tabla 31, se analizó las medidas descriptivas de la tasa de evaporación del concreto en pavimentos rígidos con $f^c=300 \text{ kg/cm}^2$ que se compararon la muestra patrón y los tratamientos con la incorporación de poliacrilato de sodio al 0.05%, 0.065% y 0.08%.

Se observa que la tasa de evaporación es menor con el diseño patrón y la dispersión es homogénea como en los demás tratamientos.

Tabla 31. Medidas descriptivas de tasa de evaporación del concreto por tratamiento

Tratamiento	Tasa de evaporación		
	Media	Desviación estándar	Varianza
Diseño patrón	1.147	0.012	1.007
D1- 0.05% P.S.	1.150	0.010	0.870
D2 - 0.065% P.S.	1.153	0.012	1.001
D3 - 0.08% P.S.	1.160	0.010	0.862

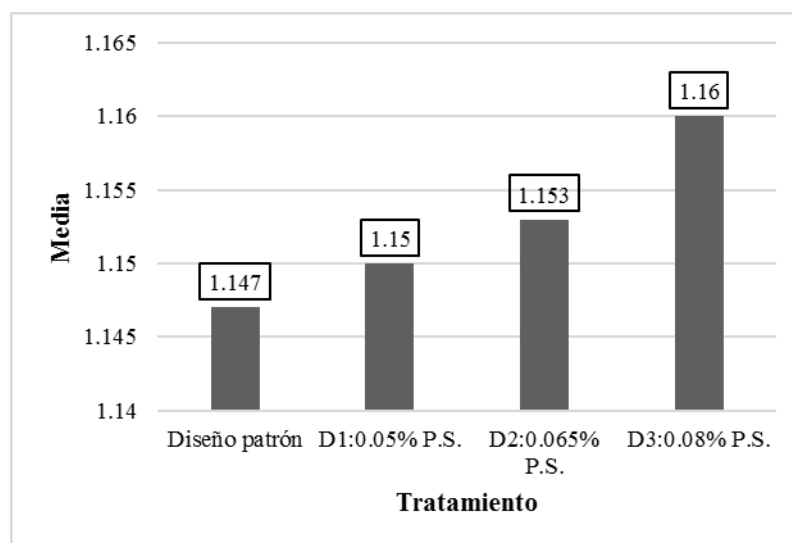


Figura 50. Promedio de tasa de evaporación del concreto por tratamiento.

1.3 Relación de reducción de grietas (CRR)

En la Tabla 32, se analizó las medidas descriptivas del CRR del concreto en pavimentos rígidos con $f^c=300 \text{ kg/cm}^2$ que se compararon la muestra patrón y los tratamientos con la adición de poliacrilato de sodio al 0.05%, 0.065% y 0.08%.

Se observa que la relación de reducción de grietas (CCR) es mayor cuando se adiciona 0.08% de poliacrilato de sodio y la dispersión es homogénea como en los demás tratamientos.

Tabla 32. Medidas descriptivas de relación de reducción de grietas por tratamiento

Tratamiento		Relación de reducción de grietas		
		Media	Desviación estándar	Varianza
Diseño patrón		0.020	0.010	50.000
D1- 0.05% P.S.		31.917	0.591	1.853
D2 - 0.065% P.S.		65.123	1.822	2.798
D3 - 0.08% P.S.		85.070	0.802	0.943

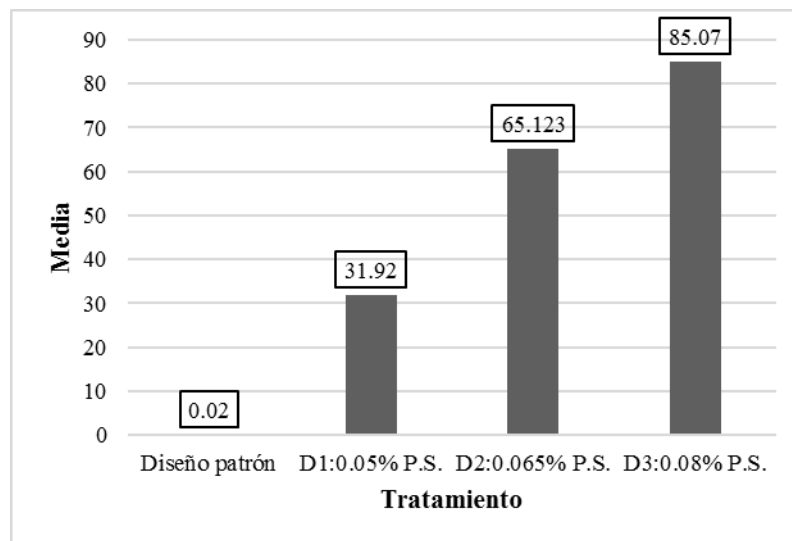


Figura 51. Promedio de relación de reducción de grietas del concreto por tratamiento.

1.4 Exudación del concreto

En la Tabla 33, se examinó las medidas descriptivas de la exudación del concreto en pavimentos rígidos con $f^c=300 \text{ kg/cm}^2$ que se

compararon la muestra patrón y los tratamientos con la incorporación de poliacrilato de sodio al 0.05%, 0.065% y 0.08%.

Se observa que la exudación del concreto es menor cuando se adiciona 0.08% de poliacrilato de sodio y la dispersión es homogénea como en los demás tratamientos.

Tabla 33. Medidas descriptivas de exudación del concreto por tratamiento

Tratamiento		Exudación		
		Media	Desviación estándar	Varianza
Diseño patrón		1.887	0.015	0.810
D1- 0.05% P.S.		1.577	0.015	0.969
D2 - 0.065% P.S.		1.337	0.015	1.143
D3 - 0.08% P.S.		0.943	0.012	1.224

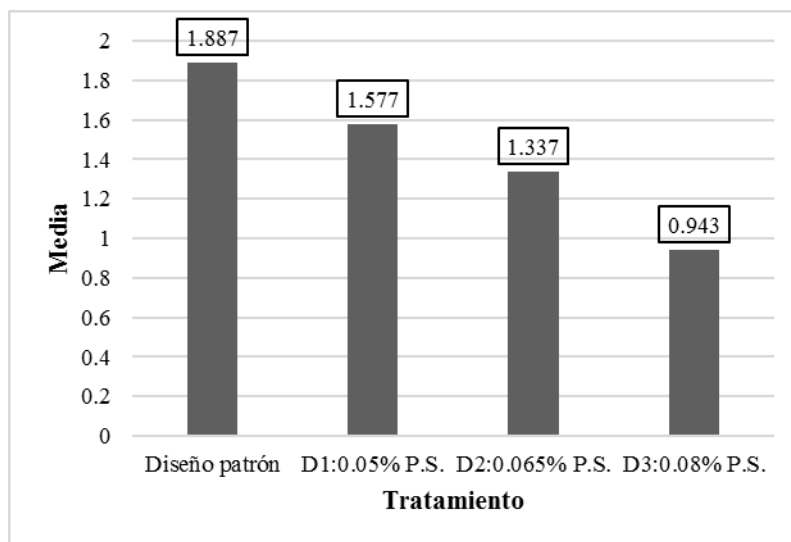


Figura 52. Promedio de exudación del concreto por tratamiento.

Resistencia a compresión del concreto

En la Tabla 34, se estudió las medidas descriptivas del $f'c$ del concreto en pavimentos rígidos con $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ que se compararon la muestra patrón y los tratamientos con la adición del poliacrilato de sodio al 0.05%, 0.065% y 0.08%.

Se aprecia que el $f'c$ del concreto es mayor cuando se adiciona 0.065% de poliacrilato de sodio y la dispersión es homogénea como en los demás tratamientos.

Tabla 34. Medidas descriptivas de resistencia a compresión del concreto por tratamiento

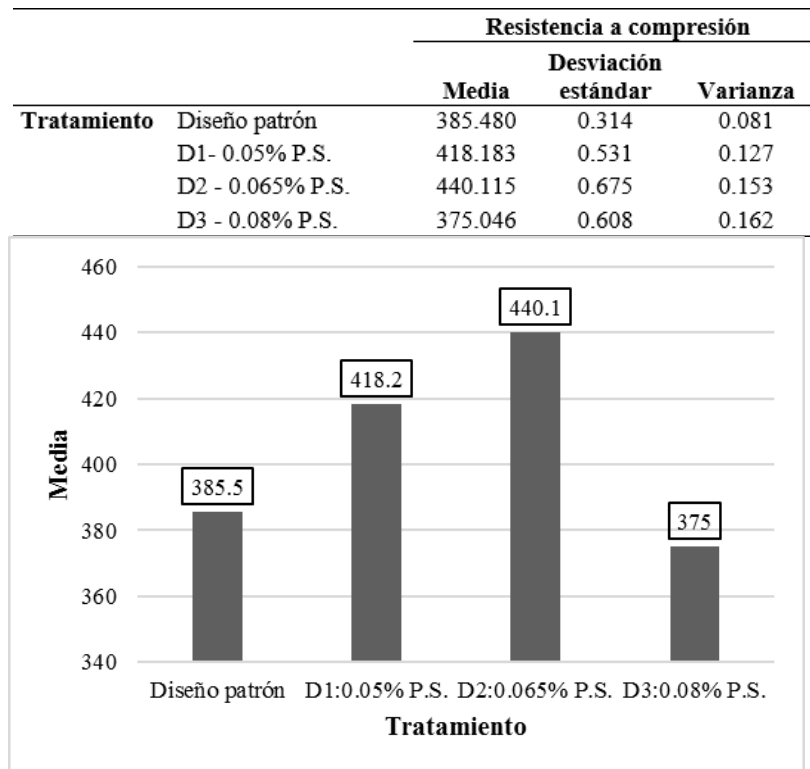


Figura 53. Promedio de resistencia a compresión del concreto por tratamiento.

Resistencia a flexión del concreto

En la Tabla 35, se evaluó las medidas descriptivas de la resistencia a la flexión del concreto en pavimentos rígidos con $f'c=300$ kg/cm² que se compararon la muestra patrón y los tratamientos con la incorporación de poliacrilato de sodio al 0.05%, 0.065% y 0.08%.

Se observa que la resistencia a la flexión del concreto es mayor cuando se adiciona 0.065% de poliacrilato de sodio y la dispersión es homogénea como en los demás tratamientos.

Tabla 35. Medidas descriptivas de resistencia a flexión del concreto por tratamiento

		Resistencia a flexión		
		Media	Desviación estándar	Varianza
Tratamiento	Diseño patrón	42.45	0.42	0.987
	D1- 0.05% P.S.	48.53	0.45	0.929
	D2 - 0.065% P.S.	51.56	0.40	0.773
	D3 - 0.08% P.S.	46.53	0.43	0.924

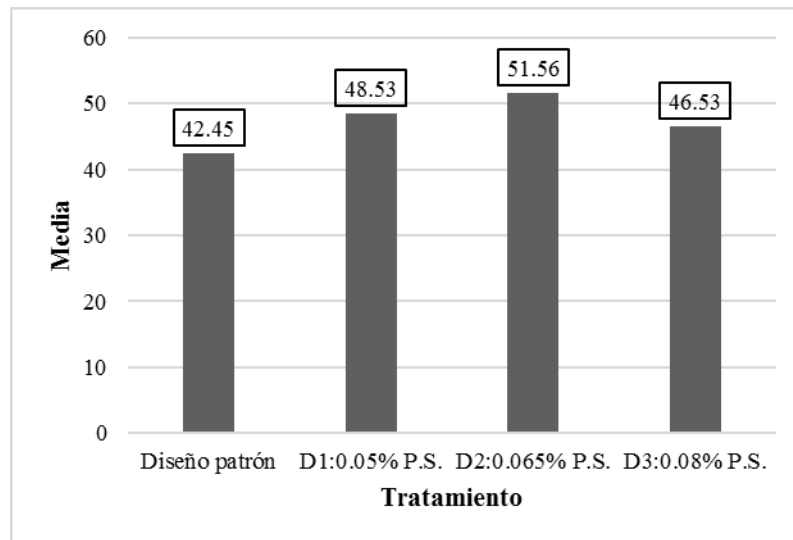


Figura 54. Promedio de resistencia a flexión del concreto por tratamiento.

Módulo de elasticidad del concreto

En la Tabla 36, se indagó las medidas descriptivas de la elasticidad del concreto en pavimentos rígidos con $f^c=300 \text{ kg/cm}^2$ que se compararon la muestra patrón y los tratamientos con la añadidura del poliacrilato de sodio al 0.05%, 0.065% y 0.08%.

Se observa que la elasticidad del concreto es mayor cuando se adiciona 0.065% de poliacrilato de sodio y la dispersión es homogénea como en los demás tratamientos.

