# Pavimentos de Concreto Compactado con Rodillo

## Diseño y Aplicación en el Valle del Mantaro

David Ramos Piñas
Jefrin Marlon Silva Murillo
Javier Amador Navarro Veliz

Primera Edición

Editorial Plagcis

Sello editorial: Edición Litoral
Litoral
Institución de Educación Superior

# Pavimentos de Concreto Compactado con Rodillo: Diseño y Aplicación en el Valle del Mantaro

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

**Pavimentos de concreto compactado con rodillo: Diseño y aplicación en el Valle del Mantaro**

**David Ramos Piñas**
https://orcid.org/0000-0002-4215-2374
d.dramos@ms.upla.edu.pe
Universidad Peruana Los Andes, Perú

**Jefrin Marlon Silva Murillo**
https://orcid.org/0000-0002-3427-0864
d.jsilva@ms.upla.edu.pe
Universidad Peruana Los Andes, Perú

**Javier Amador Navarro Veliz**
https://orcid.org/0000-0001-5293-0240
d.jnavarro@ms.upla.edu.pe
Universidad Peruana Los Andes, Perú

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

El presente libro ha sido sometido a un riguroso proceso de revisión (pares externos) mediante el sistema de arbitraje de doble ciego. La publicación cuenta con el aval del Comité Científico de la editorial PLAGCIS y del Sello Editorial Litoral, tras haber superado los protocolos editoriales estandarizados que aseguran el cumplimiento de las normas académicas establecidas para publicaciones de carácter científico.

**PAVIMENTOS DE CONCRETO COMPACTADO CON RODILLO:**

**DISEÑO Y APLICACIÓN EN EL VALLE DEL MANTARO**

Primera publicación: febrero, 2026

De esta edición:
Fondo Editorial PLAGCIS, adscrito a la Plataforma de Acción, Gestión e investigación Social S.A.S.
Calle 13B 12-74, Sincelejo - Colombia
Tel.: +57 301 498 9039
director@plagcis.org / www.plagcis.org

Corporación de Educación Superior del Litoral – LITORAL
Calle 79 No. 42f – 110, Barranquilla – Colombia

Realización y diseño: Fondo Editorial PLAGCIS

Esta publicación es el resultado de investigación bajo el auspicio de la Plataforma de Acción, Gestión e investigación Social S.A.S – (PLAGCIS) en alianza con la Corporación de Educación Superior del Litoral – LITORAL.

Este texto está protegido por una licencia Creative Commons de Atribución 4.0. https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es

ISBN: 978-628-97459-1-7
DOI: https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40
URL: https://plagcis.org/book/index.php/editorial/catalog/book/40

Acceso abierto / Open Access

Pavimentos de concreto compactado con rodillo: diseño y aplicación en el Valle del Mantaro/ Ramos Piñas, David; Silva Murillo, Jefrin Marlon; Navarro Veliz, Javier Amador: Corporación de Educación Superior del Litoral – LITORAL, 2026 & Plataforma de Acción, Gestión e Investigación Social S.A.S – Fondo Editorial PLAGCIS, 2026.

ISBN: 978-628-97459-1-7

58 páginas.

1. Concreto rodillado, 2. Pavimentos urbanos, 3. Pavimentos rígidos, 4. Análisis numérico, 5. Elementos finitos

Materia: 625.8 - Revestimientos artificiales de carreteras

Clasificación Thema: TNH - Ingeniería de caminos, carreteras, autopistas y tráfico

Libro de investigación No. 40

**Cita sugerida (APA 7ma):** Ramos Piñas, D., Silva Murillo, J. M., & Navarro Veliz, J. A. (2026). Pavimentos de concreto compactado con rodillo: diseño y aplicación en el Valle del Mantaro. Editorial PLAGCIS. https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

# CONTENIDO

RESUMEN ..... 7
INTRODUCCIÓN ..... 8
PRÓLOGO ..... 10
Capítulo 1 ..... 11
Vías urbanas y pavimentos de concreto compactado con rodillo en el Valle del Mantaro ..... 11
Capítulo 2 ..... 17
Fundamentos teóricos del concreto compactado con rodillo y de los pavimentos rígidos ..... 17
Capítulo 3 ..... 24
Materiales y diseño de mezcla del concreto compactado con rodillo para vías urbanas ..... 24
Capítulo 4 ..... 32
Metodología de análisis numérico y modelación con elementos finitos ..... 32
Capítulo 5 ..... 40
Resultados estructurales y evaluación económica del pavimento de CCR ..... 40
Capítulo 6 ..... 46
Guía práctica, conclusiones y proyecciones futuras ..... 46
EPÍLOGO ..... 53
REFERENCIAS ..... 54

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

## RESUMEN

Este libro ofrece un abordaje integral del diseño y dimensionamiento de pavimentos urbanos de concreto compactado con rodillo (CCR) en el Valle del Mantaro, articulando fundamentos teóricos, caracterización de materiales, modelación numérica y evaluación económica. Su objetivo central es proporcionar a ingenieros, planificadores y tomadores de decisión una guía clara y rigurosa para incorporar el CCR como alternativa real frente a los pavimentos asfálticos y de concreto convencional. La obra parte del contexto urbano y vial del valle, destacando las limitaciones de las soluciones tradicionales en términos de durabilidad, costos de mantenimiento y tiempos de ejecución. A partir de allí, desarrolla los principios de los pavimentos rígidos y las particularidades del CCR como material híbrido, situado entre la mecánica de suelos y la tecnología del concreto, con especial énfasis en el diseño de mezcla, granulometría, control de humedad y compactación. Metodológicamente, el libro recurre al método de los elementos finitos, implementado en un modelo tridimensional con ABAQUS, para analizar la respuesta estructural de una sección típica de CCR bajo el paso de un eje equivalente de 8,2 toneladas. Los resultados muestran una distribución eficiente de esfuerzos y deformaciones, junto con ahorros del orden del 27 % en costos directos y reducciones cercanas al 80 % en tiempos de ejecución respecto a un pavimento rígido convencional de igual espesor. La obra culmina en una guía práctica de diseño y construcción, acompañada de recomendaciones para la gestión pública y propuestas de líneas de investigación futura, posicionando al CCR como una alternativa técnicamente sólida y económicamente ventajosa para la infraestructura urbana andina.

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

## INTRODUCCIÓN

Este libro nace de una preocupación muy concreta: cómo diseñar y construir pavimentos urbanos que acompañen de verdad la vida de las personas y no se conviertan, cada pocos años, en un problema que hay que volver a resolver. La discusión técnica sobre tipos de pavimentos, espesores y materiales tiene sentido, pero solo si es capaz de dialogar con una pregunta sencilla: ¿qué solución ofrece, a la vez, seguridad, durabilidad y un uso responsable de los recursos públicos?

Entre las distintas alternativas disponibles, el concreto compactado con rodillo (CCR) ha ido ganando espacio en obras de infraestructura alrededor del mundo. Su combinación de bajo contenido de agua, uso eficiente del cemento y compactación mediante rodillos lo convierte en una opción especialmente interesante para proyectos en los que la rapidez de ejecución y la robustez estructural resultan decisivas. En el caso de las vías urbanas, esta tecnología permite pensar en pavimentos rígidos que se construyen con la lógica de una base granular, pero que se comportan como una losa de concreto estructural bajo el paso del tránsito.

El propósito central de este libro es ofrecer una ruta clara para quienes desean evaluar e incorporar el CCR en el diseño de pavimentos urbanos. No se limita a describir la tecnología; la somete a prueba, la compara con soluciones convencionales y la analiza desde tres dimensiones complementarias: el comportamiento estructural, el desempeño del material y las implicancias económicas y de tiempo de ejecución. La intención es que el lector encuentre aquí no solo conceptos, sino también criterios prácticos para tomar decisiones informadas en proyectos reales.

El texto está dirigido a ingenieras e ingenieros civiles, especialistas en transportes y pavimentos, responsables de planificación y

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

estudiantes avanzados. Está escrito con un lenguaje deliberadamente claro, que busca mantener el rigor técnico sin esconderse detrás de fórmulas o jerga innecesaria. Los resultados numéricos, las propiedades de materiales y las comparaciones de costo–tiempo se presentan siempre con la mira puesta en su utilidad concreta: ayudar a elegir secciones de pavimento más adecuadas, estimar mejor los recursos y comprender las consecuencias de optar por una solución u otra.

La estructura del libro acompaña un recorrido gradual. Los primeros capítulos se concentran en los fundamentos: se describen el papel de las vías urbanas, los principios de los pavimentos rígidos y las particularidades del concreto rodillado, así como los materiales y los criterios de diseño de mezcla que le dan forma. A continuación, se abre la puerta al análisis numérico, mostrando cómo un modelo tridimensional mediante elementos finitos permite “mirar por dentro” el pavimento y seguir la distribución de esfuerzos y deformaciones ante el paso del tránsito.

Sobre esa base, se presentan resultados comparativos frente al concreto convencional, tanto desde la respuesta estructural como desde el costo y la duración de la obra. Finalmente, el libro culmina en una guía práctica de diseño y construcción de pavimentos urbanos de CCR, acompañada de conclusiones y líneas de trabajo futuro. Cada capítulo se conecta con el siguiente, de modo que el lector pueda avanzar de la idea general a la decisión de diseño con una narrativa continua.

En esencia, estas páginas quieren mostrar que es posible pensar el pavimento urbano no solo como un “gasto inevitable”, sino como una inversión técnica y socialmente cuidada. El concreto compactado con rodillo es una de las herramientas que pueden acompañar ese cambio de mirada. El lector encontrará aquí argumentos, datos y ejemplos suficientes para valorar si esta tecnología tiene un lugar en su propia realidad y, si decide adoptarla, para hacerlo con criterio y confianza.

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

## PRÓLOGO

En América Latina, la discusión sobre infraestructura suele concentrarse en grandes proyectos visibles: autopistas, puentes, corredores logísticos. Con frecuencia, en cambio, se pasa por alto la red de calles urbanas que articula la vida cotidiana y sostiene silenciosamente el funcionamiento de las ciudades. Este libro pone el foco, justamente, en ese nivel esencial y a menudo descuidado: el pavimento que pisan cada día miles de personas en el Valle del Mantaro.

El aporte principal de la obra es doble. Por un lado, ofrece una mirada didáctica y muy bien estructurada sobre el concreto compactado con rodillo (CCR), una tecnología que en otros contextos ha demostrado su capacidad para combinar rapidez constructiva, buen desempeño estructural y mayor eficiencia económica, pero que aún es poco conocida en muchas ciudades andinas. Por otro lado, integra de manera ejemplar el estudio de materiales, el análisis numérico mediante elementos finitos y la comparación de costos y plazos de obra, convirtiendo al libro en una herramienta útil tanto para el aula como para el diseño de proyectos reales.

El texto se distingue por un equilibrio poco frecuente: un lenguaje claro, cercano, que facilita la lectura, y al mismo tiempo un rigor técnico que se refleja en el uso cuidadoso de datos, modelos y referencias normativas. Cada capítulo conduce con naturalidad al siguiente, de modo que el lector avanza desde el contexto territorial hasta la propuesta de una guía práctica de diseño y construcción.

En un escenario donde la inversión pública debe ser cada vez más responsable y transparente, disponer de análisis sólidos como el que aquí se presenta no es un lujo académico, sino una necesidad. Este libro contribuye a ese propósito y abre una vía concreta —nunca mejor dicho— para repensar cómo se diseñan y construyen las calles de nuestras ciudades.

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

# Capítulo 1

## Vías urbanas y pavimentos de concreto compactado con rodillo en el Valle del Mantaro

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

En el Valle del Mantaro, las vías urbanas no son solo franjas de concreto o asfalto: son el escenario cotidiano donde ocurre la vida. Por ellas se trasladan niños camino a la escuela, agricultores que llegan a los mercados, comerciantes que distribuyen sus productos y familias que se desplazan en busca de servicios básicos. Cada bache, cada fisura y cada tramo deteriorado impacta en esa dinámica silenciosa, pero fundamental, que sostiene la economía y la calidad de vida de la población (Ramos, 2020). Pensar en el diseño de un pavimento, entonces, no es un ejercicio meramente técnico; es también una forma de preguntarnos cómo queremos que se muevan y se conecten nuestras ciudades.

El Valle del Mantaro ocupa una posición estratégica en la región central del Perú. Es un punto de encuentro entre distintas rutas de transporte, un nodo que articula la Sierra Central con otras zonas del país. Esta ubicación privilegiada trae consigo una exigencia: las vías urbanas deben ser capaces de soportar volúmenes crecientes de tránsito, vehículos cada vez más pesados y condiciones climáticas que, en ocasiones, resultan exigentes para los materiales tradicionales. Cuando las soluciones de pavimentación no están bien adaptadas a estas condiciones, la consecuencia suele ser conocida: deterioro prematuro, mayores costos de mantenimiento y usuarios insatisfechos (Sánchez Sabogal, 2014).

Durante muchos años, la respuesta habitual a la necesidad de pavimentar ha sido el uso predominante de asfaltos y, en menor medida, de concreto hidráulico convencional. Cada una de estas alternativas tiene virtudes reconocidas, pero también limitaciones. El asfalto ha sido apreciado por su rapidez constructiva y su relativa facilidad de mantenimiento. Sin embargo, bajo tráfico pesado, cambios térmicos significativos y drenajes insuficientes, su vida útil suele acortarse y da lugar a deformaciones, fisuras y pérdida de material (Mamani Rodrigo, 2024). Por otro lado, el concreto hidráulico convencional ofrece una durabilidad estructural notable, pero demanda más tiempo de ejecución, mayores cuidados en el curado y el uso de encofrados y juntas que pueden encarecer la obra y complejizar su construcción en entornos urbanos.

En la práctica, muchas municipalidades se ven atrapadas en un círculo difícil de romper: optar por soluciones de menor inversión inicial que, con el tiempo, demandan frecuentes intervenciones y consumen recursos de mantenimiento que siempre son limitados.

La tesis que da origen a este libro parte precisamente de esa tensión entre lo que se construye y lo que realmente se necesita. Frente a esta realidad, surge la pregunta de si es posible pensar en un tipo de pavimento que conjugue mejor desempeño estructural, costos razonables y tiempos de ejecución más cortos (Ramos, 2020).

En ese escenario aparece el concreto compactado con rodillo (CCR) como una alternativa llamativa. A primera vista, el CCR se presenta como un concreto "diferente": de consistencia muy seca, sin revenimiento medible, con contenidos de cemento menores a los del concreto convencional, pero con una exigencia muy clara: para lograr su desempeño, necesita ser compactado con energía elevada mediante rodillos vibratorios (Curasi, 2016). Esta característica lo aproxima, en cierta forma, a las técnicas utilizadas en suelos y bases estabilizadas, y abre la posibilidad de aprovechar equipos y conocimientos que ya están instalados en el ámbito de la construcción vial.

Las experiencias internacionales muestran que el CCR ha sido utilizado con éxito en presas, diques y losas industriales. En esos campos, ha demostrado que puede resistir solicitaciones importantes, construirse en grandes volúmenes y reducir significativamente los tiempos de ejecución (Pitta Rocha y Hurtado Diaz, 1994). En la medida en que se ha ido acumulando experiencia, la posibilidad de trasladar esta tecnología a la pavimentación de calles y carreteras comenzó a cobrar fuerza. Guinée, Ríos y otros autores han documentado casos donde el CCR se adopta para la construcción de vías urbanas, resaltando su capacidad para conseguir altos rendimientos diarios de colocación y compactación, con una necesidad menor de encofrados y juntas que en el concreto tradicional (Castro Vélez y Moll Martínez, 2024; Lozano Morales, 2024).

Sin embargo, el CCR no es una solución milagrosa. Exige un control muy cuidadoso de la humedad de la mezcla, una compactación adecuada y, en muchos casos, la consideración de capas delgadas de asfalto o tratamientos superficiales que mejoren la textura y el confort de rodadura del pavimento. Además, la dosificación, el tipo de agregados y la energía de compactación deben ser definidos con criterio técnico, teniendo en cuenta las condiciones específicas del proyecto. Si estos aspectos se descuidan, el riesgo de obtener un pavimento con menor

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

desempeño del esperado aumenta sensiblemente (Pitta Rocha y Hurtado Diaz, 1994).

En el contexto del Valle del Mantaro, el CCR se presenta como una tecnología todavía poco explorada para pavimentos urbanos. Existen referencias y estudios vinculados a presas construidas con concreto compactado con rodillo, como los trabajos desarrollados en la región de Junín (Curasi, 2016), que han permitido conocer mejor el comportamiento del material en grandes volúmenes. No obstante, hasta el trabajo de Ramos (2020), no se disponía de modelos ni experiencias documentadas que abordaran directamente su uso en vías urbanas de la zona. Esta ausencia de referencias no significa que el CCR no sea adecuado, sino que aún no había sido sometido a una evaluación sistemática en este tipo de aplicaciones.

A partir de esta realidad, se formula una pregunta que este libro retoma y amplía a partir de la investigación de Ramos (2020): ¿es posible determinar un dimensionamiento óptimo del concreto rodillado para su uso en pavimentos urbanos del Valle del Mantaro, utilizando como herramienta el análisis numérico mediante el método de elementos finitos?. La inquietud va más allá de un cálculo puntual; busca establecer criterios que permitan definir espesores de losa y configuraciones estructurales que resulten seguros, duraderos y económicamente razonables. En otras palabras, intenta responder no solo si el CCR se puede usar, sino cómo se debe diseñar para que realmente sea una solución competitiva.

Esta pregunta técnica se entrelaza con una justificación social evidente. Una vía urbana bien diseñada y construida se traduce en menos interrupciones por mantenimiento, en una mayor seguridad para los usuarios y en una ciudad que funciona con mayor fluidez. Para una región como el Valle del Mantaro, donde el transporte de productos agrícolas y el flujo permanente de personas son parte del corazón de la economía local, un pavimento de larga duración puede marcar la diferencia entre un sistema vial que acompaña el desarrollo y otro que lo frena (Ramos, 2020). Cuando se opta por soluciones frágiles, el costo no solo es financiero: también se refleja en tiempo perdido, accidentes y desgaste social.

La justificación técnica se apoya en las propiedades mecánicas del CCR y en la forma en que puede integrarse en la estructura de

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

un pavimento rígido. Al tener un contenido de agua reducido y un proceso de compactación intenso, el CCR desarrolla resistencias a compresión y módulos de elasticidad adecuados para soportar cargas repetidas, siempre que el diseño de la losa y la subestructura se realice con criterios sólidos. En ese sentido, el CCR abre una puerta a pensar en pavimentos rígidos que se construyen con una lógica más cercana a la de las capas granulares y los suelos estabilizados, pero que alcanzan el desempeño de un concreto hidráulico (Curasi, 2016; Pitta Rocha y Hurtado Diaz, 1994).

La dimensión académica y metodológica de este trabajo también es central. Frente a métodos puramente empíricos de diseño de pavimentos, la incorporación del análisis numérico mediante el método de elementos finitos ofrece una herramienta potente para comprender cómo se distribuyen los esfuerzos y las deformaciones en la estructura del pavimento y en la subrasante. El uso de software especializado como ABAQUS permite modelar geometrías, condiciones de carga y propiedades de materiales de una manera más detallada, aproximando el comportamiento real del pavimento bajo las ruedas de los vehículos (Ramos, 2020). Esta aproximación, lejos de reemplazar la experiencia de campo y los ensayos de laboratorio, la complementa y la fortalece.

El objetivo general de este libro es acompañar al lector en un recorrido que va desde el contexto y la motivación del uso del CCR en vías urbanas del Valle del Mantaro, hasta la presentación de una propuesta práctica de dimensionamiento basada en análisis numérico y evaluación económica. En ese trayecto, se revisan los fundamentos teóricos del CCR y de los pavimentos rígidos, se describen las características de los materiales y del diseño de mezcla, se explica la metodología de modelación con elementos finitos y se discuten los resultados en términos de desempeño estructural y costos. La intención es que, al finalizar la lectura, el lector disponga no solo de fórmulas y gráficos, sino también de una comprensión clara y articulada de por qué y cómo aplicar el CCR en este contexto.