Tabla 36. Medidas descriptivas de módulo de elasticidad del concreto por tratamiento

Tratamiento		Módulo de elasticidad		
		Media	Desviación estándar	Varianza
Diseño patrón		26166.27	12.11	0.046
D1- 0.05% P.S.		26742.83	15.74	0.059
D2 - 0.065% P.S.		26879.77	13.56	0.050
D3 - 0.08% P.S.		25448.60	25.23	0.099

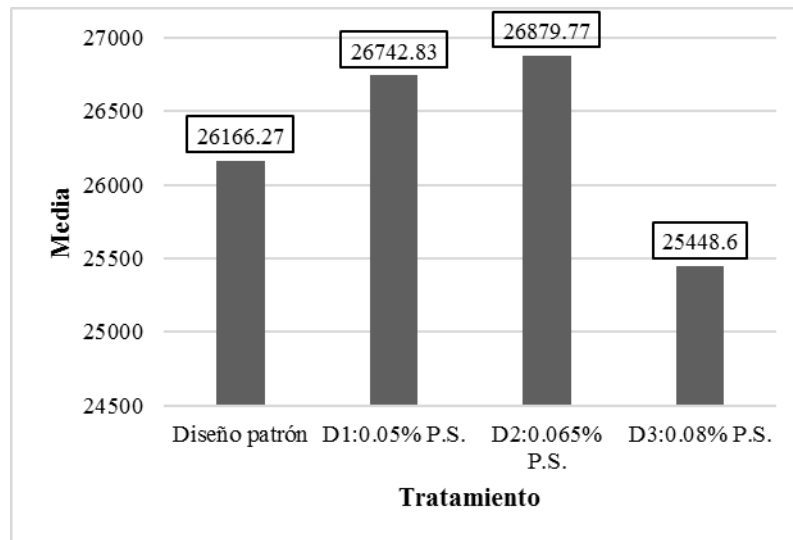


Figura 55. Promedio de módulo de elasticidad del concreto por tratamiento.

Prueba de hipótesis

Para la contrastación de las hipótesis planteadas en la investigación, se empleó la prueba paramétrica de Análisis de Varianza (ANOVA), para probar la discrepancia significativa entre grupos o tratamientos independientes con distribución normal (ver prueba de normalidad), cuando se halló que existe diferencia significativa entre los grupos o tratamientos se aplicó las pruebas Tukey (cuando las varianzas son iguales) y T3 de Dunnett (Cuando las varianzas no son iguales).

También, se empleó la prueba no paramétrica H de Kruskal Wallis para probar la diferencia significativa entre grupos o tratamientos independientes sin distribución normal (ver prueba de normalidad). Además, se analizó la comparación por parejas.

Hipótesis general

Con los resultados de las hipótesis específicas, se contrastó que el poliacrilato de sodio interviene significativamente en el nivel de fisuración por contracción plástica y propiedades mecánicas del concreto en pavimentos rígidos de $f_c=300 \text{ kg/cm}^2$.

Hipótesis específicas

Hipótesis específica 1

La hipótesis, el empleo del poliacrilato de sodio reduce en el nivel de fisuración por contracción plástica (promedio de fisuras, tasa de evaporación, CRR y exudación) del concreto en pavimentos rígidos de $f'c= 300 \text{ kg/cm}^2$ –Huancayo – 2023, se contrastó mediante la prueba de hipótesis del efecto de poliacrilato de sodio en el promedio de fisuras, tasa de evaporación, relación de reducción de grietas (CRR) y exudación.

Promedio de fisuras

Se contrastó la hipótesis, el empleo del poliacrilato de sodio reduce el promedio de fisuras del concreto en pavimentos rígidos de $f'c= 300 \text{ kg/cm}^2$, se planteó las siguientes hipótesis estadísticas:

H_0 : El promedio de fisuras del concreto en pavimentos rígidos con $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ es la misma en todos los niveles (tratamientos) de poliacrilato de sodio ($\mu_{\text{patrón}}=\mu_{D1-0.05\% \text{ P.S.}}=\mu_{D2-0.065\% \text{ P.S.}}=\mu_{D3-0.08\% \text{ P.S.}}$).

H_1 : El promedio de fisuras del concreto en pavimentos rígidos con $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ es diferente en al menos uno de los niveles (tratamientos) de poliacrilato de sodio.

En la Tabla 37, se observa que el promedio de fisuras del concreto en pavimentos rígidos con $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ no es el mismo en los diferentes tratamientos de poliacrilato de sodio (valor $p = 0.0 < 0.05 = \alpha =$ Nivel de significancia, se rechaza H_0).

Tabla 37. Resultado de prueba ANOVA de muestras independientes de promedio de fisuras

	Suma de cuadrados	Gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	0.522	3	0.174	2911.760	0.000
Dentro de grupos	0.000	8	0.000		
Total	0.523	11			

Al comparar por pares los tratamientos (Tabla 38), se encontró que el promedio de fisuras entre todos los tratamientos (muestra patrón y los tratamientos que se adicionó 0.05% PS, 0.065% PS y 0.08% PS) son significativamente diferentes (Valor $p = 0.0 < \alpha = 0.05$, se rechaza $H_0: \mu_i = \mu_j$).

Tabla 38. Resultado HSD Tukey de comparaciones por parejas de tratamientos de promedio de fisuras

(I) Tratamiento	(J) Tratamiento	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.
Diseño patrón	D1- 0.05% P.S.	0.2016667*	0.0063147	0.000
	D2 - 0.065% P.S.	0.4166667*	0.0063147	0.000
	D3 - 0.08% P.S.	0.5473333*	0.0063147	0.000
D1- 0.05% P.S.	Diseño patrón	-0.2016667*	0.0063147	0.000
	D2 - 0.065% P.S.	0.2150000*	0.0063147	0.000
	D3 - 0.08% P.S.	0.3456667*	0.0063147	0.000
D2 - 0.065% P.S.	Diseño patrón	-0.4166667*	0.0063147	0.000
	D1- 0.05% P.S.	0.2150000*	0.0063147	0.000
	D3 - 0.08% P.S.	0.1306667*	0.0063147	0.000
D3 - 0.08% P.S.	Diseño patrón	-0.5473333*	0.0063147	0.000
	D1- 0.05% P.S.	-0.3456667*	0.0063147	0.000
	D2 - 0.065% P.S.	-0.1306667*	0.0063147	0.000

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

Además, se determinó que el promedio de fisuras del tratamiento que se adicionó 0.08% de poliacrilato de sodio es significativamente menor a los demás tratamientos (las diferencia son positivas al comparar el tratamiento 0.08% PS de poliacrilato de sodio (I) con los demás tratamientos (J)). Ver Tabla 39.

Tabla 39. Resultado HSD Tukey subconjuntos homogéneos de tratamiento de promedio de fisuras

Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
D3 - 0.08% P.S.	3	0.095167			
D2 - 0.065% P.S.	3		0.225833		
D1- 0.05% P.S.	3			0.440833	
Diseño patrón	3				0.642500
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3.000.

Tasa de evaporación

Se contrastó la hipótesis, el empleo del poliacrilato de sodio reduce la tasa de evaporación del concreto en pavimentos rígidos de $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$, se planteó las siguientes hipótesis estadísticas:

H₀: La tasa de evaporación del concreto en pavimentos rígidos con $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ es la misma en todos los niveles (tratamientos) de poliacrilato de sodio ($\mu_{\text{patrón}}=\mu_{D1-0.05\% \text{ P.S.}}=\mu_{D2-0.065\% \text{ P.S.}}=\mu_{D3-0.08\% \text{ P.S.}}$).

H₁: La tasa de evaporación del concreto en pavimentos rígidos con $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ es diferente en al menos uno de los niveles (tratamientos) de poliacrilato de sodio.

Con los resultados conseguidos (Tabla 40), se probó que la distribución de la tasa de evaporación del concreto en pavimentos rígidos con $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ es el mismo en los diferentes tratamientos de poliacrilato de sodio (valor $p = 0.478 > 0.05 = \alpha = \text{Nivel de significancia}$, no se rechaza H₀: $\mu_i = \mu_j$).

Tabla 40. Resultado de prueba H de Kruskal Wallis de muestras independientes de tasa de evaporación

N total	12
Estadístico de prueba	2.488 ^{a,b}
Grado de libertad	3
Sig. asintótica (prueba bilateral)	0.478

a. Las estadísticas de prueba se ajustan para empates.

b. No se realizan múltiples comparaciones porque la prueba global no muestra diferencias significativas en las muestras.

Relación de reducción de grietas (CRR)

Se contrastó la hipótesis, el empleo del poliacrilato de sodio reduce la relación de reducción de grietas del concreto en pavimentos rígidos de $f'c= 300 \text{ kg/cm}^2$, se planteó las siguientes hipótesis estadísticas:

H₀: La relación de reducción de grietas del concreto en pavimentos rígidos con $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ es la misma en todos los niveles (tratamientos) de poliacrilato de sodio ($\mu_{\text{patrón}}=\mu_{D1-0.05\% \text{ P.S.}}=\mu_{D2-0.065\% \text{ P.S.}}=\mu_{D3-0.08\% \text{ P.S.}}$).

H₁: La relación de reducción de grietas del concreto en pavimentos rígidos con $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ es diferente en al menos uno de los niveles (tratamientos) de poliacrilato de sodio.

En la Tabla 41, se observa que el promedio de relación de

reducción de grietas del concreto en pavimentos rígidos con $f'c=300$ kg/cm² no es el mismo en los diferentes tratamientos de poliacrilato de sodio (valor $p = 0.0 < 0.05 = \alpha$ = Nivel de significancia, se rechaza H_0).

Tabla 41. Resultado de prueba ANOVA de muestras independientes de relación de reducción de grietas

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	12611.380	3	4203.793	3897.755	0.000
Dentro de grupos	8.628	8	1.079		
Total	12620.008	11			

Al comparar por pares los tratamientos (Tabla 42), se encontró que el promedio de relación de reducción de grietas entre todos los tratamientos (muestra patrón y los tratamientos que se adicionó 0.05% PS, 0.065% PS y 0.08% PS) son significativamente diferentes (Valor $p = 0.0 < \alpha = 0.05$, se rechaza $H_0: \mu_i = \mu_j$).

Tabla 42. Resultados HSD Tukey subconjuntos homogéneos de tratamientos de promedio de Relación de reducción de grietas

Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
Diseño patrón	3	0.02000			
D1 - 0.05% P.S.	3		31.91667		
D2 - 0.065% P.S.	3			65.12333	
D3 - 0.08% P.S.	3				85.07000
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.
a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3.000.

Exudación del concreto

Se contrastó la hipótesis de investigación, el empleo del poliacrilato de sodio reduce la exudación del concreto en pavimentos rígidos de $f'c= 300$ kg/cm², con el planteamiento de las siguientes hipótesis estadísticas:

H_0 : La distribución de la exudación del concreto en pavimentos rígidos con $f'c=300$ kg/cm² es el mismo en todos los tratamientos del poliacrilato de sodio.

H_1 : La distribución de la exudación del concreto en pavimentos

rígidos con $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ es diferente en al menos uno de los tratamientos del poliacrilato de sodio.

En la Tabla 43, se observa que el promedio de exudación del concreto en pavimentos rígidos con $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ no es el mismo en los diferentes tratamientos de poliacrilato de sodio (valor $p = 0.015 < 0.05 = \alpha =$ Nivel de significancia, se rechaza).

Tabla 43. Resultados de prueba H de Kruskal Wallis de muestras independientes de exudación.

N total	12
Estadístico de prueba	10.421 ^a
Grado de libertad	3
Sig. asintótica (prueba bilateral)	0.015

a. Las estadísticas de prueba se ajustan para empates.

Al comparar por pares los tratamientos (Tabla 44), se encontró que la exudación del concreto en pavimentos rígidos con $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ es significativamente menor en el tratamiento que se adicionó 0.08% PS de poliacrilato de sodio en comparación a los tratamientos que se adicionó 0.05% PS y el diseño patrón (Valor $p < 0.05 = \alpha$, se rechaza $H_0: \mu \tilde{i} = \mu \tilde{j}$), sin embargo, es el mismo con el tratamiento que se adicionó 0.065% PS.

Tabla 44. Resultados de comparaciones por parejas de tratamientos de prueba H de Kruskal Wallis de muestras independientes de exudación del concreto en pavimentos rígidos con $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$.

Muestra 1-Muestra 2	Estadístico de prueba	Desv. Error	Desv. Estadístico de prueba	Sig.
D3 - 0.08% P.S.-D2 - 0.065% P.S.	3.000	2.939	1.021	0.307
D3 - 0.08% P.S.-D1- 0.05% P.S.	6.000	2.939	2.042	0.041
D3 - 0.08% P.S.-Diseño patrón	9.000	2.939	3.063	0.002
D2 - 0.065% P.S.-D1- 0.05% P.S.	3.000	2.939	1.021	0.307
D2 - 0.065% P.S.-Diseño patrón	6.000	2.939	2.042	0.041
D1- 0.05% P.S.-Diseño patrón	3.000	2.939	1.021	0.307

Cada fila prueba la hipótesis nula que las distribuciones de la Muestra 1 y la Muestra 2 son iguales. Se visualizan las significaciones asintóticas (pruebas bilaterales). El nivel de significación es de 0.050.

Con los resultados de estas cuatro pruebas de hipótesis, se comprueba, que el empleo de poliacrilato de sodio reduce el nivel de fisuración por contracción plástica, debido que: reduce el promedio de

fisuras del concreto, la relación de reducción de grietas y la exudación del concreto con la adición del 0.08% PS; la tasa de evaporación del concreto reduce con la adición de cualquiera de los niveles de poliacrilato de sodio.

Hipótesis específica 2

Para la hipótesis de investigación dos, planteada como el empleo del poliacrilato de sodio incrementa la resistencia a la compresión del concreto en pavimentos rígidos de $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ – Huancayo – 2023, se planteó las siguientes hipótesis estadística:

H_0 : El promedio de la resistencia a la compresión del concreto en pavimentos rígidos con $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ es la misma en todos los niveles (tratamientos) de poliacrilato de sodio ($\mu_{\text{patrón}} = \mu_{D1-0.05\% \text{ P.S.}} = \mu_{D2-0.065\% \text{ P.S.}} = \mu_{D3-0.08\% \text{ P.S.}}$).

H_1 : El promedio de la resistencia a la compresión del concreto en pavimentos rígidos con $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ es diferente en al menos uno de los niveles (tratamientos) de poliacrilato de sodio.

Con los resultados obtenidos (Tabla 45), se afirma que el promedio de la resistencia a la compresión del concreto en pavimentos rígidos con $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ no es el mismo en los diferentes tratamientos de poliacrilato de sodio (valor $p = 0.0 < 0.05 = \alpha =$ Nivel de significancia, se rechaza H_0).

Tabla 45. Resultados de prueba ANOVA de muestras independientes de Resistencia a la compresión.

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	10739.279	3	3579.760	11880.990	0.000
Dentro de grupos	3.616	12	0.301		
Total	10742.895	15			

Al comparar por pares los tratamientos (Tabla 46), se encontró que el promedio de la resistencia a la compresión entre todos los

tratamientos (muestra patrón y los tratamientos que se adicionó 0.05% PS, 0.065% PS y 0.08% PS) son significativamente diferentes (Valor $p = 0.0 < \alpha = 0.05$, se rechaza $H_0: \mu_i = \mu_j$).

Tabla 46. Resultados HSD Tukey de comparaciones por parejas de tratamientos de promedio de Resistencia a la compresión.

(I) Tratamiento	(J) Tratamiento	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.
Diseño patrón	D1- 0.05% P.S.	-31.896667*	0.847945	0.000
	D2 - 0.065% P.S.	-65.103333*	0.847945	0.000
	D3 - 0.08% P.S.	-85.050000*	0.847945	0.000
D1- 0.05% P.S.	Diseño patrón	31.896667*	0.847945	0.000
	D2 - 0.065% P.S.	-33.206667*	0.847945	0.000
	D3 - 0.08% P.S.	-53.153333*	0.847945	0.000
D2 - 0.065% P.S.	Diseño patrón	65.103333*	0.847945	0.000
	D1- 0.05% P.S.	33.206667*	0.847945	0.000
	D3 - 0.08% P.S.	-19.946667*	0.847945	0.000
D3 - 0.08% P.S.	Diseño patrón	85.050000*	0.847945	0.000
	D1- 0.05% P.S.	53.153333*	0.847945	0.000
	D2 - 0.065% P.S.	19.946667*	0.847945	0.000

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

Los resultados de la Tabla 47, se contrastó que el promedio de resistencia a la compresión es significativamente mayor (aumentó) cuando se adicionó 0.065% PS de poliacrilato de sodio.

Tabla 47. Resultados HSD Tukey subconjuntos homogéneos de tratamientos de promedio de Resistencia a la compresión.

Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
D3 - 0.08% P.S.	4	375.04575			
Diseño patrón	4		385.47950		
D1- 0.05% P.S.	4			418.18250	
D2 - 0.065% P.S.	4				440.11525
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 4.000.

Hipótesis específica 3

Para la prueba de la hipótesis de investigación, el empleo del poliacrilato de sodio incrementa la resistencia a la flexión del concreto en pavimentos rígidos de $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ – Huancayo – 2023, se planteó las siguientes hipótesis estadísticas

H_0 : El promedio de la resistencia a la flexión del concreto en pavimentos rígidos con $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ es la misma en todos los niveles (tratamientos) de poliacrilato de sodio ($\mu_{\text{patrón}} = \mu_{D1-0.05\% \text{ P.S.}} = \mu_{D2-0.065\% \text{ P.S.}} = \mu_{D3-0.08\% \text{ P.S.}}$).

H_1 : El promedio de la resistencia a la flexión del concreto en pavimentos rígidos con $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ es diferente en al menos uno de los niveles (tratamientos) de poliacrilato de sodio.

Con los resultados obtenidos (Tabla 48), se afirma que el promedio de la resistencia a la flexión del concreto en pavimentos rígidos con $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ no es el mismo en los diferentes tratamientos de poliacrilato de sodio (valor $p = 0.0 < 0.05 = \alpha =$ Nivel de significancia, se rechaza H_0).

Tabla 48. Resultados de prueba ANOVA de muestras independientes de Resistencia a la flexión.

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	174.879	3	58.293	322.823	0.000
Dentro de grupos	2.167	12	0.181		
Total	177.046	15			

Al comparar por pares los tratamientos (Tabla 49), se encontró que el promedio de la resistencia a la flexión entre todos los tratamientos (muestra patrón y los tratamientos que se adicionó 0.05% PS, 0.065% PS y 0.08% PS) son significativamente diferentes (Valor $p = 0.0 < \alpha = 0.05$, se rechaza $H_0: \mu_i = \mu_j$).

Tabla 49. Resultados HSD Tuckey de comparaciones por parejas de tratamientos de promedio de resistencia a la flexión.

(I) Tratamiento	(J) Tratamiento	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.
Diseño patrón	D1- 0.05% P.S.	-6.07500*	0.30048	0.000
	D2 - 0.065% P.S.	-9.10500*	0.30048	0.000
	D3 - 0.08% P.S.	-4.07750*	0.30048	0.000
D1- 0.05% P.S.	Diseño patrón	6.07500*	0.30048	0.000
	D2 - 0.065% P.S.	-3.03000*	0.30048	0.000
	D3 - 0.08% P.S.	1.99750*	0.30048	0.000
D2 - 0.065% P.S.	Diseño patrón	9.10500*	0.30048	0.000
	D1- 0.05% P.S.	3.03000*	0.30048	0.000
	D3 - 0.08% P.S.	5.02750*	0.30048	0.000
D3 - 0.08% P.S.	Diseño patrón	4.07750*	0.30048	0.000
	D1- 0.05% P.S.	-1.99750*	0.30048	0.000
	D2 - 0.065% P.S.	-5.02750*	0.30048	0.000

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

Estos resultados, Tabla 50, prueban que el promedio de resistencia a la flexión es significativamente mayor (aumenta) cuando se adicionó 0.065% PS de poliacrilato de sodio.

Tabla 50. Resultados de prueba ANOVA de muestras independientes de Resistencia a la flexión.

Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
Diseño patrón	4	42.4500			
D3 - 0.08% P.S.	4		46.5275		
D1- 0.05% P.S.	4			48.5250	
D2 - 0.065% P.S.	4				51.5550
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 4,000.

Hipótesis específica 4

Para la prueba de la hipótesis de investigación, el empleo del poliacrilato de sodio incrementa el módulo de elasticidad del concreto en pavimentos rígidos de $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ – Huancayo - 2023, se planteó las siguientes hipótesis estadísticas

H_0 : El promedio de elasticidad del concreto en pavimentos rígidos con $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ es la misma en todos los niveles (tratamientos) de poliacrilato de sodio ($\mu_{\text{patrón}} = \mu_{\text{D1-0.05\% P.S.}} = \mu_{\text{D2-0.065\%}}$

P.S. = $\mu_{D3-0.08\% \text{ P.S.}}$).

H₁: El promedio de elasticidad del concreto en pavimentos rígidos con $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ es diferente en al menos uno de los niveles (tratamientos) de poliacrilato de sodio.

Con los resultados obtenidos (Tabla 51), se afirma que el promedio de módulo elasticidad del concreto en pavimentos rígidos con $f'c=300 \text{ kg/cm}^2$ no es el mismo en los diferentes tratamientos de poliacrilato de sodio (valor $p = 0.0 < 0.05 = \alpha =$ Nivel de significancia, se rechaza H₀).

Tabla 51. Resultados de prueba ANOVA de muestras independientes de módulo de elasticidad.

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	3823944.811	3	1274648.270	4197.221	0.000
Dentro de grupos	2429.509	8	303.689		
Total	3826374.319	11			

Al comparar por pares los tratamientos (Tabla 52), se encontró que el promedio de elasticidad entre todos los tratamientos (muestra patrón y los tratamientos que se adicionó 0.05% PS, 0.065% PS y 0.08% PS) son significativamente diferentes (Valor $p = 0.0 < \alpha = 0.05$, se rechaza H₀: $\mu_i = \mu_j$).

Tabla 52. Resultados HSD Tukey de comparaciones por parejas de tratamientos de promedio de módulo de elasticidad

(I) Tratamiento	(J) Tratamiento	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.
Diseño patrón	D1- 0.05% P.S.	-576.56000*	14.22881	0.000
	D2 - 0.065% P.S.	-713.49667*	14.22881	0.000
	D3 - 0.08% P.S.	717.67333*	14.22881	0.000
D1- 0.05% P.S.	Diseño patrón	576.56000*	14.22881	0.000
	D2 - 0.065% P.S.	-136.93667*	14.22881	0.000
	D3 - 0.08% P.S.	1294.23333*	14.22881	0.000
D2 - 0.065% P.S.	Diseño patrón	713.49667*	14.22881	0.000
	D1- 0.05% P.S.	136.93667*	14.22881	0.000
	D3 - 0.08% P.S.	1431.17000*	14.22881	0.000
D3 - 0.08% P.S.	Diseño patrón	-717.67333*	14.22881	0.000
	D1- 0.05% P.S.	-1294.23333*	14.22881	0.000
	D2 - 0.065% P.S.	-1431.17000*	14.22881	0.000

*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

Los resultados (Tabla 53) nos muestran que el promedio de elasticidad es significativamente mayor (aumentó) cuando se adicionó 0.065% PS de poliacrilato de sodio.

Tabla 53. Resultados HSD Tuckey subconjuntos homogéneos de tratamientos de promedio de elasticidad

Tratamiento	N	Subconjunto para alfa = 0.05			
		1	2	3	4
D3 - 0.08% P.S.	3	25448.6000			
Diseño patrón	3		26166.2733		
D1- 0.05% P.S.	3			26742.8333	
D2 - 0.065% P.S.	3				26879.7700
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.
a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 3.000.

Prueba de normalidad

Para realizar la prueba de normalidad de las diferentes variables en análisis, se aplicó la prueba no paramétrica de Shapiro Wilk dado que cada grupo contiene muestras menores de 50. Se plantearon las siguientes hipótesis

H_0 : La variable i en los tratamientos j siguen distribución normal. H_1 : La variable i en los tratamientos j no siguen distribución normal. Donde:

i = Flexión, Compresión, Exudación CRR

j = Muestra Patrón, 0.05% de poliacrilato de sodio, 0.065% de poliacrilato de sodio, 0.08% de poliacrilato de sodio

Se comprobó, ver tabla 54, que, en todos los tratamientos aplicados en el promedio de fisuras, relación de reducción de grietas, módulo de elasticidad, resistencia a la compresión y resistencia a la flexión se ajustan a una distribución normal. En tanto que Exudación en el diseño patrón y los tratamientos de 0.05% PS, 0.065% PS, Tasa de evaporación en los tratamientos de 0.05% PS y 0.08% PS se ajustan a una distribución normal en cada uno de los tratamientos. Sólo Tasa de evaporación en el diseño patrón y en el tratamiento 0.065% PS, exudación en el tratamiento 0.08% no siguen distribución normal.