Para lograrlo, el contenido se organiza en seis capítulos que dialogan entre sí. Este primer capítulo ofrece una mirada de conjunto: sitúa al lector en el Valle del Mantaro, presenta las limitaciones de las soluciones tradicionales de pavimentación y muestra al CCR como una alternativa posible, pero aún por

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

explorar. En el segundo capítulo se profundiza en los fundamentos teóricos de los pavimentos rígidos y del concreto compactado con rodillo, revisando conceptos como esfuerzos, deformaciones, fatiga y durabilidad. El tercer capítulo se detiene en los materiales y en el diseño de la mezcla de CCR, con especial atención a las condiciones locales de la región.

El cuarto capítulo introduce al lector en la metodología de análisis numérico utilizada en el estudio. Allí se explican los principios básicos del método de elementos finitos, se presenta la configuración del modelo en ABAQUS y se detallan las condiciones de carga, las propiedades de los materiales y los casos de estudio considerados. A continuación, el quinto capítulo reúne y discute los resultados obtenidos, tanto desde el punto de vista estructural como económico. Se analizan las respuestas del pavimento ante las cargas de tránsito, se identifican los espesores más convenientes y se comparan los costos y tiempos estimados con soluciones más tradicionales.

En cuanto al sexto capítulo cierra el recorrido con una propuesta de guía práctica y una reflexión sobre las implicancias de adoptar el CCR en vías urbanas del Valle del Mantaro. Allí se presentan recomendaciones dirigidas a proyectistas, autoridades y profesionales del sector, se revisan las limitaciones de los resultados y se sugieren posibles líneas de investigación futura. La idea es que este último capítulo funcione como un puente entre la teoría y la práctica, permitiendo que la experiencia recogida se transforme en decisiones informadas en el campo.

Por lo tanto, este primer capítulo invita al lector a mirar más de cerca una problemática que, a primera vista, podría parecer puramente técnica, pero que está llena de implicancias humanas y territoriales. A lo largo del libro, el CCR deja de ser solo una sigla para convertirse en una alternativa concreta —y nunca mejor dicho— para pensar en vías urbanas más duraderas y coherentes con las necesidades del Valle del Mantaro.

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

# Capítulo 2

## Fundamentos teóricos del concreto compactado con rodillo y de los pavimentos rígidos

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

Cuando uno se detiene a observar una vía pavimentada, lo que ve a simple vista es solo la superficie: una losa gris, aparentemente homogénea, que soporta el paso de vehículos día y noche. Sin embargo, bajo esa capa visible ocurre una historia más compleja. Allí se encuentran distintas capas de materiales, interactuando entre sí, transmitiendo esfuerzos, disipando deformaciones y resistiendo el tránsito y el tiempo. Comprender esa historia interna es el corazón de este capítulo. Aquí nos detendremos en los fundamentos teóricos que explican cómo funciona un pavimento rígido y por qué el CCR tiene un papel tan interesante en ese comportamiento.

En términos generales, un pavimento es una estructura compuesta que busca cumplir una misión sencilla de enunciar, pero exigente de lograr: recibir las cargas de los vehículos y transmitirlas de manera gradual al suelo de fundación, evitando que las deformaciones alcancen niveles que comprometan la seguridad y el confort de los usuarios. Esa estructura se apoya sobre una subrasante, que es el suelo natural o mejorado; puede incluir una o varias capas intermedias, como una subbase granular; y, en el caso de los pavimentos rígidos, culmina en una losa de concreto hidráulico que actúa como elemento principal resistente (Hernandez Quiñonez & Sajamí Satalaya, 2024; Vilcapaza Zeballos, 2024).

Tradicionalmente se distinguen dos grandes familias de pavimentos: los flexibles y los rígidos. Los pavimentos flexibles, como los de mezcla asfáltica en caliente, distribuyen las cargas principalmente a través de la deformación gradual de sus capas, donde cada estrato aporta una parte de la resistencia. Los pavimentos rígidos, en cambio, confían la mayor parte de la capacidad estructural a la losa de concreto, que trabaja como una placa apoyada sobre una base relativamente elástica. Esa diferencia se refleja en el modo en que se diseñan, en las teorías que los describen y en la forma en que se deterioran con el tiempo (Zirión, 2007).

En un pavimento rígido bien concebido, la losa de concreto no está sola. Depende de la calidad de la subrasante, del espesor y tipo de subbase, del drenaje y de las condiciones ambientales. Cuando alguno de estos elementos es descuidado, los esfuerzos que se generan en el concreto tienden a concentrarse y pueden aparecer fisuras, desprendimientos o fallas prematuras. Por eso, el

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

diseño de este tipo de pavimentos no es una suma de decisiones aisladas, sino un ejercicio de equilibrio entre las propiedades de la losa y las capacidades del suelo que la sostiene.

Dentro de ese universo de pavimentos rígidos, el concreto compactado con rodillo se presenta como una variante particular del concreto hidráulico. A primera vista podría parecer simplemente "otro tipo de concreto", pero su comportamiento está marcado por una combinación única de consistencia seca, compactación intensiva y menor contenido de pasta de cemento. En la tesis que da origen a este libro se define al CCR como un concreto muy seco, sin asentamiento medible, con contenidos de cemento que suelen variar entre 60 y 240 kg/m$^3$ y que requiere, de manera imprescindible, la acción de equipos de compactación para alcanzar su densidad y resistencia de diseño.

Esta condición de baja humedad y escasa trabajabilidad en estado fresco transforma la manera en que se coloca y consolida el material. Mientras que el concreto convencional fluye y se acomoda con ayuda de vibradores de aguja o reglas vibrantes, el CCR se comporta más como un material granular estabilizado, que debe ser extendido en capas y compactado con rodillos vibratorios, de forma similar a como se trabaja una base granular o un suelo mejorado. Sin embargo, una vez endurecido, el CCR desarrolla propiedades mecánicas que lo aproximan al concreto tradicional: buenas resistencias a compresión, módulos de elasticidad elevados y un notable comportamiento frente a cargas repetidas.

Uno de los puntos clave para entender el CCR es la influencia de su menor contenido de agua y pasta. Como señalan los estudios recogidos en el marco teórico de la tesis, son precisamente esos menores contenidos de agua y pasta los que explican las diferencias en comportamiento entre el CCR y el concreto convencional. Menos agua implica relaciones agua/cemento más bajas, lo que, si se controla adecuadamente, se traduce en resistencias mecánicas mayores y una retracción más reducida. Pero al mismo tiempo, esta condición vuelve más exigente el control de la humedad: pequeñas variaciones pueden comprometer la compactación y con ella la calidad final del pavimento.

En el contexto de los pavimentos, dos propiedades se vuelven especialmente relevantes: la resistencia a la flexión y la resistencia a la fatiga. La primera se relaciona con la capacidad de

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

la losa para soportar momentos flectores en su fibra inferior cuando pasa un eje de carga. La segunda expresa la habilidad del material para resistir un número elevado de repeticiones de esas cargas sin que se produzca una rotura estructural. En los pavimentos de CCR, ambas propiedades resultan determinantes para definir el espesor de la losa, ya que el diseño debe garantizar que las tensiones producidas por el tránsito se mantengan dentro de límites que el material pueda soportar durante su vida útil prevista (Aylas Fernandez & Mancha Canchero, 2025).

El CCR, visto desde esta perspectiva, se ubica en una zona de encuentro entre la mecánica de suelos y la tecnología del concreto. Por un lado, la mezcla se diseña buscando una granulometría adecuada, una humedad óptima y una energía de compactación suficiente, tal como se hace en los estudios de suelos para determinar la relación densidad–humedad mediante los ensayos Proctor estándar o modificado. Por otro lado, se trata de un material cementado, cuyo desempeño final depende de la hidratación del cemento, del desarrollo de la microestructura y de las tradicionales variables de resistencia de un concreto hidráulico.

Esta dualidad se resume de manera clara en la tesis cuando se presenta la llamada relación suelo–concreto, explicada a través del "principio del suelo" y el "principio del concreto". El principio del suelo pone el énfasis en el comportamiento granular de la mezcla: se parte de la idea de que el CCR funciona como un suelo compactado, donde es fundamental encontrar la combinación de humedad y energía de compactación que permita alcanzar una densidad máxima. Para ello se recurre a ensayos y criterios muy similares a los empleados en mecánica de suelos, adaptando moldes y procedimientos para considerar la naturaleza cementada de la mezcla.

El principio del concreto, en cambio, recuerda que, más allá de su forma de colocación, el CCR es, en esencia, un concreto estructural. Trabaja como un lastre rígido y resistente, capaz de transmitir y redistribuir cargas sobre la subestructura del pavimento. Desde esta óptica, la relación agua/cemento, el tipo de cemento utilizado y el proceso de curado adquieren una importancia central. Una masa de CCR adecuadamente compactada llena las cavidades de la unidad de volumen de manera eficiente, generando un material de alta densidad y con resistencias a compresión comparables, e incluso superiores en

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

algunos casos, a las del concreto tradicional utilizado en pavimentos.

Cuando se diseña un pavimento de CCR, estas dos miradas se complementan. El ingeniero debe asegurarse de que la mezcla pueda compactarse en campo hasta lograr las densidades objetivo, que suelen ser del mismo orden que las obtenidas en laboratorio, y al mismo tiempo verificar que las resistencias y módulos de elasticidad alcanzados sean compatibles con los esfuerzos que se generarán por el tránsito. Si el diseño se inclina demasiado hacia uno u otro extremo —solo suelo o solo concreto— corre el riesgo de perder eficiencia: una mezcla demasiado seca puede volverse difícil de compactar y generar vacíos indeseables; una mezcla con demasiada pasta puede aumentar los costos y provocar problemas de retracción y fisuración.

Los materiales que intervienen en el CCR refuerzan esta lógica. En términos de aglomerantes, se pueden emplear distintos tipos de cemento portland, muchas veces favoreciendo aquellos de menor calor de hidratación, como los tipos II o V, con el fin de reducir riesgos de fisuración temprana en grandes volúmenes de colocación. El uso de puzolanas y adiciones minerales también puede contribuir a controlar el calor y mejorar la durabilidad, siempre que se integren al diseño de mezcla con criterios claros. En cuanto a los agregados, se buscan materiales que cumplan simultáneamente con las especificaciones para bases o subbases de pavimentos y con las exigencias de agregados para concreto hidráulico.

La granulometría de los agregados tiene un papel decisivo en el comportamiento del CCR. Una distribución adecuada de tamaños permite lograr una estructura granular densa, con pocos vacíos, que favorece tanto la compactación como la eficiencia en el uso de la pasta de cemento. La tesis muestra cómo, en el contexto del Valle del Mantaro, se ha trabajado con agregados que cumplen los requisitos de las normas nacionales para pavimentos de concreto, ajustando el diseño de mezcla para equilibrar trabajabilidad en estado fresco, densidad en estado compactado y propiedades mecánicas en estado endurecido.

El agua, por su parte, deja de ser un simple ingrediente que “ayuda a mezclar” y se convierte en una variable crítica. En el CCR, los rangos de agua disponibles suelen ser mucho más

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

estrechos que en el concreto convencional. No se trata solo de cumplir con los parámetros de calidad establecidos en normas técnicas; es necesario fijar y controlar con rigor la cantidad de agua por metro cúbico de mezcla. En muchos casos, las mezclas de CCR trabajan con volúmenes de agua del orden del 60 al 70 % de lo que se usaría en un concreto de asentamiento normal, lo que exige una coordinación cuidadosa entre planta de concreto, transporte y colocación en obra.

Todo este entramado de materiales y principios se traduce, finalmente, en una estructura de pavimento que debe ser capaz de soportar el tránsito de manera eficiente. Desde la teoría, el pavimento rígido se analiza como una losa apoyada sobre una base elástica, sometida a la acción de cargas concentradas representadas por los ejes de los vehículos. En este punto, la tesis introduce el análisis numérico y el método de elementos finitos como herramientas para estudiar con mayor detalle cómo se distribuyen las tensiones y deformaciones en la losa, la subbase y la subrasante. Aunque la metodología específica se presenta en el capítulo siguiente, resulta útil adelantar aquí la idea general: se trata de construir un modelo tridimensional que reproduzca la estratigrafía del pavimento y las condiciones de carga, y utilizarlo para explorar el desempeño de diferentes espesores de losa de CCR.

En el marco teórico de la investigación, el análisis numérico se define como el conjunto de métodos usados en ingeniería para obtener soluciones aproximadas a problemas que no arrojan soluciones exactas de forma directa, pero que pueden representarse mediante ecuaciones diferenciales o sistemas de ecuaciones. El método de elementos finitos, en particular, se presenta como una estrategia para descomponer un problema continuo —como lo es un pavimento— en pequeñas partes llamadas elementos, unidas entre sí en nodos, donde se formulan y resuelven las ecuaciones que describen el comportamiento del sistema.

Esta aproximación no pretende reemplazar las teorías clásicas de diseño de pavimentos rígidos, se desea complementarlas, es decir, permite “entrar” en la estructura y observar con mayor detalle las variaciones de esfuerzos y deformaciones con la profundidad y a lo largo de diferentes puntos. En el caso del CCR, esto resulta especialmente valioso, porque ayuda a entender cómo

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

influyen el espesor de la losa, las propiedades de la subbase y la rigidez de la subrasante en el desempeño del conjunto. A partir de esos análisis, es posible identificar espesores que resulten óptimos, en el sentido de ofrecer un buen comportamiento estructural sin incurrir en consumos de material innecesariamente altos.

De manera, este capítulo ha buscado construir el andamiaje teórico que sostiene el resto del libro. Hemos visto cómo los pavimentos rígidos se conciben como sistemas estructurales que reparten cargas hacia el suelo, cómo el CCR se propone como una variante particular de concreto que combinas técnicas de compactación de suelos con el desempeño mecánico de un material cementado, y cómo el análisis numérico abre un espacio para estudiar su comportamiento con mayor profundidad. En el próximo capítulo descenderemos un nivel más en esta estructura: dejaremos de hablar en términos generales para concentrarnos en los materiales, los ensayos de laboratorio y el diseño de mezcla, es decir, en la forma concreta —nuevamente, en todos los sentidos— en que se prepara el CCR que dará vida a los pavimentos urbanos del Valle del Mantaro.

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

# Capítulo 3

## Materiales y diseño de mezcla del concreto compactado con rodillo para vías urbanas

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

Cuando pensamos en un pavimento de concreto compactado con rodillo, es fácil imaginar solo la losa terminada, firme y gris, recibiendo el paso de los vehículos. Pero antes de llegar a ese resultado visible hay una historia que comienza mucho antes, en la cantera, en la planta de agregados, en el laboratorio y en el diseño cuidadoso de la mezcla. En este capítulo abrimos esa "caja negra" y miramos con calma cuáles son los materiales que dan vida al CCR y cómo se combinan para responder a las exigencias de las vías urbanas del Valle del Mantaro.

El enfoque que se adopta en la tesis reconoce que el CCR no es un invento radicalmente nuevo, sino una manera distinta de organizar los mismos ingredientes básicos del concreto hidráulico: un aglomerante cementante, agregados gruesos y finos, y agua, con la particularidad de trabajar con menos pasta, menos agua y mucha más compactación. La clave está en seleccionar esos materiales de modo que cumplan, al mismo tiempo, con las especificaciones de una base o subbase de pavimento y con los requisitos de un concreto estructural, lo que ya nos indica que el CCR vive en esa frontera interesante entre la mecánica de suelos y la tecnología del concreto.

## 3.1. Cementos y materiales aglutinantes

El corazón químico del CCR está en el cemento. La tesis subraya que, tratándose de producciones en masa para carreteras y pavimentos, se puede utilizar prácticamente cualquier tipo de cemento portland, pero la elección no es indiferente. Para el CCR se recomiendan, de manera preferente, cementos de bajo calor de hidratación, como el tipo II, y en ciertos casos también el tipo V, pensado para ambientes con presencia de sulfatos. Estos cementos desarrollan calor de hidratación de forma más lenta que el tipo I, lo que resulta especialmente útil cuando se necesita disponer de tiempo suficiente para la compactación con rodillos sin que el concreto "se adelante" al proceso.

El texto insiste en que la resistencia inicial de estos cementos puede ser algo menor que la del tipo I, pero, con el tiempo, llegan a igualar o incluso superar los valores requeridos para un pavimento. Esa aparente "lentitud" es, en realidad, una ventaja para el CCR, porque reduce el riesgo de fisuración temprana asociada al calor de hidratación en grandes volúmenes. En cambio, el uso de cementos de alta resistencia inicial, como el tipo III, se

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

considera poco práctico para este tipo de pavimentos, precisamente porque acortan en exceso la ventana de tiempo disponible para la compactación, lo que podría comprometer la densidad y la uniformidad de la losa.

Junto con el cemento, las puzolanas y otras adiciones minerales pueden desempeñar un papel importante. Su presencia afecta directamente la velocidad de hidratación y las resistencias finales, y contribuye a mejorar la durabilidad frente a ciertos agentes químicos. Aunque la tesis se centra en el cemento portland como aglomerante, deja abierta la posibilidad de integrar puzolanas siempre que se haga un diseño de mezcla cuidadoso, capaz de equilibrar calor, resistencia y trabajabilidad. En un contexto como el del Valle del Mantaro, donde las variaciones de temperatura y la disponibilidad de materiales locales influyen en las decisiones de diseño, esta flexibilidad resulta especialmente valiosa.

## 3.2. Agregados: el esqueleto del CCR

Si el cemento es el corazón, los agregados son el esqueleto del concreto compactado con rodillo. La tesis es clara en este punto: los materiales deben provenir de canteras cuya calidad haya sido verificada, y deben satisfacer tanto las exigencias de los agregados para concreto hidráulico como las de los materiales utilizados en bases y subbases de pavimentos. Esto implica evaluar la compacidad, la resistencia a la abrasión, la durabilidad y la resistencia química del material, siguiendo las especificaciones de la normativa peruana aplicable, como la NTP 337.441 para agregados.

En el CCR, la fracción gruesa del agregado se define como aquel material retenido en la malla Nº 4. Este agregado grueso, proveniente del triturado de bolonería, debe ser limpio, resistente, durable y con una forma que facilite el empaquetamiento. La tesis incluye una tabla específica con requisitos para el agregado grueso en pavimentos de concreto hidráulico, donde se recogen límites de desgaste por abrasión, porcentaje de partículas blandas, contenido de materiales perjudiciales y otros parámetros de calidad que aseguran un buen desempeño bajo la acción de rodillos vibratorios y del tránsito vehicular.

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

La fracción fina, por su parte, tiene un rol que va más allá de llenar vacíos. En el CCR, las mezclas de agregados suelen presentar una mayor proporción de finos respecto a los concretos convencionales. Cuando esos finos no son plásticos, pueden ocupar los espacios entre las partículas gruesas, reducir la demanda de agua y mejorar la compactación. Por el contrario, si los finos poseen una plasticidad elevada, pueden generar problemas de trabajabilidad y de estabilidad volumétrica, por lo que la selección de arenas y materiales finos debe hacerse con especial cuidado, verificando límites de plasticidad y granulometría.

La granulometría global del conjunto de agregados se convierte así en una pieza central del diseño. No se trata solo de cumplir con curvas "tipo" de laboratorio, sino de lograr una estructura granular densa, estable y compatible con los equipos disponibles en obra. La tesis hace énfasis en que la mezcla debe ser lo suficientemente trabajable como para ser extendida y compactada con rodillos, pero lo bastante seca como para no sufrir hundimientos bajo su propio peso o el de la maquinaria. Alcanzar ese equilibrio exige, muchas veces, ajustar la proporción entre agregado grueso y fino en función de los resultados de los ensayos de compacidad y de la respuesta observada en campo.