	Tratamiento	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	G1	Sig.
Promedio de fisuras	Diseño patrón	0.893	3	0.363
	D1- 0.05% P.S.	0.964	3	0.637
	D2 - 0.065% P.S.	0.907	3	0.407
	D3 - 0.08% P.S.	0.871	3	0.298
Tasa de evaporación	Diseño patrón	0.750	3	0.000
	D1- 0.05% P.S.	1.000	3	1.000
	D2 - 0.065% P.S.	0.750	3	0.000
	D3 - 0.08% P.S.	1.000	3	1.000
Relación de reducción de grietas	Diseño patrón	1.000	3	1.000
	D1- 0.05% P.S.	0.962	3	0.625
	D2 - 0.065% P.S.	0.907	3	0.407
	D3 - 0.08% P.S.	0.921	3	0.457
Exudación	Diseño patrón	0.964	3	0.637
	D1- 0.05% P.S.	0.964	3	0.637
	D2 - 0.065% P.S.	0.964	3	0.637
	D3 - 0.08% P.S.	0.750	3	0.000
Módulo de elasticidad	Diseño patrón	0.999	3	0.934
	D1- 0.05% P.S.	0.882	3	0.331
	D2 - 0.065% P.S.	0.818	3	0.158
	D3 - 0.08% P.S.	0.889	3	0.352
Resistencia a compresión	Diseño patrón	0.933	4	0.613
	D1- 0.05% P.S.	0.962	4	0.788
	D2 - 0.065% P.S.	0.889	4	0.376
	D3 - 0.08% P.S.	0.823	4	0.151
Resistencia a flexión	Diseño patrón	0.999	4	0.997
	D1- 0.05% P.S.	0.959	4	0.770
	D2 - 0.065% P.S.	0.902	4	0.440
	D3 - 0.08% P.S.	0.877	4	0.326

Tabla 54. Resultados Prueba de Normalidad de Shapiro Wilk de variables por tratamiento

Prueba de homogeneidad

Para probar la homogeneidad o igualdad de varianzas se aplicó la prueba de Levene basado en media, que plantea las siguientes hipótesis:

Ho: Las varianzas de los diferentes tratamientos son iguales u homogéneas

H₁: Una de las varianzas de los diferentes tratamientos es diferente u heterogénea

Se probó, ver Tabla 55, que las varianzas de promedio de fisuras, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad de los diferentes tratamientos en son iguales u homogéneas (Valor $p > 0.05 = \alpha$, no se rechaza H₀). Sin embargo, las varianzas de la relación de reducción de grietas no son homogéneas (Valor $p = 0.021 < 0.05 = \alpha$, se rechaza H₀)

Tabla 55. Resultados de Pruebas de homogeneidad de varianzas de Levene

		Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Promedio de fisuras	Se basa en la media	2.175	3	8	0.169
Relación de reducción de grietas	Se basa en la media	5.776	3	8	0.021
Resistencia a compresión	Se basa en la media	1.656	3	12	0.229
Resistencia a flexión	Se basa en la media	0.034	3	12	0.991
Módulo de elasticidad	Se basa en la media	1.395	3	8	0.313

3.4.1. Propiedades del concreto en estado fresco

Las propiedades del concreto en estado fresco constituyen un aspecto fundamental para evaluar la calidad inicial de las mezclas y determinar su aptitud para las operaciones de mezclado, transporte, colocación, compactación y acabado. Antes de analizar el comportamiento mecánico y la capacidad de control de fisuras proporcionada por el poliacrilato de sodio, resulta necesario evaluar la influencia de este material sobre las características del concreto durante su etapa plástica, debido a que cualquier modificación en la composición de la mezcla puede afectar su trabajabilidad y comportamiento constructivo.

El concreto fresco debe presentar condiciones adecuadas de consistencia y manejabilidad que permitan su correcta colocación en obra sin generar problemas de

segregación, exudación excesiva o dificultades durante el proceso de compactación. En el caso de los pavimentos rígidos, estas propiedades adquieren una importancia especial debido a que la uniformidad de la mezcla influye directamente sobre la calidad superficial, la resistencia mecánica y la durabilidad futura de la estructura.

La incorporación de poliacrilato de sodio genera modificaciones en la disponibilidad de agua libre dentro del sistema cementicio debido a la capacidad absorbente del polímero. Durante el proceso de mezclado, parte del agua es retenida temporalmente por las partículas superabsorbentes, lo que puede alterar las propiedades reológicas del concreto y modificar parámetros relacionados con la consistencia y trabajabilidad. Por esta razón, la evaluación de las propiedades en estado fresco constituye una etapa indispensable para comprender el comportamiento integral de las mezclas modificadas.

Trabajabilidad de las mezclas

La trabajabilidad representa la facilidad con la que el concreto puede mezclarse, transportarse, colocarse y compactarse sin perder homogeneidad. Los resultados obtenidos durante el programa experimental evidenciaron que la incorporación de poliacrilato de sodio produjo variaciones en la consistencia de las mezclas en función de la dosificación utilizada.

En las mezclas con bajas concentraciones de polímero, la reducción de trabajabilidad fue relativamente moderada, manteniéndose dentro de rangos adecuados para aplicaciones en pavimentos rígidos. Sin embargo, a medida que aumentó el contenido de poliacrilato de sodio, se observó una disminución progresiva de la fluidez debido a la absorción parcial del agua disponible durante el mezclado. Este comportamiento coincide con el mecanismo de funcionamiento del polímero, el cual almacena temporalmente parte del agua incorporada a la mezcla.

A pesar de esta reducción inicial en la consistencia, las mezclas conservaron una adecuada cohesión y no presentaron dificultades significativas durante las operaciones de moldeado y compactación. Esto indica que el poliacrilato de sodio modificó la disponibilidad de agua libre sin comprometer la estabilidad general del concreto fresco.

Consistencia del concreto

La consistencia constituye una propiedad directamente relacionada con la movilidad y deformabilidad de la mezcla. Los resultados experimentales mostraron que el incremento de la dosificación de poliacrilato de sodio estuvo acompañado por una ligera disminución de la consistencia respecto al concreto patrón.

Este comportamiento puede explicarse por la capacidad del polímero para absorber una parte del agua de mezclado durante las etapas iniciales de preparación del concreto. Como consecuencia, la cantidad de agua libre disponible para lubricar las partículas sólidas disminuye temporalmente, generando mezclas ligeramente más firmes en comparación con el concreto convencional.

No obstante, los niveles de consistencia observados permanecieron dentro de valores aceptables para pavimentos rígidos, permitiendo una adecuada colocación y conformación de los especímenes elaborados durante el programa experimental.

Cohesión y estabilidad de la mezcla

Otro aspecto relevante observado durante la evaluación del concreto fresco fue el comportamiento cohesivo de las mezclas modificadas. Los resultados evidenciaron que la incorporación de poliacrilato de sodio contribuyó a mantener una distribución uniforme de los componentes, reduciendo la tendencia a la segregación de agregados durante el proceso de manipulación.

La mayor retención de agua generada por el polímero favoreció una distribución más homogénea de la humedad dentro de la mezcla, contribuyendo a mejorar su estabilidad. Esta característica resulta particularmente beneficiosa en aplicaciones de pavimentos rígidos, donde la uniformidad del concreto constituye un requisito esencial para garantizar un comportamiento estructural adecuado.

Asimismo, no se observaron fenómenos significativos de separación de materiales ni acumulaciones excesivas de agua superficial durante las etapas de preparación y colocación, lo que indica que la incorporación del polímero no afectó negativamente la estabilidad de las mezclas evaluadas.

Exudación del concreto fresco

La exudación representa uno de los fenómenos más estrechamente relacionados con la fisuración por contracción plástica. Durante el desarrollo experimental se observó que las mezclas modificadas con poliacrilato de sodio presentaron una reducción progresiva de la exudación superficial en comparación con el concreto patrón.

Este comportamiento se encuentra directamente asociado a la capacidad absorbente del polímero, que retiene parte del agua normalmente disponible para migrar hacia la superficie. Como consecuencia, la cantidad de agua exudada disminuye y la mezcla presenta una distribución más uniforme de humedad durante las primeras etapas de endurecimiento.

La reducción de la exudación adquiere especial relevancia dentro del contexto de la investigación debido a que está estrechamente relacionada con los mecanismos que posteriormente influyen sobre la fisuración por contracción plástica y el desarrollo de las propiedades mecánicas del concreto.

Evaluación general del comportamiento en estado fresco

Los resultados obtenidos permiten afirmar que la incorporación de poliacrilato de sodio produjo modificaciones observables en las propiedades del concreto fresco, principalmente relacionadas con la reducción de la trabajabilidad, la disminución de la exudación y el incremento de la cohesión de la mezcla. Estas variaciones estuvieron directamente asociadas a la capacidad del polímero para absorber agua durante las etapas iniciales del proceso de mezclado.

A pesar de los cambios observados, todas las mezclas mantuvieron condiciones adecuadas para su utilización en pavimentos rígidos, sin presentar problemas significativos de segregación, pérdida de estabilidad o dificultades de colocación. Este comportamiento confirma que el poliacrilato de sodio puede incorporarse al concreto sin afectar de manera crítica sus propiedades constructivas, permitiendo además generar condiciones favorables para el control de la humedad interna durante las etapas posteriores de endurecimiento.

Los resultados obtenidos en estado fresco constituyen un antecedente importante para interpretar el comportamiento observado en las propiedades mecánicas y en la reducción de la fisuración por contracción plástica, aspectos que serán desarrollados en las secciones siguientes.

3.4.2. Fisuración por contracción plástica

La fisuración por contracción plástica constituyó una de las variables principales evaluadas en la presente investigación debido a su estrecha relación con la durabilidad y el desempeño inicial de los pavimentos rígidos. Este fenómeno ocurre durante las primeras horas posteriores al vaciado del concreto y se encuentra asociado al desequilibrio entre la velocidad de evaporación superficial y la capacidad de reposición interna de agua. Cuando las pérdidas de humedad superan la disponibilidad de agua dentro de la mezcla, se generan tensiones de tracción que pueden dar origen a fisuras tempranas antes de que el material desarrolle suficiente resistencia para soportarlas.

El análisis experimental permitió comparar el comportamiento del concreto patrón con el de las mezclas modificadas mediante diferentes dosificaciones de poliacrilato de sodio. Los resultados obtenidos evidenciaron que la incorporación del polímero superabsorbente influyó significativamente sobre la formación y desarrollo de fisuras durante las primeras etapas de endurecimiento, confirmando su capacidad para modificar las condiciones internas de humedad del sistema cementicio.

Comportamiento del concreto patrón

La mezcla de control, elaborada sin incorporación de poliacrilato de sodio, presentó el comportamiento típico observado en concretos convencionales sometidos a procesos de evaporación durante sus primeras horas de endurecimiento. Bajo las condiciones establecidas para el ensayo, se observaron fisuras superficiales asociadas a la pérdida acelerada de humedad y a la contracción diferencial entre las capas superficiales y el interior de la mezcla.

La aparición de estas fisuras confirmó la susceptibilidad natural del concreto convencional frente a procesos de contracción plástica cuando no existen mecanismos internos capaces de compensar las pérdidas de agua generadas por la evaporación. Este

comportamiento sirvió como referencia para evaluar el efecto de los tratamientos experimentales incorporados durante la investigación.

Efecto de la incorporación de poliacrilato de sodio

Las mezclas modificadas con poliacrilato de sodio mostraron una reducción progresiva en la formación de fisuras en comparación con el concreto patrón. A medida que aumentó la presencia del polímero dentro de la mezcla, se observó una disminución en la cantidad, longitud y severidad de las fisuras desarrolladas durante el período de evaluación.

Este comportamiento puede explicarse por la capacidad del poliacrilato de sodio para absorber agua durante el mezclado y liberarla posteriormente conforme disminuye la humedad interna del concreto. Gracias a este mecanismo, el polímero actuó como una fuente adicional de agua capaz de compensar parcialmente las pérdidas ocasionadas por la evaporación superficial, reduciendo las tensiones responsables de la fisuración temprana.

Los resultados obtenidos evidenciaron que incluso pequeñas cantidades de poliacrilato de sodio fueron suficientes para generar mejoras apreciables en el comportamiento del concreto frente a la contracción plástica. Sin embargo, las reducciones más significativas se observaron en las mezclas que incorporaron dosificaciones intermedias y elevadas del polímero, donde la capacidad de almacenamiento interno de agua resultó más efectiva para mantener condiciones favorables de humedad durante las primeras horas de endurecimiento.

Influencia sobre la longitud y densidad de fisuras

Uno de los aspectos más relevantes observados durante la evaluación experimental fue la disminución progresiva de la longitud total de fisuras desarrolladas en las mezclas modificadas. Mientras el concreto patrón presentó una red de fisuración más extensa, los tratamientos con poliacrilato de sodio mostraron superficies más uniformes y con menor presencia de discontinuidades visibles.

De manera similar, la densidad de fisuras registró una tendencia decreciente

conforme aumentó la dosificación del polímero. Este comportamiento indica que la disponibilidad adicional de agua proporcionada por el material superabsorbente permitió reducir la magnitud de las deformaciones superficiales y limitar la generación de nuevas fisuras durante el período crítico de endurecimiento.

La reducción simultánea de longitud y densidad de fisuras constituye un indicador favorable desde el punto de vista de la durabilidad, debido a que disminuye la cantidad de vías potenciales para el ingreso de agua y agentes agresivos hacia el interior del concreto.

Relación entre curado interno y control de fisuración

Los resultados obtenidos confirman la importancia del mecanismo de curado interno generado por el poliacrilato de sodio. A diferencia de los métodos tradicionales de curado, que dependen del suministro externo de agua, el polímero proporcionó una reserva interna capaz de liberar humedad de manera gradual conforme avanzaba el proceso de hidratación.

Esta liberación progresiva permitió mantener condiciones más estables dentro de la matriz cementicia y reducir las diferencias de humedad entre la superficie y el interior del concreto. Como consecuencia, disminuyeron las tensiones de tracción asociadas a la contracción plástica y se redujo la probabilidad de formación de fisuras durante las primeras edades.

La efectividad de este mecanismo resulta particularmente relevante para aplicaciones en pavimentos rígidos, donde las amplias superficies expuestas favorecen procesos intensos de evaporación y aumentan el riesgo de deterioro temprano.