### 3.3. El agua y la humedad como variables críticas

El agua es, quizás, el componente más sensible del CCR. No porque se use mucha, sino precisamente porque se trabaja con muy poca. La tesis indica que gran parte de las mezclas de concreto compactado con rodillo requieren entre 110 y 130 litros de agua por metro cúbico, para agregados con tamaño máximo de 19 mm. Esto equivale aproximadamente a un 4–7 % del peso del material seco, y representa apenas entre un 58 y un 68 % del agua que se usaría en un concreto convencional, donde se espera del orden de 190 litros por metro cúbico.

Trabajar en ese rango estrecho convierte a la humedad en una variable que debe ser seguida casi con lupa. Un pequeño exceso de agua puede volver la mezcla demasiado blanda, facilitar segregaciones y dificultar la compactación adecuada; una ligera carencia puede impedir que se alcance la densidad objetivo, dejando vacíos que comprometen la resistencia y la durabilidad del pavimento. Por eso, además de cumplir con los requisitos de calidad del agua de acuerdo con la norma EG–2013 para concreto

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

hidráulico, el proyecto exige un control muy estricto de la dosificación en planta y de las condiciones ambientales en el momento de la colocación.

La humedad no solo se controla en la mezcla, sino también en el entorno. La tesis recomienda medir la temperatura del ambiente y la temperatura del material antes y durante la colocación, así como verificar densidad y contenido de aire del CCR en obra. Estos controles permiten ajustar de manera oportuna la cantidad de agua o la energía de compactación, y sirven como puente entre los resultados de laboratorio y el comportamiento real del material en el frente de pavimentación. En un clima como el del Valle del Mantaro, donde pueden presentarse variaciones significativas a lo largo del día, esta atención al detalle no es un lujo, sino una necesidad.

### 3.4. Ensayos de laboratorio: de la teoría a la mezcla real

Para que el diseño de mezcla no se quede en el papel, el laboratorio desempeña un papel protagónico. La tesis explica que muchos de los ensayos empleados en el CCR son los mismos que se utilizan en concreto convencional, aunque adaptados a la consistencia seca y a las particularidades del material. De este modo, se preparan especímenes con moldes de altura igual al doble de su diámetro, se compactan en varias capas con un número específico de golpes por capa, y luego se someten a carga para determinar resistencias de diseño a compresión y flexión.

En paralelo, se aplican ensayos propios de la mecánica de suelos, como la determinación de la granulometría, la humedad óptima y la máxima densidad seca mediante Proctor modificado, así como la evaluación de límites de plasticidad y el cálculo del CBR. Estos ensayos permiten conocer mejor el comportamiento del material en su estado granular y ofrecen información valiosa para ajustar la mezcla hacia una estructura que se compacte bien y que, al endurecer, actúe como un concreto estructural. Es en esa doble mirada —como suelo y como concreto— donde el CCR encuentra su verdadera identidad.

El vínculo entre el laboratorio y el diseño de mezcla queda ilustrado también por antecedentes como el trabajo de Curasi (2016), citado en la tesis. En su estudio para presas de CCR, se propone una dosificación en volumen de 1 parte de cemento, 2,92

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

partes de agregado fino, 2,86 de agregado grueso, 0,58 de arena adicional y 23,03 litros de agua, para lograr una resistencia a compresión de 210 kg/cm² en la cantera de Cutimbo. Aunque el contexto es diferente —presas y no pavimentos urbanos—, el ejemplo muestra cómo un diseño de mezcla se va afinando a partir de ensayos sucesivos, hasta encontrar una combinación que equilibre trabajabilidad, densidad y resistencia.

## 3.5. Criterios de diseño de mezcla para el Valle del Mantaro

Con todos estos elementos, el diseño de mezcla del CCR para las vías urbanas del Valle del Mantaro se plantea como un ejercicio de equilibrio informado. Por un lado, deben respetarse los rangos generales que la literatura y la experiencia internacional sugieren para el CCR; por otro, es imprescindible ajustarlos a las condiciones específicas de los materiales locales, del clima y de los equipos disponibles. La tesis resume algunas características importantes del CCR empleado, entre ellas densidades reportadas del orden de 2560 kg/m³, superiores a los 2400 kg/m³ típicos del concreto convencional en la zona, lo que confirma que la compactación logra efectivamente una masa más densa y eficiente.

A modo orientativo, y basándonos en los rangos que recoge la investigación y en los antecedentes citados, puede presentarse la siguiente síntesis de parámetros clave que guían el diseño de mezcla del CCR para pavimentos urbanos:

**Tabla 1**

*Diseño de mezcla del CCR para pavimentos urbanos*

| Parámetro | Rango orientativo en CCR (según tesis) | Comentario principal |
|---|---|---|
| Contenido de cemento | 60 – 240 kg/m³ | Menor que en concreto convencional; depende del diseño. |
| Agua por metro cúbico | 110 – 130 L (agregado máx. 19 mm) | Aproximadamente 58–68 % del agua de un concreto normal. |
| Relación agua/material seco | 4 – 7 % | Ajustada según ensayos Proctor y compactación. |
| Densidad seca esperada | ≈ 2560 kg/m³ | Mayor que los 2400 kg/m³ típicos de concreto |

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

| | | |
|---|---|---|
| | | convencional. |
| Tamaño máximo de agregado | Hasta 19 mm (caso estudiado) | Controlado para evitar segregación y facilitar compactación. |

Esta tabla no pretende ser una receta rígida, se desea, puede servir como un mapa de referencia. Cada proyecto requerirá verificar, en laboratorio, que la combinación específica de agregados, cemento y agua se adapte a las condiciones del lugar y cumpla con las resistencias y módulos de elasticidad previstos en el cálculo estructural. Lo importante es entender que el CCR, bien diseñado, aprovecha densidades altas y bajas relaciones agua/cemento para ofrecer una mezcla que se compacta como un suelo, pero se comporta como un concreto.

El diseño para las vías urbanas del Valle del Mantaro se apoya también en el estudio previo de suelos realizado para la tesis. Al conocer la estratigrafía, los valores de CBR de la subrasante y las características de las capas inferiores, es posible fijar metas de desempeño para la losa de CCR: resistencias mínimas a flexión, módulos esperados y límites de deformación admisibles. De esta manera, el diseño de mezcla no se hace en abstracto, sino conectado con la realidad geotécnica de la zona y con el posterior análisis numérico del pavimento.

A lo largo de este capítulo hemos visto que el concreto compactado con rodillo es, en esencia, una forma inteligente de reorganizar materiales conocidos para responder a un reto específico: construir pavimentos urbanos más durables, densos y eficientes en su uso de recursos. Desde la elección del cemento hasta la granulometría de los agregados, pasando por el control de la humedad y los ensayos de laboratorio, todo el proceso de diseño de mezcla busca asegurar que, cuando el rodillo pase sobre la capa recién extendida, el material responda como debe responder: compactándose hasta formar una losa sólida, capaz de soportar años de servicio.

En el siguiente capítulo, la atención se desplaza desde los ingredientes hacia la manera en que se modela el pavimento como un todo. Allí veremos cómo estos materiales, con sus propiedades medidas y ajustadas, se traducen en parámetros numéricos dentro del método de elementos finitos, y cómo el programa ABAQUS permite simular el comportamiento del pavimento de CCR bajo las

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

cargas reales del tránsito en el Valle del Mantaro. De esta forma, el puente entre laboratorio y simulación termina de completarse y nos acerca a la pregunta central del libro: cuál es, en definitiva, el dimensionamiento óptimo de la losa de concreto compactado con rodillo para estas vías urbanas.

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

# Capítulo 4

# Metodología de análisis numérico y modelación con elementos finitos

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

Comprender un pavimento de concreto compactado con rodillo solo desde las fórmulas puede dejar fuera una parte importante de la historia. Por eso, además del enfoque teórico y de materiales, este libro se apoya en un "laboratorio virtual": un modelo numérico tridimensional que permite observar cómo se deforma y cómo transmite esfuerzos una losa de CCR típica de las vías urbanas del Valle del Mantaro. El corazón de esta estrategia es el método de los elementos finitos, implementado mediante el programa ABAQUS, que traduce el pavimento real en un conjunto de elementos discretos capaces de representar su comportamiento ante el paso de un eje de 8,2 toneladas.

La finalidad de este modelo es doble. Por un lado, estudiar con detalle la distribución de tensiones y deformaciones en toda la estructura: losa, subbase y subrasante. Por otro, explorar qué combinaciones de espesor y características geométricas resultan más eficientes, tanto en términos estructurales como económicos. En otras palabras, el modelo funciona como un banco de pruebas donde se puede "ensayar" el pavimento antes de construirlo, reduciendo la incertidumbre y permitiendo ajustar decisiones de diseño con mayor seguridad.

## 4.1. Enfoque general del modelo tridimensional

El análisis se plantea como un problema tridimensional de un tramo de pavimento continúo sometido a una carga móvil. En lugar de idealizar el pavimento como una placa infinita sobre una base elástica, se representa de forma explícita la estratigrafía: una losa rígida de concreto rodillado apoyada sobre una subbase granular y, a su vez, sobre una subrasante de suelo compactado. Esta representación permite capturar la interacción entre capas y seguir la evolución de los esfuerzos con la profundidad, algo clave cuando se busca un dimensionamiento verdaderamente óptimo.

El modelo se desarrolla con técnicas de discretización propias del método de elementos finitos. El pavimento, originalmente continuo, se subdivide en un número finito de elementos hexaédricos, conectados por nodos, sobre los que se formulan las ecuaciones de equilibrio. Cada elemento "siente" las propiedades del material que representa y responde a la carga según el modelo constitutivo adoptado. ABAQUS se encarga de ensamblar estas contribuciones y resolver el sistema de ecuaciones en cada incremento de tiempo.