Implicancias para la durabilidad del concreto

La reducción de la fisuración observada en las mezclas modificadas posee implicancias directas sobre la durabilidad futura de los pavimentos rígidos. Diversas investigaciones han demostrado que las fisuras tempranas constituyen uno de los principales puntos de ingreso para agentes agresivos responsables del deterioro progresivo de las estructuras.

Al disminuir la cantidad y severidad de las fisuras, el poliacrilato de sodio contribuye indirectamente a mejorar la capacidad del concreto para resistir procesos asociados a la penetración de humedad, sales, dióxido de carbono y otras sustancias potencialmente perjudiciales. Esta condición favorece la preservación de la integridad estructural y contribuye a prolongar la vida útil de la infraestructura.

Asimismo, una menor fisuración inicial reduce la probabilidad de propagación de grietas bajo la acción de cargas repetitivas y variaciones ambientales, aspecto especialmente importante en pavimentos sometidos al tránsito vehicular continuo.

Evaluación general de los resultados

Los resultados obtenidos permiten concluir que la incorporación de poliacrilato de sodio produjo una influencia favorable sobre la fisuración por contracción plástica del concreto. Las mezclas modificadas mostraron una reducción significativa en la formación de fisuras respecto al concreto patrón, evidenciando la capacidad del polímero para actuar como un sistema eficiente de curado interno.

La disminución observada en la longitud, densidad y severidad de las fisuras confirma que el poliacrilato de sodio contribuye a mantener condiciones más estables de humedad durante las primeras etapas de endurecimiento. Este comportamiento valida los fundamentos teóricos desarrollados en capítulos anteriores y demuestra el potencial de los polímeros superabsorbentes como herramienta para mejorar la durabilidad de los pavimentos rígidos.

En conjunto, los resultados obtenidos evidencian que el control de la fisuración por contracción plástica constituye uno de los principales beneficios asociados a la incorporación de poliacrilato de sodio en mezclas de concreto, proporcionando una base sólida para interpretar posteriormente los efectos observados sobre las propiedades mecánicas del material.

3.4.3. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión constituye uno de los parámetros más importantes para evaluar la calidad y capacidad estructural del concreto. Esta propiedad refleja la capacidad del material para soportar esfuerzos compresivos antes de alcanzar la falla y

es ampliamente utilizada como indicador del desempeño mecánico en aplicaciones de ingeniería civil. En el caso de los pavimentos rígidos, aunque las losas trabajan principalmente sometidas a esfuerzos de flexión, la resistencia a la compresión continúa siendo un criterio fundamental para verificar la calidad del concreto y estimar su comportamiento general frente a condiciones de servicio.

En la presente investigación, la evaluación de la resistencia a la compresión tuvo como finalidad determinar la influencia de la incorporación de poliacrilato de sodio sobre el desarrollo resistente del concreto. Los ensayos realizados permitieron comparar el comportamiento de las mezclas modificadas con el concreto patrón y analizar los efectos generados por las diferentes dosificaciones del polímero superabsorbente.

Comportamiento general de las mezclas

Los resultados obtenidos evidenciaron que la incorporación de poliacrilato de sodio influyó sobre el desarrollo de la resistencia a la compresión del concreto. En términos generales, las mezclas modificadas mostraron un comportamiento favorable respecto al concreto convencional, registrándose variaciones asociadas a la capacidad del polímero para intervenir en los procesos de hidratación y control de humedad interna.

Durante las primeras edades de evaluación, algunas mezclas presentaron incrementos moderados en la resistencia respecto al concreto patrón, mientras que otras mantuvieron valores similares. Sin embargo, a medida que avanzó el proceso de curado, se observó una tendencia más marcada hacia el mejoramiento del desempeño resistente en los tratamientos que incorporaron dosificaciones adecuadas de poliacrilato de sodio.

Este comportamiento sugiere que los beneficios asociados al polímero no se limitan únicamente a las primeras etapas de endurecimiento, sino que continúan manifestándose durante el desarrollo progresivo de la microestructura cementicia.

Influencia del curado interno sobre la resistencia

Uno de los principales mecanismos responsables de las mejoras observadas está relacionado con el efecto de curado interno proporcionado por el poliacrilato de sodio.

Durante el mezclado, las partículas del polímero absorbieron una parte del agua disponible y posteriormente la liberaron gradualmente conforme disminuía la humedad interna del concreto.

Este proceso permitió mantener condiciones más favorables para la hidratación continua del cemento, reduciendo las limitaciones asociadas a la pérdida prematura de agua. Como consecuencia, se favoreció la formación de productos de hidratación adicionales y se promovió el desarrollo de una matriz cementicia más compacta y resistente.

La disponibilidad continua de agua durante las primeras etapas de endurecimiento constituye un factor especialmente importante en concretos destinados a pavimentos rígidos, debido a que contribuye al desarrollo uniforme de las propiedades mecánicas y reduce la probabilidad de defectos internos asociados a una hidratación incompleta.

Desarrollo microestructural y ganancia de resistencia

Los resultados obtenidos sugieren que la incorporación de poliacrilato de sodio favoreció el desarrollo de una microestructura más homogénea dentro del concreto. La liberación gradual de agua permitió prolongar las reacciones de hidratación y mejorar la formación de compuestos cementicios responsables de la resistencia mecánica.

Este fenómeno contribuyó a reducir la presencia de vacíos capilares generados por la pérdida temprana de humedad y favoreció una mayor densificación de la matriz cementicia. Como consecuencia, las mezclas modificadas desarrollaron una capacidad superior para resistir esfuerzos compresivos en comparación con el concreto patrón.

Asimismo, la reducción de la fisuración temprana observada en las mezclas modificadas pudo contribuir indirectamente a mejorar la resistencia, debido a que una menor presencia de microfisuras permite una distribución más uniforme de los esfuerzos internos y reduce los puntos de concentración de tensiones dentro del material.

Influencia de la dosificación del polímero

El comportamiento observado durante la investigación evidenció que la magnitud de las mejoras en resistencia estuvo relacionada con la dosificación de poliacrilato de sodio incorporada a la mezcla. Las dosificaciones moderadas mostraron los resultados más favorables, debido a que proporcionaron suficiente capacidad de almacenamiento de agua sin alterar significativamente el equilibrio interno del sistema cementicio.

Por el contrario, dosificaciones excesivamente elevadas pueden generar efectos menos favorables debido a la formación de espacios adicionales después de la liberación del agua absorbida por el polímero. Aunque estos efectos no anulan completamente los beneficios del curado interno, pueden limitar parcialmente las ganancias de resistencia cuando la cantidad de material incorporado supera determinados niveles.

Este comportamiento coincide con las tendencias reportadas por investigaciones internacionales relacionadas con polímeros superabsorbentes, las cuales señalan la existencia de dosificaciones óptimas capaces de maximizar los beneficios asociados al curado interno y al desarrollo resistente.

Comparación con el concreto patrón

Al comparar los resultados de las mezclas modificadas con los obtenidos para el concreto convencional, se observó una mejora general en el desempeño mecánico de los tratamientos que incorporaron poliacrilato de sodio. Estas diferencias resultaron más evidentes en edades avanzadas de curado, momento en el cual los efectos acumulativos del curado interno comenzaron a reflejarse de manera más clara en la resistencia final del material.

La mezcla patrón presentó el comportamiento esperado para un concreto convencional, desarrollando resistencia mediante los mecanismos tradicionales de hidratación. Sin embargo, las mezclas modificadas mostraron una evolución más favorable debido a la disponibilidad adicional de agua proporcionada por el polímero, condición que permitió prolongar y optimizar las reacciones cementicias.

Los resultados indican que la incorporación de poliacrilato de sodio no solo contribuye a controlar la fisuración temprana, sino que también puede favorecer el

desarrollo resistente del concreto cuando se emplea en cantidades adecuadas.

Implicancias para pavimentos rígidos

Las mejoras observadas en la resistencia a la compresión poseen una importancia significativa para aplicaciones en pavimentos rígidos. Un concreto con mayor capacidad resistente presenta mejores condiciones para soportar las cargas transmitidas por el tránsito vehicular y para conservar sus propiedades mecánicas durante períodos prolongados de servicio.

Asimismo, una mayor resistencia suele estar asociada a una reducción de la permeabilidad y a una mejor calidad microestructural, factores que contribuyen positivamente a la durabilidad de la infraestructura. Desde esta perspectiva, el empleo de poliacrilato de sodio puede representar una estrategia complementaria para mejorar simultáneamente el comportamiento mecánico y la vida útil de los pavimentos de concreto.

La combinación entre menor fisuración temprana y mayor resistencia mecánica constituye una ventaja relevante debido a que ambos aspectos intervienen directamente en el desempeño estructural y funcional de la infraestructura vial.

Evaluación general de los resultados

Los resultados obtenidos permiten concluir que el poliacrilato de sodio ejerció una influencia favorable sobre la resistencia a la compresión del concreto. Las mezclas modificadas mostraron una tendencia general hacia el incremento de la capacidad resistente respecto al concreto patrón, especialmente cuando se utilizaron dosificaciones adecuadas del polímero.

Las mejoras observadas estuvieron asociadas principalmente al efecto de curado interno generado por la liberación gradual de agua almacenada dentro de la matriz cementicia. Este mecanismo favoreció una hidratación más completa del cemento, contribuyó a la densificación de la microestructura y permitió optimizar el desarrollo de resistencia durante el proceso de endurecimiento.

En conjunto, los resultados confirman que la incorporación de poliacrilato de

sodio no solo contribuye al control de la fisuración por contracción plástica, sino que también puede mejorar el desempeño mecánico del concreto, consolidándose como una alternativa tecnológica con potencial para el desarrollo de pavimentos rígidos de alta durabilidad.

3.4.4. Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión constituye una de las propiedades mecánicas más importantes para la evaluación del concreto utilizado en pavimentos rígidos, debido a que estos sistemas estructurales trabajan principalmente sometidos a esfuerzos flexionantes generados por las cargas vehiculares. A diferencia de la resistencia a la compresión, que mide la capacidad del material para soportar cargas compresivas, la resistencia a la flexión permite determinar el comportamiento del concreto frente a esfuerzos combinados de compresión y tracción, reproduciendo de manera más representativa las condiciones reales de servicio que experimentan las losas de pavimento.

En la presente investigación, la evaluación de la resistencia a la flexión tuvo como objetivo analizar la influencia del poliacrilato de sodio sobre la capacidad del concreto para resistir esfuerzos flexionantes. Los resultados obtenidos permitieron establecer comparaciones entre el concreto patrón y las mezclas modificadas, identificando los efectos generados por las distintas dosificaciones del polímero superabsorbente sobre esta propiedad mecánica fundamental.

Comportamiento general de las mezclas

Los ensayos realizados evidenciaron que la incorporación de poliacrilato de sodio produjo variaciones favorables en la resistencia a la flexión del concreto. En términos generales, las mezclas modificadas mostraron una tendencia hacia el incremento de esta propiedad respecto al concreto convencional, observándose diferencias más notorias en aquellas dosificaciones que lograron optimizar el equilibrio entre absorción de agua, curado interno y desarrollo microestructural.

Los resultados demostraron que la mejora en la resistencia a la flexión estuvo estrechamente relacionada con los efectos del polímero sobre el proceso de hidratación

del cemento y sobre la reducción de fisuras tempranas dentro de la matriz cementicia. Esta combinación de factores favoreció una respuesta mecánica más eficiente frente a los esfuerzos de tracción generados durante los ensayos.

Asimismo, las mezclas modificadas presentaron un comportamiento más uniforme durante la aplicación de las cargas, evidenciando una mejor distribución de tensiones dentro de la estructura interna del concreto.

Influencia del curado interno en la resistencia a la flexión

Uno de los aspectos más relevantes observados durante la investigación fue la contribución del curado interno proporcionado por el poliacrilato de sodio al desarrollo de la resistencia a la flexión. La liberación gradual de agua almacenada por el polímero permitió mantener condiciones favorables para la hidratación del cemento durante períodos prolongados, favoreciendo la formación continua de productos cementicios responsables de la cohesión interna del material.

Esta hidratación más completa contribuyó a mejorar la calidad de la zona de transición interfacial entre la pasta de cemento y los agregados, considerada uno de los sectores más críticos para la resistencia a la flexión. Una mejor adherencia entre estos componentes favorece una transmisión más eficiente de los esfuerzos internos y reduce la probabilidad de iniciación de fisuras bajo cargas flexionantes.

Como consecuencia, las mezclas modificadas desarrollaron una mayor capacidad para resistir esfuerzos de tracción indirecta, reflejándose en incrementos de la resistencia a la flexión respecto al concreto patrón.

Relación entre fisuración temprana y desempeño flexional

Los resultados obtenidos también evidenciaron una estrecha relación entre la reducción de la fisuración por contracción plástica y el comportamiento a flexión del concreto. Las mezclas que presentaron menores niveles de fisuración durante las primeras edades mostraron posteriormente un mejor desempeño durante los ensayos mecánicos.