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

## 4.2. Variables de la simulación y configuración geométrica

Para que la simulación tenga sentido físico, el primer paso es definir con claridad sus variables. Se trabaja con tres grandes grupos: parámetros geométricos, parámetros geotécnicos y parámetros de carga. Los geométricos describen la forma del modelo: espesores de cada capa, longitud de los paños y dimensiones del dominio de análisis. Los geotécnicos recogen la respuesta mecánica de los materiales: módulo de elasticidad, ángulo de fricción, peso específico, coeficiente de Poisson, índices de vacíos y compacidad relativa. Finalmente, los parámetros de carga representan la magnitud, la forma de aplicación y la velocidad de rodadura del eje equivalente de tránsito.

La estratigrafía adoptada responde a lo que se considera una sección típica para pavimentos urbanos de CCR en la zona de estudio (ver tabla 2). El dominio completo del modelo numérico puede resumirse del modo siguiente:

**Tabla 2**

*Estratigrafía para pavimentos urbanos de CCR*

| Capa | Espesor adoptado |
|---|---|
| Subrasante compactada | 1,50 m |
| Subbase granular | 0,20 m |
| Losa de CCR | 0,20 m |

Esta configuración permite que la zona de influencia de la carga se desarrolle íntegramente dentro del modelo, sin que las condiciones de borde distorsionen la respuesta. La longitud de los paños, del orden de 19,60 m, se toma de las recomendaciones del estado del arte en pavimentos de concreto rodillado, donde se privilegian paños largos para reducir juntas y mejorar la continuidad estructural.

## 4.3. Propiedades geotécnicas y modelo constitutivo

Una vez fijada la geometría, la atención se dirige a los materiales. La subrasante y la subbase se describen mediante parámetros geotécnicos que incluyen ángulo de fricción interno ($\varphi$), módulo de elasticidad (E), coeficiente de Poisson (v), peso específico ($\gamma$), compacidad relativa y límites de vacíos (emin y emax). La losa de concreto rodillado se caracteriza también con un módulo de elasticidad y un v propios de materiales cementantes

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

densamente compactados, junto con su peso específico y parámetros que permiten aproximar su comportamiento pseudo-rígido sobre el conjunto granular.

Para la respuesta de los suelos se adopta un modelo constitutivo de tipo Mohr–Coulomb, ampliamente utilizado en simulaciones triaxiales y reconocido como representativo del comportamiento de materiales granulares en un amplio rango de tensiones. Lautenschläger (2010), por ejemplo, muestra que este modelo reproduce de forma razonable la envolvente de rotura y la rigidez secante de suelos sometidos a carga monotónica, lo que respalda su uso en pavimentos donde la subrasante trabaja esencialmente a compresión y corte.

La losa de CCR se idealiza, en cambio, como un material predominantemente elástico lineal dentro del rango de servicio, coherente con la práctica habitual en el diseño de pavimentos rígidos. Este supuesto se justifica porque el objetivo es analizar el comportamiento bajo cargas de tránsito que no deben llevar al concreto a estados de fisuración generalizada, sino mantenerse dentro de un dominio de deformaciones relativamente pequeñas. De esta forma, el modelo combina la plasticidad friccional de las capas granulares con la elasticidad del concreto, capturando la esencia de la interacción suelo–losa.

### 4.4. Construcción del modelo en ABAQUS

La implementación en ABAQUS sigue una secuencia de pasos coherente con el flujo clásico de preprocesamiento, procesamiento y posprocesamiento. En una primera fase, mediante ABAQUS/CAE se construyen las “partes” del modelo: subrasante, subbase y losa, cada una con su propia sección y propiedades asignadas. A partir de esas partes se genera un ensamblaje tridimensional donde las capas se apilan en el orden correcto y se definen las superficies de contacto que gobernarán su interacción.

El mallado constituye un momento clave. Se emplean elementos hexaédricos con interpolación lineal, buscando un equilibrio entre precisión y tiempo computacional. Una malla demasiado fina aumentaría innecesariamente el costo de cálculo; una demasiado gruesa podría pasar por alto gradientes importantes de esfuerzo cerca del contacto rueda–pavimento o en la interfaz losa–subbase. Por eso, la densidad de elementos se refina en las zonas de mayor

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

interés, como el entorno directo de la carga, y se permite un tamaño algo mayor hacia los límites del dominio.

En cuanto a los módulos de cálculo, ABAQUS/Standard se utiliza para resolver el problema cuasiestático y dinámico incremental, mientras que ABAQUS/Viewer se reserva para la interpretación de resultados: campos de tensiones, deformaciones, desplazamientos y gráficas de variación con la profundidad. Esta división facilita un trabajo ordenado: primero se "construye" el modelo, luego se "hace correr" la simulación y, finalmente, se "lee" lo que el pavimento cuenta a través de sus respuestas.

### 4.5. Contactos, fricción y condición de contorno

El vínculo entre las capas no se limita a apoyos simples. Las superficies de contacto se modelan mediante una formulación superficie–superficie, en la que una de las caras se define como "maestra" y la otra como "esclava". Esta elección garantiza que no se produzcan penetraciones numéricas indeseadas de la losa sobre la subbase, y permite activar propiedades tangenciales y normales que representan el deslizamiento limitado y la adherencia parcial entre capas.

Para la componente tangencial del contacto se adopta el método de penalidad ("Penalty Method"), utilizando un modelo de fricción isotrópica compatible con la formulación Mohr–Coulomb. En términos sencillos, la fuerza de corte máxima que pueden transmitir las interfaces se calcula como $\tau cri = \mu \cdot pc$, donde $\mu$ es un coeficiente de fricción efectivo y $pc$ la presión normal de contacto. Cuando la demanda de corte supera ese umbral, el modelo permite cierto deslizamiento controlado, lo cual refleja mejor la realidad que una adherencia perfecta.

Las condiciones de contorno completan el cuadro. En los bordes laterales se restringen desplazamientos horizontales para evitar movimientos rígidos no deseados, mientras que en la base de la subrasante se impiden desplazamientos verticales, representando la continuidad del terreno subyacente. Estas restricciones, combinadas con la longitud suficiente del dominio, permiten que la región central se comporte como si formara parte de un pavimento mucho más extenso.

### 4.6. Modelación de la carga y de la rodadura del eje equivalente

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

La carga aplicada corresponde a un eje equivalente de 8,2 toneladas, coherente con los criterios de diseño de pavimentos urbanos en el Perú. En el modelo, este eje no se representa como una única fuerza puntual, sino como una presión distribuida sobre el área de contacto de la huella de la llanta, lo que acerca la simulación al comportamiento real del neumático sobre la losa de CCR.

La aplicación de la carga se realiza en dos etapas. Primero, se incrementa progresivamente la magnitud de la presión hasta alcanzar el valor de diseño, siguiendo una función temporal lineal definida por una curva amplitud–tiempo. Este procedimiento evita choques numéricos bruscos y deja que las tensiones se "asienten" antes de iniciar la rodadura. Después, en un segundo paso, se simula el movimiento del eje a lo largo de la superficie del pavimento, nuevamente controlado por una función amplitud–tiempo que define la velocidad de avance.

Para describir este desplazamiento se define un punto de referencia ubicado en el centro de la huella de la rueda. El movimiento prescrito de ese punto arrastra consigo la carga, de manera que la presión aplicada "viaja" sobre la losa según el patrón de rodadura. Gracias a este enfoque, el modelo captura la evolución de los esfuerzos y deformaciones a medida que la rueda se aproxima, pasa y se aleja de cada punto de interés del pavimento.

### 4.7. Puntos de observación y paths de análisis

Para leer los resultados con sentido estructural, no basta con generar nubes de colores en la pantalla. Es necesario elegir cuidadosamente dónde y cómo observar el pavimento. La revisión de la bibliografía sobre pavimentos rígidos indica que los mayores esfuerzos y deformaciones suelen concentrarse en la parte media de la losa bajo la acción de un eje individual. Por ello, los análisis se focalizan en esa región, trazando ejes verticales o "paths" que atraviesan, en una misma línea, la losa, la subbase y la subrasante.

A lo largo de cada path se obtiene el perfil de deformación vertical en diferentes instantes del tiempo, coincidiendo con posiciones específicas del eje de carga. De este modo, es posible construir gráficas de "profundidad vs deformación" que muestran

cómo las deformaciones son máximas en la superficie y van disminuyendo hasta volverse prácticamente nulas alrededor de 1,20 m de profundidad. Estas curvas permiten verificar la eficiencia con que la estructura del pavimento disipa las cargas hacia el terreno, y sirven como insumo para contrastar distintas alternativas de espesor y rigidez.

El análisis de los esfuerzos sigue una lógica similar. Se diferencian tensiones de tracción y compresión en la fibra inferior de la losa, identificando los estados más críticos que podrían conducir a fisuración o fatiga. Con ayuda del posprocesador, se localizan los máximos y se comparan con las capacidades del CCR estimadas en capítulos anteriores. De esta forma, el modelo numérico y el diseño de materiales dialogan, completando el ciclo de diseño.

### 4.8. Criterios para el dimensionamiento óptimo

Todo este esfuerzo de modelación tendría poco sentido si no se conectara con decisiones concretas de diseño. Por eso, el criterio de dimensionamiento óptimo no se limita a “resistir la carga”, sino que combina varios requisitos: que las deformaciones en la losa y en las capas inferiores se mantengan dentro de rangos admisibles, que las tensiones de tracción en la fibra inferior del CCR no superen su capacidad a fatiga y que los desplazamientos sean compatibles con un comportamiento confortable y seguro para el usuario.

A partir de estos parámetros estructurales se contrastan distintas configuraciones, evaluando también su impacto en costos y tiempos de construcción. El análisis numérico permite así comparar el pavimento de CCR con alternativas convencionales, mostrando que, para secciones geométricas equivalentes, el concreto rodillado puede ofrecer ahorros significativos de costo directo (del orden del 27 %) y reducciones muy marcadas en los plazos de ejecución, cercanas al 80 %, sin sacrificar desempeño estructural.

De manera que, la metodología presentada en este capítulo convierte al método de elementos finitos y a ABAQUS en aliados del diseño de pavimentos urbanos de CCR. A través de un modelo tridimensional cuidadosamente construido, se consigue observar lo que en la obra permanece oculto: cómo se distribuyen los

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

esfuerzos, cómo se deforma el pavimento y qué combinación de espesor y materiales ofrece la mejor respuesta. En el capítulo siguiente, estos resultados se traducirán en recomendaciones concretas para el diseño y la toma de decisiones en proyectos reales del Valle del Mantaro y contextos similares.