Esta relación puede explicarse debido a que las microfisuras generadas durante

las etapas iniciales de endurecimiento actúan como puntos de concentración de tensiones que favorecen la propagación de grietas cuando el concreto es sometido a cargas. Al reducir la formación de estas discontinuidades, el poliacrilato de sodio contribuyó indirectamente a mejorar la capacidad resistente del material frente a esfuerzos flexionantes.

La disminución de defectos internos permitió que las tensiones fueran distribuidas de manera más uniforme dentro de la matriz cementicia, incrementando la capacidad del concreto para soportar cargas antes de alcanzar la falla.

Influencia de la dosificación del poliacrilato de sodio

El comportamiento experimental mostró que la magnitud de las mejoras observadas estuvo condicionada por la cantidad de poliacrilato de sodio incorporada a la mezcla. Las dosificaciones moderadas produjeron los resultados más favorables debido a que lograron maximizar los beneficios asociados al curado interno sin generar alteraciones significativas en la estructura del concreto.

En estos tratamientos, la disponibilidad adicional de agua favoreció una hidratación más eficiente y permitió el desarrollo de una microestructura más homogénea. Como resultado, se obtuvieron incrementos apreciables en la resistencia a la flexión respecto al concreto convencional.

Por otra parte, cuando las dosificaciones se aproximaron a niveles elevados, las mejoras tendieron a estabilizarse, evidenciando que la eficiencia del polímero depende de un equilibrio adecuado entre capacidad de absorción, liberación de agua y desarrollo microestructural.

Este comportamiento confirma la importancia de establecer dosificaciones óptimas que permitan aprovechar al máximo los beneficios del poliacrilato de sodio sin afectar negativamente otras propiedades del concreto.

Comparación con el concreto convencional

La comparación entre las mezclas modificadas y el concreto patrón mostró una tendencia consistente hacia la mejora del comportamiento flexional en los tratamientos

que incorporaron el polímero superabsorbente. Mientras la mezcla convencional desarrolló la resistencia esperada para un concreto de pavimento rígido, las mezclas modificadas presentaron una mayor capacidad para soportar esfuerzos antes de la aparición de la falla.

Estas diferencias reflejan el efecto positivo generado por el curado interno sobre la calidad de la matriz cementicia y sobre la reducción de fisuras tempranas. Además, evidencian que el poliacrilato de sodio puede contribuir al fortalecimiento de propiedades directamente relacionadas con el desempeño estructural de los pavimentos.

Los resultados obtenidos coinciden con tendencias reportadas en investigaciones internacionales relacionadas con polímeros superabsorbentes, donde se ha observado que el mejoramiento de la hidratación interna puede traducirse en incrementos significativos de la resistencia a la flexión.

Implicancias para el desempeño de pavimentos rígidos

La resistencia a la flexión representa uno de los principales parámetros utilizados en el diseño estructural de pavimentos rígidos debido a que las losas se encuentran sometidas permanentemente a esfuerzos flexionantes generados por el tránsito vehicular. En este contexto, cualquier incremento en esta propiedad puede traducirse en mejoras significativas en la capacidad estructural y durabilidad de la infraestructura.

Los resultados obtenidos sugieren que la incorporación de poliacrilato de sodio puede contribuir a incrementar la capacidad de las losas para resistir las tensiones inducidas por las cargas de servicio, reduciendo la probabilidad de aparición de grietas estructurales y prolongando la vida útil del pavimento.

Asimismo, una mayor resistencia a la flexión favorece una distribución más eficiente de esfuerzos y mejora la respuesta del sistema frente a cargas repetitivas, aspecto fundamental en carreteras y vías sometidas a elevados volúmenes de tránsito.

Evaluación general de los resultados

Los resultados experimentales permiten concluir que el poliacrilato de sodio

ejerció una influencia favorable sobre la resistencia a la flexión del concreto. Las mezclas modificadas mostraron una tendencia general hacia el incremento de esta propiedad respecto al concreto patrón, evidenciando la capacidad del polímero para mejorar el comportamiento mecánico del material.

Las mejoras observadas estuvieron asociadas principalmente al efecto de curado interno, al fortalecimiento de la microestructura cementicia y a la reducción de fisuras tempranas que normalmente afectan el desempeño del concreto durante sus primeras edades. Estos mecanismos permitieron desarrollar una matriz más homogénea y resistente frente a esfuerzos de tracción indirecta.

En conjunto, los resultados confirman que la incorporación de poliacrilato de sodio no solo contribuye al control de la fisuración por contracción plástica y al incremento de la resistencia a la compresión, sino que también favorece el desarrollo de una mayor resistencia a la flexión, propiedad esencial para el diseño y construcción de pavimentos rígidos de alta durabilidad.

3.4.5. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad constituye una de las propiedades mecánicas más importantes para evaluar el comportamiento estructural del concreto, debido a que permite determinar su rigidez y capacidad para deformarse bajo la acción de cargas externas. Esta propiedad expresa la relación existente entre los esfuerzos aplicados y las deformaciones producidas dentro del rango elástico del material, proporcionando información fundamental sobre la respuesta estructural del concreto frente a condiciones reales de servicio.

En pavimentos rígidos, el módulo de elasticidad adquiere una importancia particular debido a que influye directamente sobre la distribución de cargas, la magnitud de las deformaciones, la transferencia de esfuerzos hacia las capas inferiores y el comportamiento global de la estructura. Un concreto con una rigidez adecuada puede distribuir de manera más eficiente las cargas vehiculares, reduciendo las tensiones concentradas y mejorando el desempeño a largo plazo del pavimento.

La presente investigación evaluó la influencia del poliacrilato de sodio sobre el

módulo de elasticidad del concreto, con el propósito de determinar si los beneficios asociados al curado interno y a la mejora de la microestructura también se reflejan en la capacidad del material para resistir deformaciones. Los resultados obtenidos permitieron comparar el comportamiento de las mezclas modificadas respecto al concreto patrón y analizar la relación existente entre la incorporación del polímero y la rigidez del sistema cementicio.

Comportamiento general de las mezclas

Los resultados experimentales evidenciaron que las mezclas modificadas con poliacrilato de sodio presentaron variaciones favorables en el módulo de elasticidad respecto al concreto convencional. En términos generales, se observó una tendencia hacia el incremento de la rigidez del material conforme las mezclas desarrollaban una microestructura más compacta y homogénea gracias a la acción del polímero superabsorbente.

Este comportamiento estuvo estrechamente relacionado con los efectos del curado interno sobre el proceso de hidratación del cemento. La disponibilidad adicional de agua permitió prolongar las reacciones químicas responsables de la formación de productos cementicios, favoreciendo el desarrollo de una estructura interna más densa y resistente a las deformaciones.

Las mezclas modificadas mostraron una respuesta mecánica más estable frente a la aplicación de cargas, evidenciando una mejor capacidad para limitar las deformaciones dentro del rango elástico en comparación con el concreto patrón.

Influencia del curado interno sobre la rigidez del concreto

El principal mecanismo responsable de las mejoras observadas estuvo asociado al efecto de curado interno proporcionado por el poliacrilato de sodio. Durante las etapas iniciales de endurecimiento, el polímero liberó progresivamente el agua previamente absorbida, permitiendo mantener condiciones favorables para el desarrollo continuo de las reacciones de hidratación.

Este proceso favoreció la formación de mayores cantidades de gel de silicato de

calcio hidratado (C-S-H), principal componente responsable de la resistencia y rigidez del concreto. Como consecuencia, las mezclas modificadas desarrollaron una estructura interna más compacta y con menor presencia de vacíos capilares, características que contribuyen directamente al incremento del módulo de elasticidad.

La mejora en la calidad de la matriz cementicia permitió que el concreto presentara una mayor resistencia frente a deformaciones inducidas por cargas externas, aspecto especialmente importante en estructuras sometidas a sollicitaciones repetitivas como los pavimentos rígidos.

Relación entre resistencia mecánica y módulo de elasticidad

Los resultados obtenidos evidenciaron una relación coherente entre el comportamiento observado en la resistencia a la compresión y las variaciones registradas en el módulo de elasticidad. Las mezclas que desarrollaron mayores niveles de resistencia mecánica fueron también las que presentaron incrementos más significativos en su rigidez.

Esta tendencia coincide con los principios fundamentales de la mecánica del concreto, según los cuales existe una correlación directa entre la densificación de la microestructura, el desarrollo resistente y el incremento del módulo de elasticidad. A medida que la matriz cementicia se vuelve más compacta y homogénea, aumenta simultáneamente su capacidad para soportar esfuerzos y limitar deformaciones.

La acción del poliacrilato de sodio contribuyó a fortalecer esta relación al promover condiciones más favorables para la hidratación y reducir la presencia de defectos internos que normalmente afectan el comportamiento estructural del concreto.

Influencia de la reducción de fisuras sobre el módulo de elasticidad

Otro aspecto relevante observado durante el análisis fue la influencia indirecta de la reducción de la fisuración por contracción plástica sobre la rigidez del concreto. Las mezclas que presentaron menores niveles de fisuración temprana desarrollaron una estructura interna más continua y uniforme, condición que favoreció una distribución más eficiente de los esfuerzos aplicados durante los ensayos.

Las fisuras y microfisuras constituyen zonas de debilidad que interrumpen la continuidad de la matriz cementicia y reducen la capacidad del material para resistir deformaciones. Al disminuir la formación de estas discontinuidades, el poliacrilato de sodio contribuyó indirectamente a mejorar la respuesta elástica del concreto y a incrementar su capacidad para mantener la estabilidad estructural frente a cargas externas.

Este comportamiento refuerza la importancia del control de la fisuración temprana como estrategia para mejorar no solo la durabilidad, sino también el desempeño mecánico global del concreto.

Efecto de la dosificación del polímero

La magnitud de las variaciones observadas en el módulo de elasticidad estuvo asociada a la dosificación de poliacrilato de sodio incorporada a cada mezcla. Las dosificaciones moderadas mostraron el comportamiento más favorable debido a que permitieron optimizar los beneficios del curado interno sin generar alteraciones significativas en la estructura física del concreto.

En estos tratamientos, la combinación entre adecuada disponibilidad de agua y desarrollo eficiente de la hidratación produjo incrementos apreciables en la rigidez del material. Por el contrario, dosificaciones excesivamente elevadas tendieron a mostrar mejoras menos pronunciadas debido a que la formación de espacios residuales asociados a la liberación de agua puede limitar parcialmente los beneficios obtenidos.

Este comportamiento confirma la necesidad de establecer proporciones óptimas que permitan maximizar el potencial del polímero superabsorbente y obtener el mejor equilibrio entre resistencia, rigidez y durabilidad.

Implicancias para pavimentos rígidos

Desde la perspectiva de la ingeniería vial, los incrementos observados en el módulo de elasticidad poseen implicancias importantes para el desempeño estructural de los pavimentos rígidos. Una mayor rigidez permite que las losas distribuyan las cargas vehiculares de manera más eficiente, reduciendo las deformaciones y disminuyendo las

tensiones transmitidas hacia las capas inferiores de soporte.

Esta condición contribuye a mejorar la estabilidad estructural del pavimento y favorece una respuesta más uniforme frente a las solicitaciones repetitivas generadas por el tránsito. Asimismo, un concreto con un módulo de elasticidad adecuado presenta menores probabilidades de desarrollar deformaciones excesivas que puedan afectar la funcionalidad y seguridad de la infraestructura.

La mejora simultánea de la resistencia mecánica y de la rigidez representa una ventaja significativa para aplicaciones en pavimentos de alta durabilidad, donde el comportamiento estructural a largo plazo constituye uno de los principales criterios de diseño.

Evaluación general de los resultados

Los resultados obtenidos permiten concluir que la incorporación de poliacrilato de sodio produjo una influencia positiva sobre el módulo de elasticidad del concreto. Las mezclas modificadas mostraron una tendencia general hacia el incremento de la rigidez respecto al concreto patrón, evidenciando los beneficios derivados del curado interno y de la mejora microestructural generada por el polímero.

Las variaciones observadas estuvieron asociadas principalmente a una hidratación más eficiente del cemento, a la reducción de vacíos internos y a la disminución de la fisuración temprana. Estos factores contribuyeron conjuntamente al desarrollo de una matriz cementicia más compacta, homogénea y resistente frente a deformaciones.

En conjunto, los resultados confirman que el poliacrilato de sodio puede contribuir favorablemente al comportamiento elástico del concreto, complementando los beneficios observados en la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión y el control de la fisuración por contracción plástica. Estos hallazgos fortalecen la viabilidad de su utilización como material innovador para la producción de pavimentos rígidos de alta durabilidad y desempeño estructural.

3.5. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos durante el desarrollo experimental permitieron evaluar de manera integral la influencia del poliacrilato de sodio sobre el comportamiento del concreto destinado a pavimentos rígidos. El análisis conjunto de las propiedades en estado fresco, la fisuración por contracción plástica y las propiedades mecánicas evidenció que la incorporación de este polímero superabsorbente produjo modificaciones significativas en el desempeño del material, confirmando gran parte de los planteamientos teóricos desarrollados en los capítulos anteriores.

Uno de los hallazgos más relevantes de la investigación estuvo relacionado con la reducción de la fisuración por contracción plástica observada en las mezclas modificadas. Los resultados demostraron que el poliacrilato de sodio contribuyó a disminuir la formación de fisuras durante las primeras horas de endurecimiento, situación que puede atribuirse a su capacidad para absorber agua durante el mezclado y liberarla gradualmente conforme disminuye la humedad interna del concreto. Este comportamiento coincide con los principios del curado interno descritos por Jensen y Hansen, quienes sostienen que los polímeros superabsorbentes actúan como reservorios internos capaces de compensar parcialmente la pérdida de humedad producida por la evaporación y por el consumo de agua asociado a la hidratación del cemento.

La disminución de la fisuración observada en la presente investigación también guarda relación con los resultados reportados en diversos estudios internacionales sobre materiales superabsorbentes aplicados a sistemas cementicios. Estas investigaciones han señalado que la disponibilidad adicional de agua durante las primeras edades contribuye a reducir las tensiones generadas por la contracción plástica y limita la aparición de discontinuidades superficiales. En este sentido, los resultados obtenidos refuerzan la evidencia científica existente y confirman la efectividad del poliacrilato de sodio como herramienta para el control de fisuras tempranas en concretos destinados a infraestructura vial.

Otro aspecto importante identificado durante la investigación fue la influencia del polímero sobre las propiedades mecánicas del concreto. Los resultados mostraron una tendencia favorable en la resistencia a la compresión de las mezclas modificadas

respecto al concreto patrón. Este comportamiento puede explicarse por la mejora de las condiciones de hidratación generadas por el curado interno, lo que favoreció la formación continua de productos cementicios responsables del desarrollo resistente. La disponibilidad prolongada de agua permitió una hidratación más eficiente del cemento y contribuyó a la densificación de la matriz cementicia.

Estos hallazgos coinciden con investigaciones recientes que señalan que los polímeros superabsorbentes pueden mejorar el desempeño mecánico cuando son utilizados en dosificaciones adecuadas. Diversos autores han demostrado que una hidratación más completa favorece el desarrollo de una microestructura más compacta, reduce la presencia de vacíos asociados a la pérdida prematura de humedad y mejora la calidad de la zona de transición entre la pasta de cemento y los agregados. Los resultados observados en el presente estudio respaldan estas afirmaciones y sugieren que el poliacrilato de sodio puede contribuir al fortalecimiento estructural del concreto cuando su incorporación se realiza bajo criterios técnicos apropiados.

La resistencia a la flexión presentó igualmente una evolución favorable en las mezclas modificadas. Este resultado adquiere una importancia particular debido a que dicha propiedad constituye uno de los principales parámetros considerados en el diseño de pavimentos rígidos. La mejora observada puede atribuirse a la combinación de varios factores, entre ellos la reducción de fisuras tempranas, la mejora de la hidratación interna y el fortalecimiento de la microestructura cementicia. La disminución de defectos internos favoreció una distribución más uniforme de las tensiones y permitió que el concreto desarrollara una mayor capacidad para resistir esfuerzos de tracción indirecta.

La relación observada entre la reducción de la fisuración y el incremento de la resistencia a la flexión resulta especialmente significativa. Las fisuras tempranas suelen actuar como puntos de concentración de esfuerzos que facilitan la propagación de grietas cuando el material es sometido a cargas. Al limitar la formación de estas discontinuidades, el poliacrilato de sodio contribuyó indirectamente a mejorar el comportamiento flexional del concreto, fortaleciendo su capacidad para soportar las condiciones de servicio propias de los pavimentos rígidos.

De manera similar, el módulo de elasticidad mostró una tendencia positiva en los tratamientos que incorporaron el polímero superabsorbente. Este comportamiento refleja una mejora en la rigidez del material y evidencia que la acción del poliacrilato de sodio no se limita únicamente al control de humedad, sino que también influye sobre el desarrollo estructural de la matriz cementicia. La formación de una microestructura más homogénea y la reducción de vacíos internos permitieron obtener concretos con una mayor capacidad para resistir deformaciones bajo carga.

La mejora simultánea de la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad sugiere que el efecto del poliacrilato de sodio trasciende la simple reducción de fisuras superficiales. Los resultados indican que el polímero participa activamente en los procesos de desarrollo microestructural del concreto, favoreciendo condiciones más eficientes para la hidratación y contribuyendo a la formación de una estructura interna más resistente y estable.

En cuanto a las propiedades del concreto en estado fresco, los resultados evidenciaron una disminución moderada de la trabajabilidad conforme aumentó la dosificación del polímero. Este comportamiento era previsible debido a la elevada capacidad de absorción de agua característica del poliacrilato de sodio. Sin embargo, las mezclas mantuvieron niveles adecuados de cohesión y estabilidad, permitiendo su utilización en aplicaciones de pavimentos rígidos sin presentar problemas significativos de segregación o pérdida de homogeneidad.

Este hallazgo coincide con estudios previos que han señalado que los polímeros superabsorbentes modifican la disponibilidad de agua libre durante las etapas iniciales del mezclado. Aunque esta característica puede reducir parcialmente la fluidez de la mezcla, también contribuye a mejorar la distribución interna de humedad y a reducir fenómenos como la exudación excesiva, condición que fue observada durante el desarrollo experimental.

Un aspecto particularmente relevante de la investigación corresponde a la identificación de una relación directa entre el control de humedad y el desempeño mecánico del concreto. Los resultados muestran que las mezclas con menores niveles de fisuración fueron también aquellas que desarrollaron mejores propiedades mecánicas.

Esta relación confirma la importancia de las primeras etapas de endurecimiento sobre el comportamiento futuro del material y evidencia que la prevención de fisuras tempranas constituye una estrategia eficaz para mejorar simultáneamente la resistencia y la durabilidad.

Desde la perspectiva de la ingeniería de pavimentos, los resultados obtenidos poseen implicancias importantes. La reducción de la fisuración por contracción plástica contribuye a disminuir la vulnerabilidad de las losas frente a la penetración de agentes agresivos, mientras que las mejoras observadas en las propiedades mecánicas fortalecen la capacidad estructural del sistema. Esta combinación de beneficios permite proyectar un comportamiento más favorable frente a las exigencias de carga y ambiente a las que se encuentran sometidos los pavimentos rígidos durante su vida útil.

Asimismo, los hallazgos de la investigación respaldan la tendencia actual orientada al desarrollo de concretos de alto desempeño mediante la incorporación de materiales funcionales capaces de intervenir activamente en los procesos de hidratación y control de humedad. El poliacrilato de sodio demostró poseer características que lo convierten en una alternativa técnicamente viable para mejorar la calidad del concreto y contribuir al desarrollo de infraestructuras más durables y sostenibles.

En términos generales, los resultados obtenidos validan la hipótesis de que la incorporación de poliacrilato de sodio ejerce una influencia favorable sobre el comportamiento del concreto para pavimentos rígidos. La reducción de la fisuración por contracción plástica, junto con las mejoras observadas en la resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y módulo de elasticidad, evidencian el potencial de este polímero como herramienta para optimizar simultáneamente la durabilidad y el desempeño estructural del material.

Finalmente, la discusión realizada permite concluir que el poliacrilato de sodio representa una innovación con importantes perspectivas de aplicación dentro de la ingeniería vial. Los beneficios observados durante la investigación sugieren que su utilización puede contribuir significativamente al desarrollo de pavimentos rígidos de alta durabilidad, capaces de ofrecer mayores niveles de servicio, menores requerimientos de mantenimiento y una vida útil más prolongada frente a las crecientes

exigencias de la infraestructura moderna.

El desarrollo del presente capítulo permitió trasladar los fundamentos teóricos abordados en los capítulos anteriores hacia un escenario experimental orientado a evaluar la influencia del poliacrilato de sodio sobre el comportamiento del concreto destinado a pavimentos rígidos. A través de la aplicación de una metodología sistemática y del análisis de diferentes propiedades del material, fue posible generar evidencia que demuestra el potencial de este polímero superabsorbente como alternativa tecnológica para mejorar el desempeño y la durabilidad del concreto.

Los resultados obtenidos evidenciaron que la incorporación de poliacrilato de sodio produjo modificaciones significativas tanto en el comportamiento del concreto fresco como en sus propiedades mecánicas y en su respuesta frente a la fisuración por contracción plástica. En estado fresco, las mezclas mostraron una reducción moderada de la trabajabilidad asociada a la capacidad absorbente del polímero; sin embargo, mantuvieron niveles adecuados de cohesión y estabilidad que permitieron su correcta manipulación y colocación. Este comportamiento confirma que la incorporación del material no compromete las condiciones constructivas necesarias para aplicaciones en pavimentos rígidos.

Uno de los hallazgos más relevantes estuvo relacionado con la reducción de la fisuración por contracción plástica. Las mezclas modificadas presentaron una menor cantidad, longitud y severidad de fisuras en comparación con el concreto convencional, evidenciando la efectividad del mecanismo de curado interno proporcionado por el poliacrilato de sodio. La capacidad del polímero para almacenar y liberar agua de manera gradual permitió mantener condiciones más favorables de humedad durante las primeras horas de endurecimiento, reduciendo las tensiones responsables de la formación de fisuras tempranas.

Asimismo, el análisis de las propiedades mecánicas mostró resultados favorables para las mezclas modificadas. La resistencia a la compresión presentó incrementos asociados a una hidratación más eficiente del cemento y a la formación de una microestructura más compacta. De manera similar, la resistencia a la flexión evidenció mejoras relacionadas con la reducción de defectos internos y con una mejor distribución

de esfuerzos dentro de la matriz cementicia. Estas variaciones resultan especialmente importantes para pavimentos rígidos debido a la estrecha relación que existe entre estas propiedades y el comportamiento estructural de las losas sometidas al tránsito vehicular.

Por otra parte, el módulo de elasticidad mostró una tendencia positiva que refleja una mejora en la rigidez del concreto y una mayor capacidad para resistir deformaciones bajo carga. Este resultado complementa los beneficios observados en las demás propiedades mecánicas y confirma que el efecto del poliacrilato de sodio no se limita únicamente al control de la humedad, sino que también influye sobre el desarrollo estructural del material durante el proceso de endurecimiento.

La discusión de resultados permitió establecer una relación directa entre el control de la humedad interna y la mejora del desempeño mecánico del concreto. Las mezclas que presentaron menores niveles de fisuración fueron también aquellas que desarrollaron mejores propiedades resistentes, demostrando que la prevención de defectos tempranos constituye un factor determinante para la calidad y durabilidad futura de la infraestructura. Esta relación confirma la importancia de intervenir sobre los procesos que ocurren durante las primeras edades del concreto para optimizar su comportamiento a largo plazo.

Los hallazgos obtenidos también permitieron validar los fundamentos teóricos relacionados con los polímeros superabsorbentes y corroborar los mecanismos de curado interno descritos por la literatura científica. La evidencia experimental demuestra que el poliacrilato de sodio puede actuar como una fuente complementaria de agua capaz de mejorar la hidratación del cemento, reducir la fisuración y favorecer el desarrollo de una microestructura más homogénea y resistente.

Desde la perspectiva de la ingeniería vial, los resultados adquieren una relevancia especial debido a que evidencian la posibilidad de desarrollar pavimentos rígidos con mayores niveles de durabilidad y desempeño estructural mediante la incorporación de materiales innovadores. La reducción de fisuras tempranas, combinada con mejoras en la resistencia mecánica y en la rigidez del concreto, contribuye a disminuir la probabilidad de deterioro prematuro y favorece una mayor vida útil de la infraestructura.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten concluir que el poliacrilato de sodio representa una alternativa técnicamente viable para mejorar el comportamiento del concreto destinado a pavimentos rígidos. Su capacidad para actuar simultáneamente sobre la fisuración por contracción plástica y sobre las propiedades mecánicas del material evidencia su potencial como herramienta para la construcción de infraestructuras más resistentes, durables y sostenibles.

De esta manera, el caso de estudio desarrollado en el presente capítulo proporciona una base experimental sólida que respalda la aplicación de polímeros superabsorbentes en tecnología del concreto y confirma que la innovación en materiales constituye un camino fundamental para responder a los desafíos actuales de la ingeniería civil. Los resultados alcanzados permiten proyectar nuevas oportunidades de investigación y aplicación práctica orientadas a optimizar el desempeño de los pavimentos rígidos y contribuir al desarrollo de sistemas constructivos cada vez más eficientes y sostenibles.

REFLEXIONES FINALES

La evolución de la ingeniería civil ha estado marcada por la búsqueda constante de materiales y tecnologías capaces de responder a las crecientes exigencias de la infraestructura moderna. En un contexto donde la durabilidad, la sostenibilidad y la eficiencia constructiva se han convertido en objetivos prioritarios, resulta indispensable explorar alternativas que permitan optimizar el comportamiento de los materiales tradicionales sin comprometer su viabilidad técnica y económica. Dentro de este escenario, el concreto continúa ocupando un lugar central como uno de los materiales más utilizados en la construcción de carreteras, puentes, edificaciones y obras de infraestructura estratégica.