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

# Capítulo 5

## Resultados estructurales y evaluación económica del pavimento de CCR

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

Cuando el modelo numérico del capítulo anterior se pone en marcha, el pavimento “habla” a través de sus deformaciones, esfuerzos y, finalmente, de sus costos y tiempos de ejecución. Este capítulo recoge esa voz y la traduce en resultados que permiten entender qué tan bien responde la losa de concreto compactado con rodillo frente al tránsito real y qué implicancias tiene su adopción en términos económicos para las vías urbanas del Valle del Mantaro.

## 5.1 Esfuerzos y deformaciones en el paquete estructural

El punto de partida es el comportamiento estructural del pavimento cuando el eje equivalente de 8,2 toneladas rueda sobre la superficie. El modelo tridimensional se centró en la zona media de la losa, ya que la revisión de la bibliografía y los propios resultados numéricos confirman que allí se concentran los mayores esfuerzos y deformaciones. Para estudiar este comportamiento se definieron ejes verticales o “paths” que recorren, en línea recta, la losa, la subbase y la subrasante, permitiendo seguir cómo cambia la respuesta del sistema con la profundidad.

En estos paths se evaluaron las deformaciones verticales en distintos instantes, coincidiendo con posiciones específicas de la rueda a lo largo de la losa. Las curvas obtenidas muestran un patrón claro: las deformaciones son máximas en la superficie de rodadura y disminuyen gradualmente conforme se avanza hacia el interior del paquete estructural. A aproximadamente 1,20 m de profundidad, las deformaciones se vuelven prácticamente nulas, lo que indica que la mayor parte de la energía aplicada por la carga se ha disipado dentro de la estructura del pavimento.

Este gradiente de deformaciones confirma que la sección estratificada adoptada —losa de CCR, subbase granular y subrasante compactada— está cumpliendo su función de repartir la carga hacia capas inferiores. La losa asume el contacto directo con la rueda, pero no actúa sola: transmite esfuerzos a la subbase, que a su vez los difunde hacia la subrasante. En las gráficas de “profundidad vs deformación vertical” se aprecia cómo, salvo pequeñas diferencias ligadas al instante de carga, los distintos ejes analizados tienden a presentar formas similares, con ligeras variaciones debidas a que, en cada incremento de tiempo, la rueda no se encuentra exactamente en el mismo punto de referencia.

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

El análisis de los esfuerzos complementa esta lectura. Las tensiones se interpretan con el criterio clásico de compresión positiva y tracción negativa, concentrando la atención en la fibra inferior de la losa, que es la zona más sensible a la fatiga y a la aparición de fisuras. Allí se observa cómo, antes de que la rueda llegue al centro de análisis, predominan estados de tracción; una vez que la carga se sitúa sobre el punto considerado, los esfuerzos pasan a compresión; y, a medida que el eje se aleja, el estado vuelve a invertir su signo. Esta alternancia compresión–tracción es típica del comportamiento de una placa sometida a cargas móviles y constituye una prueba de coherencia del modelo.

En el conjunto del paquete estructural, la tendencia general es que tanto esfuerzos como deformaciones se atenúan con la profundidad, en línea con lo que describen los modelos clásicos de pavimentos rígidos. El aporte específico del concreto rodillado aparece en la forma en que la losa, gracias a su alta densidad y a su rigidez, contribuye a reducir la demanda sobre la subbase y la subrasante. En términos de diseño, estos resultados respaldan la validez del espesor de 20 cm adoptado, al comprobarse que las deformaciones máximas en superficie y las tensiones en la fibra inferior se mantienen dentro de rangos compatibles con un comportamiento seguro a lo largo de la vida útil prevista.

## 5.2 Comparación de costos: CCR frente a concreto convencional

Una vez verificado que el pavimento funciona estructuralmente, la pregunta inevitable es cuánto cuesta hacerlo realidad. Para responderla, se elaboró un análisis comparativo entre dos alternativas: un pavimento rígido de concreto convencional y un pavimento de concreto compactado con rodillo, ambos con el mismo espesor de losa (20 cm) y desarrollados sobre el mismo tramo urbano de referencia.

Los presupuestos incluyen trabajos preliminares, partidas de pavimento rígido y costos asociados como gastos generales, utilidad, impuestos y supervisión. En el caso del concreto convencional, el costo total del proyecto asciende a S/ 68 714 624,11, considerado como el 100 % de la referencia. Para el concreto rodillado, el costo total se reduce a S/ 50 269 469,58, lo que representa solo el 73 % del planteamiento convencional. La diferencia se traduce en un ahorro del 27 % a favor del CCR, manteniendo las mismas dimensiones geométricas de la losa.

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

Buena parte de esta reducción proviene de las partidas directamente vinculadas a la ejecución del pavimento. El concreto convencional exige encofrados, desencofrados, mayor tiempo de curado y procedimientos constructivos más fragmentados, lo que incrementa la mano de obra y el uso de materiales auxiliares como la madera para moldes y las juntas de dilatación. En cambio, el CCR se coloca de manera continua, sin necesidad de encofrar paño a paño, y aprovecha equipos de extendido y compactación que permiten altos rendimientos diarios. El cuadro comparativo de costos muestra cómo partidas como "encofrado y desencofrado" desaparecen en el caso del concreto rodillado, y otras, como el esparcido y compactado, se vuelven más eficientes gracias al uso intensivo de rodillos vibratorios.

La tabla 3 resume el contraste global entre ambos planteamientos, manteniendo el espesor de 20 cm para la losa:

**Tabla 3**

*Contraste entre concreto convencional versus compacto con rodillo*

| **Tipo de pavimento** | **Costo total del proyecto (S/.)** | **Porcentaje relativo** |
|---|---|---|
| **Concreto convencional** | 68 714 624,11 | 100 % |
| **Concreto compactado con rodillo** | 50 269 469,58 | 73 % |

Esta diferencia no es menor si se piensa en escalas de proyecto habituales para vías urbanas. Un ahorro del 27 % en el costo total de la obra puede significar, por ejemplo, la posibilidad de extender el pavimento a más cuadras con el mismo presupuesto, o de liberar recursos para intervenciones complementarias en drenaje, señalización o seguridad vial. Desde la óptica de las entidades ejecutoras, el CCR se presenta, así como una alternativa capaz de alinear desempeño estructural con responsabilidad fiscal.

## 5.3 Variación de tiempos de ejecución

El tiempo de obra es otra dimensión decisiva en entornos urbanos. No solo influye en los costos indirectos, sino también en el impacto cotidiano sobre vecinos, comercios y tráfico. Por ello, se realizó un análisis detallado de la duración de las principales partidas para ambos métodos constructivos, manteniendo el mismo alcance de proyecto.

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

El resultado global es contundente. Para el pavimento de concreto convencional, el tiempo total de ejecución por kilómetro se estima en 137 días, valor que se toma como 100 % de referencia. En el caso del concreto compactado con rodillo, el plazo se reduce a solo 27 días, es decir, aproximadamente una quinta parte del tiempo original. Expresado en términos porcentuales, el CCR representa el 20,01 % del tiempo del método convencional, lo que implica una reducción cercana al 80 % en la duración de la obra.

Este salto en productividad no se debe a un único factor, sino a una combinación de cambios en la forma de construir. Las actividades de encofrado y desencofrado, que en el concreto tradicional demandan 93 días para el tramo de referencia, desaparecen en el esquema con CCR, ya que la losa se ejecuta como una franja continua. El esparcido y compactado del material también se beneficia del uso de rodillos, pasando de 11 días en el caso convencional a 4,57 días para el pavimento rodillado. Incluso en partidas como el transporte de mezcla, la posibilidad de optimizar la logística reduce el tiempo de 34 a 22,89 días.

En conjunto, estos ajustes permiten pasar de una obra que se prolonga por más de cuatro meses a otra que puede completarse en poco menos de uno, siempre considerando los mismos espesores y tramos. Para una ciudad que necesita mantener la continuidad de su vida cotidiana, la diferencia entre 137 y 27 días de intervención es enorme: menos desvíos, menos polvo, menos interrupciones en el acceso a viviendas y comercios. La mejora no solo se percibe en los cuadros de programación, sino en la experiencia diaria de quienes conviven con la obra.

## 5.4 Síntesis e implicancias para el diseño y la gestión

Los resultados de este capítulo permiten trazar una imagen coherente del pavimento urbano de concreto compactado con rodillo. Desde el punto de vista estructural, el modelo numérico muestra que las deformaciones se concentran en la superficie y se atenúan de forma progresiva, hasta volverse prácticamente nulas a 1,20 m de profundidad, lo que indica que el paquete estructural elegido distribuye adecuadamente las cargas de tránsito. La losa de 20 cm de CCR, apoyada en la subbase granular y en la subrasante compactada, mantiene esfuerzos y deformaciones dentro de márgenes compatibles con un comportamiento seguro.

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

Desde la perspectiva económica, la comparación entre métodos constructivos evidencia que, manteniendo el mismo espesor de losa, el concreto rodillado reduce el costo total del proyecto a un 73 % del esquema tradicional, generando un ahorro del 27 %. A esto se suma una disminución drástica de los plazos de ejecución: el tiempo se contrae al 20,01 % del requerido por el concreto convencional, con una reducción del 79,99 % en días de obra. En términos prácticos, estos resultados sugieren que el CCR permite construir más, más rápido y con menor inversión directa, sin renunciar a la calidad estructural.

Para los responsables de diseñar y gestionar infraestructuras urbanas, estas conclusiones abren un campo de posibilidades. Adoptar pavimentos de concreto compactado con rodillo implica revisar especificaciones, capacitar equipos y adaptar procesos de contratación, pero ofrece como recompensa la oportunidad de contar con vías más durables, ejecutadas en plazos mucho más breves y con un uso más eficiente de los recursos públicos. En regiones como el Valle del Mantaro, donde las necesidades de pavimentación son amplias y los presupuestos limitados, este equilibrio entre desempeño y economía resulta especialmente atractivo.