Sin embargo, a pesar de los avances alcanzados durante las últimas décadas, el concreto sigue enfrentando desafíos relacionados con la fisuración temprana, la pérdida prematura de humedad y el deterioro progresivo asociado a las condiciones ambientales y de servicio. Estos fenómenos afectan directamente la durabilidad de las estructuras y generan importantes costos de mantenimiento y rehabilitación. Por ello, la búsqueda de soluciones capaces de intervenir sobre los procesos que ocurren durante las primeras etapas de endurecimiento constituye una de las principales líneas de investigación dentro de la tecnología de materiales.

El presente libro ha permitido analizar una de estas alternativas innovadoras mediante el estudio del poliacrilato de sodio como polímero superabsorbente aplicado a concretos para pavimentos rígidos. A lo largo de la obra se ha demostrado que la capacidad de almacenar y liberar agua de manera controlada representa una característica con importantes implicancias para el comportamiento del concreto. Esta propiedad permite intervenir directamente sobre uno de los factores más críticos del proceso constructivo: la disponibilidad de humedad durante las primeras edades del material.

La revisión teórica desarrollada evidenció que el control de la humedad interna

constituye un elemento determinante para reducir la fisuración por contracción plástica y favorecer el adecuado desarrollo de las propiedades mecánicas. Los antecedentes científicos analizados muestran que los polímeros superabsorbentes han comenzado a consolidarse como una herramienta prometedora para mejorar la calidad del concreto y optimizar los procesos de hidratación. Estos avances reflejan una tendencia global orientada hacia la incorporación de materiales funcionales capaces de aportar beneficios adicionales más allá de las funciones tradicionales de los componentes convencionales.

De igual manera, el estudio permitió comprender que la fisuración por contracción plástica no debe considerarse únicamente como un problema superficial o estético. Las investigaciones revisadas demostraron que las fisuras tempranas pueden convertirse en el punto de partida de procesos de deterioro que afectan la durabilidad y el desempeño estructural de las infraestructuras. Desde esta perspectiva, prevenir la aparición de fisuras durante las primeras horas posteriores al vaciado representa una estrategia de gran valor para prolongar la vida útil de los pavimentos rígidos y reducir los costos asociados a futuras intervenciones de mantenimiento.

La evidencia experimental presentada en el caso de estudio confirmó que el poliacrilato de sodio posee la capacidad de influir favorablemente sobre el comportamiento del concreto. Los resultados mostraron una reducción significativa de la fisuración por contracción plástica y mejoras en propiedades mecánicas fundamentales como la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad. Estos hallazgos permiten afirmar que la incorporación de polímeros superabsorbentes no solo contribuye al control de defectos tempranos, sino que también puede fortalecer el desempeño estructural del material.

Uno de los aspectos más relevantes identificados durante la investigación fue la estrecha relación existente entre el control de humedad, la hidratación del cemento y el desarrollo de las propiedades mecánicas. Esta interacción demuestra que muchos de los problemas asociados al concreto pueden abordarse mediante estrategias orientadas a optimizar las condiciones internas del material durante sus primeras etapas de endurecimiento. En consecuencia, el concepto de curado interno emerge como una herramienta con importantes posibilidades de aplicación en la ingeniería del concreto contemporánea.

Asimismo, los resultados obtenidos permiten reflexionar sobre la importancia de adoptar una visión integral del desempeño de los materiales de construcción. Tradicionalmente, la calidad del concreto ha sido evaluada principalmente a través de parámetros de resistencia mecánica. Sin embargo, los desafíos actuales exigen considerar simultáneamente aspectos relacionados con la durabilidad, la sostenibilidad, la eficiencia constructiva y el comportamiento a largo plazo. Desde esta perspectiva, las tecnologías innovadoras deben ser valoradas no solo por su capacidad para incrementar la resistencia, sino también por su contribución a la conservación y desempeño futuro de las estructuras.

La aplicación de poliacrilato de sodio en concretos para pavimentos rígidos representa un ejemplo de cómo la innovación puede contribuir al desarrollo de soluciones más eficientes para la infraestructura vial. La posibilidad de reducir fisuras tempranas y mejorar propiedades mecánicas mediante un mecanismo relativamente simple abre nuevas oportunidades para optimizar el comportamiento del concreto en condiciones de servicio cada vez más exigentes. Esta situación adquiere especial relevancia en regiones donde las condiciones climáticas favorecen la evaporación acelerada del agua y aumentan el riesgo de deterioro prematuro.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, los beneficios asociados a la reducción de fisuras y al incremento de la durabilidad también poseen implicancias ambientales positivas. Infraestructuras con una vida útil más prolongada requieren menos intervenciones de reparación y reconstrucción, lo que contribuye a disminuir el consumo de materiales, energía y recursos asociados al mantenimiento. En consecuencia, el empleo de tecnologías orientadas a mejorar la durabilidad del concreto puede entenderse también como una estrategia para promover prácticas constructivas más sostenibles y responsables.

No obstante, los resultados alcanzados también evidencian la necesidad de continuar profundizando en el estudio de los polímeros superabsorbentes y su interacción con los sistemas cementicios. Existen aún múltiples aspectos relacionados con dosificaciones óptimas, comportamiento a largo plazo, compatibilidad con otros materiales y aplicaciones específicas que requieren investigación adicional. El conocimiento generado hasta el momento constituye una base sólida, pero al mismo

tiempo abre nuevas interrogantes y oportunidades para futuras investigaciones.

En este sentido, el presente libro no pretende ofrecer una respuesta definitiva sobre el uso de poliacrilato de sodio en concretos para pavimentos rígidos, sino contribuir al fortalecimiento del conocimiento existente y promover una reflexión más amplia sobre el papel de la innovación en la ingeniería de materiales. La experiencia acumulada demuestra que el progreso tecnológico surge precisamente de la capacidad para cuestionar prácticas tradicionales, explorar nuevas alternativas y validar científicamente soluciones que permitan responder a los desafíos emergentes de la infraestructura.

Finalmente, puede afirmarse que el poliacrilato de sodio representa una tecnología con un potencial significativo para contribuir al desarrollo de concretos más resistentes, durables y eficientes. Su capacidad para mejorar las condiciones de hidratación, reducir la fisuración temprana y fortalecer el comportamiento mecánico del material lo posiciona como una alternativa prometedora dentro de la evolución de la tecnología del concreto. Los hallazgos presentados a lo largo de esta obra refuerzan la importancia de continuar impulsando la investigación, la innovación y la transferencia tecnológica como herramientas fundamentales para construir infraestructuras capaces de responder de manera sostenible a las necesidades del presente y del futuro.

En última instancia, el desafío de construir pavimentos más durables no depende únicamente de la incorporación de nuevos materiales, sino de la capacidad de integrar conocimiento científico, innovación tecnológica y criterios de sostenibilidad dentro de una visión integral de la ingeniería. Bajo esta perspectiva, el poliacrilato de sodio no representa solamente un aditivo más dentro de una mezcla de concreto, sino una muestra del potencial que tiene la ciencia aplicada para transformar la manera en que concebimos, diseñamos y construimos las infraestructuras que sostienen el desarrollo de nuestras sociedades.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Manufacturers.best. Poliacrilato de sodio en la industria de la construcción. [En línea] 4 de Mayo de 2022. [Citado el: 18 de Junio de 2023.] <https://www.manufacturers.best/es/poliacrilato-de-sodio-en-la-industria-de-la-construccion/>.

Asocreto. *Colección del concreto: Tecnología del concreto - Tomo 1 Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas.* Colombia : Asocreto, 2010. 978-958-8564-03-6.

Oregon Chem Group. *Ficha Técnica: Poliacrilato de sodio.* Lima : s.n., 2023. *Fisuras por contracción plástica.*

Construcción y Tecnología en Concreto. *Propiedades mecánicas del concreto para viviendas de bajo costo.*

Carrillo, Julián. 2, 2013, Vol. 14. *Estudio del comportamiento mecánico de morteros modificados con fibras de aserrín bajo esfuerzos de compresión.*

Ortega, Andrés y Gil, Harverth. 2019, Ingeniería y Desarrollo, Vol. 37, págs. 20-35.

Faneca, Gerard. *Desarrollo de hormigones conductores con adición de fibras de carbono reciclada.* s.l. : Universidad Politécnica de Catalunya, 2020. *Revisión de la resistencia a la compresión del concreto incorporando variedades de adiciones de fibras.*

Muñoz y Sócrates. 1, s.l. : Revista Cubana de Ingeniería, 2021, Vol. 12. *Análisis esfuerzo-deformación de concreto reforzado con fibras metálicas y polímeros.*

Campoy-Bencomo, Noé, Chávez-Alegria Omar, y otros. 1, s.l. : Ingeniería, Investigación y tecnología, 2021, Vol. XXII. 2594-0732.

Torres, German. *Evaluación de las propiedades físico mecánicas de la mezcla de concreto reforzado con fibras de acero dramix 3D en estructura de pavimento rígido.* Villavicencio : Universidad Santo Tomás, 2021. *Una revisión del comportamiento mecánico del concreto con adición de fibras de acero de neumáticos reciclados.*

Pérez, Sócrates, Carrasco, Jorge y Portocarrero, Jean. 2, s.l. : Ingeniería y Competitividad, 2022, Vol. 24, págs. 1-18. *Fibra para mejorar el desempeño mecánico de elementos estructurales de concreto.*

Tamara, Joaquín, y otros. 1, Lima : Aporte Santiaguino, 2021, Vol. XIV. 2070-836X.

Chávez, Henry. *“Fibra de maguey para reducir la formación de fisuras por contracción plástica en tanques elevados Huancayo-Junín 2020.* Huancayo : Universidad Nacional del Centro del Perú, 2021.

Ccasani, Jean y Eduardo, Carlos. *Evaluación comparativa de las propiedades plásticas y mecánicas del concreto $f'c$ 210 kg/cm² reforzado con microfibras sintéticas de polipropileno de 20 y 30 mm en losas de viviendas expuestas a altas temperaturas en Ucayali.* Lima : Universidad de Ciencias Aplicadas, 2021.

Miranda, Cristian y Rado, Marco. *Propuestas de concretos reforzados con fibras de acero y cemento puzolánico para la construcción de pavimentos rígidos en la región de Apurímac.* Lima : Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, 2019. *Fibras de acero en la resistencia a la compresión del concreto.*

Farfán, Marlon, y otros. 2, 2018, Vol. XX.

Gutiérrez, Libia. *El concreto y otros materiales para la construcción.* Manizales : Universidad Nacional de Colombia, 2003. 958-9322-82-4.

Matallana, Ricardo. *El concreto: Fundamentos y Nuevas Tecnologías.* Bogotá : Constructora Concreto, 2019. 978-958-57497-3-3.

Rivva, Enrique. *Materiales para el concreto.* Lima : Instituto de la Construcción y Gerencia, 2014.

- Sánchez, Diego.** *Tecnología del concreto y del mortero.* Bogotá : Pontificia Universidad Javeriana, 2001. 958-9247-04-0.
- Rivva, Enrique.** *Naturaleza y materiales del concreto.* Lima : Instituto Americano del Concreto, 2000.
- IMCYC.** Construcción y Tecnología en Concreto. [En línea] [Citado el: 4 de Setiembre de 2023.] <http://www.imcyc.com/revistacyt/dic11/arttecnologia.html>.
- Hernández, Roberto, Fernández, Carlos y Baptista, María.** *Metodología de la investigación.* México : McGRAW-HIL/INTERAMERICANA EDITORES S.A., 2014. 978-1-4562-2396-0.
- Westreicher, Guillermo.** Método científico. [En línea] Economipedia, 1 de Septiembre de 2020. [Citado el: 17 de Julio de 2023.] https://economipedia.com/definiciones/metodo-cientifico.html?_cf_chl_tk=CWTArKjJ_JaavS0v6keaZ0x.sNIWdsZ6PwmcEV2cWi_w-1689633533-0-gaNycGzNDxA.
- Pino, Raúl.** *Metodología de la Investigación: Elaboración de diseños para contrastar hipótesis.* Lima : San Marcos, 2018. 978-612-315-519-3.
- Carrasco, Sergio.** *Metodología de la investigación científica: Pautas metodológicas para diseñar y elaborar el proyecto de investigación.* Lima : San Marcos, 2007. 978-9972-38-344-1.
- Sánchez, Hugo y Reyes, Carlos.** *Metodología y Diseños en la Investigación Científica.* Lima : Visión Universitaria, 2015. 9972-9695-3-3.
- ACI 308R-01.** *Guía para curar el concreto.* EE.UU : American Concrete Institute, 2008.
- Rivva, Enrique.** *Diseño de Mezclas.* Lima : Instituto de la Construcción y Gerencia, 2014.
- MTC.** *Manual de ensayo de materiales.* Lima : Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2016.

Ñaupas, Humberto, y otros. *Metodología de la investigación cuantitativa-cualitativa y redacción de tesis.* Bogotá : Ediciones de la U, 2014. 978-958-762-188-4.