El siguiente capítulo tomará estos resultados como base para proponer una guía práctica de diseño y construcción, dirigida a proyectistas, autoridades y profesionales que deseen incorporar el concreto compactado con rodillo en sus proyectos urbanos. Allí se traducirán los hallazgos estructurales y económicos en recomendaciones concretas, criterios de dimensionamiento y pautas para la toma de decisiones en obra, con el objetivo de que el CCR pase de ser una alternativa prometedora a convertirse en una herramienta habitual dentro del repertorio técnico de la región.

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

# Capítulo 6

## Guía práctica, conclusiones y proyecciones futuras

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

A lo largo de estas páginas hemos visto cómo el concreto compactado con rodillo deja de ser una curiosidad técnica para convertirse en una alternativa real para las vías urbanas del Valle del Mantaro. Hemos recorrido sus fundamentos, sus materiales, la lógica del modelo numérico y los resultados estructurales y económicos. Este último capítulo busca hacer algo muy concreto con todo ello: ponerlo al alcance de quienes toman decisiones y diseñan proyectos, y al mismo tiempo mirar hacia adelante, hacia lo que todavía queda por aprender y mejorar.

Más que un cierre, lo que sigue es una invitación a usar el conocimiento desarrollado como herramienta de trabajo. Por eso, el capítulo se organiza en torno a una guía práctica de diseño y construcción de pavimentos urbanos de CCR, complementada con conclusiones sintéticas, recomendaciones para la gestión pública y algunas líneas de investigación futura. La intención es que el lector pueda pasar de la teoría a la acción con criterios claros, pero también con una conciencia honesta de los alcances y límites de lo que aquí se propone (Ramos, 2020).

Diseñar un pavimento de concreto compactado con rodillo no es, en el fondo, muy distinto de diseñar cualquier otra estructura: se trata de conocer el medio en el que trabajará, caracterizar el material con que se construirá y verificar que, bajo las cargas previstas, su respuesta se mantenga dentro de márgenes seguros. La diferencia es que, en este caso, el CCR nos obliga a mirar al mismo tiempo con los ojos del ingeniero de suelos y del tecnólogo del concreto, y a integrar ambas miradas en un solo proceso de diseño (Pitta Rocha y Hurtado Diaz, 1994).

Un primer paso imprescindible es el estudio del terreno. Antes de pensar en espesores de losa, conviene entender cómo se comporta la subrasante. Ensayos de clasificación, límites de consistencia y pruebas de CBR permiten fijar el “piso” sobre el cual trabajará el pavimento. En el Valle del Mantaro, esta caracterización ha mostrado que, con una subrasante adecuadamente compactada y respaldada por una subbase granular, es posible trabajar con losas de CCR de 20 cm de espesor que satisfacen las exigencias de deformación y esfuerzo frente a un eje equivalente de 8,2 toneladas, tal como se observó en el modelo numérico (Ramos, 2020).

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

Una vez conocidas las condiciones del suelo, el segundo paso es el diseño de la mezcla. Aquí, la experiencia sugiere moverse dentro de rangos típicos de CCR: contenidos de cemento de 60 a 240 kg/m³, agua en torno a 110–130 litros por metro cúbico y densidades secas cercanas a 2560 kg/m³, superiores a las de un concreto convencional (Curasi, 2016). No obstante, cada proyecto debe validar estas cifras en laboratorio, ajustando la dosificación en función de los agregados locales, la energía de compactación disponible y las resistencias requeridas. No hay una receta única: hay un marco de referencia que debe dialogar con la realidad de cada cantera y de cada planta de producción.

El tercer paso consiste en el dimensionamiento estructural. Aquí es donde las herramientas numéricas muestran todo su valor. A partir de las propiedades mecánicas de la mezcla diseñada y de las características de la subrasante y la subbase, es posible construir un modelo de pavimento —ya sea con métodos clásicos de diseño de losas o mediante elementos finitos— que permita verificar tensiones en la fibra inferior, deformaciones y desplazamientos. Los resultados presentados en capítulos previos han mostrado que las deformaciones se atenúan hasta volverse prácticamente nulas a unos 1,20 m de profundidad, lo que indica que la sección considerada contribuye de manera eficiente a disipar la carga (Ramos, 2020).

Finalmente, cualquier propuesta de diseño debería contrastarse con una evaluación económica básica. El análisis comparativo indica que, manteniendo el mismo espesor de losa, el pavimento de CCR puede reducir el costo total de la obra en torno a un 27 % y el tiempo de ejecución en casi un 80 %, frente a un pavimento de concreto convencional con encofrado tradicional (Ramos, 2020). Integrar esta información desde el inicio del diseño permite no solo garantizar seguridad y durabilidad, sino también optimizar el uso de los recursos disponibles.

## 6.1 Lecciones y recomendaciones para la construcción y el control de calidad

Los resultados mostrados no hablan solo a los ingenieros; también envían un mensaje claro a quienes gestionan recursos y planifican la ciudad. Un pavimento urbano de CCR bien diseñado y construido puede significar menos intervenciones de mantenimiento, menos interrupciones de tránsito y más años de

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

servicio con un costo total menor. Para municipalidades y gobiernos regionales con presupuestos limitados, esta opción tiene un atractivo evidente.

Sin embargo, su adopción suele requerir cambios en las formas habituales de contratar y especificar obras. Las normas técnicas deben reconocer explícitamente el concreto compactado con rodillo como alternativa válida para pavimentos urbanos, definiendo requisitos de materiales, criterios de aceptación y procedimientos de control. Además, las bases de licitación deberían incluir metodologías de medición y pago que reflejen las particularidades del CCR, como la compactación por franjas continuas y la ausencia de encofrados tradicionales. Sin estos ajustes, es difícil que las empresas constructoras se animen a incorporar nuevas tecnologías en sus propuestas (Ríos, 2004).

Por otra parte, la formación y capacitación de equipos técnicos juega un rol decisivo. Tanto en las unidades formuladoras y ejecutoras de proyectos, como en las empresas de supervisión y las contratistas, resulta útil difundir experiencias exitosas, ofrecer talleres y generar espacios donde se compartan buenas prácticas. En la medida en que el CCR deje de ser percibido como algo experimental y se convierta en una opción conocida y confiable, su incorporación en los planes viales resultará mucho más natural.

El mejor diseño puede fracasar si la ejecución descuida los detalles. En el caso del concreto compactado con rodillo, el control de la humedad y de la compactación es tan decisivo que merece, por sí solo, una atención especial. Más que en otros pavimentos, aquí no hay mucho margen para improvisar; pequeñas variaciones de agua o de energía aplicada pueden marcar la diferencia entre una losa sólida y un pavimento lleno de vacíos.

En la fase de producción, resulta recomendable establecer protocolos que aseguren la regularidad de la mezcla: dosificación rigurosa de cemento y agua, control continuo de la humedad de los agregados, verificación de la temperatura del material y del ambiente. La experiencia acumulada en obras de presas de CCR ha mostrado que este tipo de procedimientos reduce la dispersión de resultados y permite que lo que se ensaya en laboratorio se replique con fidelidad en campo (Curasi, 2016). Trasladar esa disciplina al contexto urbano es clave para aprovechar plenamente las ventajas del material.

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

Durante la colocación, el orden importa. Extender la mezcla con equipos adecuados, respetando espesores de capa compatibles con la energía de compactación del rodillo, evita segregaciones y asegura una superficie uniforme. La compactación debería realizarse con un número de pasadas definido previamente en pruebas de campo, hasta alcanzar densidades cercanas a las logradas en los ensayos Proctor modificados. Una forma práctica de controlar este aspecto es mediante ensayos in situ de densidad y contenido de aire, que permitan ajustar la operación cuando las condiciones varían.

No hay que olvidar el curado. Aunque el CCR tiene menos agua que un concreto convencional, sigue siendo un material cementante que necesita mantener la humedad en sus primeras edades para desarrollar totalmente su resistencia. El uso de membranas de curado, riego controlado o coberturas adecuadas ayuda a evitar fisuras por retracción y a mejorar la durabilidad. En pavimentos urbanos, donde a menudo se busca habilitar el tránsito en plazos cortos, encontrar el equilibrio entre curado suficiente y apertura al uso es un aspecto que conviene definir con claridad en las especificaciones técnicas (Pitta Rocha y Hurtado Diaz, 1994).

## 6.2 Limitaciones, alcances y líneas de investigaciones futuras

Aunque los resultados estructurales y económicos son alentadores, es importante reconocer sus límites. El modelo numérico se ha centrado en un tipo particular de sección de pavimento, con espesores específicos de subrasante, subbase y losa. Si bien estos parámetros representan de manera razonable las condiciones del Valle del Mantaro, no agotan la diversidad de suelos, climas y tránsitos que pueden encontrarse en otras regiones. En contextos con subrasantes muy blandas, niveles freáticos altos o climas extremos, puede ser necesario recalibrar el diseño y repetir el análisis para nuevas configuraciones.

Además, el análisis estructural se ha concentrado en el comportamiento frente a cargas instantáneas representativas del tránsito. Aspectos como la fatiga a largo plazo, la acción combinada de lluvias intensas y ciclos de humedad–sequedad, o el efecto de cambios de temperatura entre el día y la noche, merecen estudios más específicos. La extrapolación directa de los resultados a escenarios con condiciones muy diferentes debe

hacerse con cautela, siempre apoyada en ensayos complementarios o en nuevas simulaciones adaptadas.

Del lado económico, los costos y tiempos comparados responden a una estructura de precios y a una logística determinadas. Cambios significativos en el valor del cemento, en la disponibilidad de equipos de compactación o en los costos de mano de obra pueden modificar las ventajas relativas del CCR frente a otras soluciones. Aun así, la magnitud de los ahorros observados —del orden del 27 % en costo directo y del 80 % en tiempo de ejecución— indica que la tendencia general difícilmente se invierta por completo en condiciones similares (Ramos, 2020).

Lejos de cerrar el tema, los resultados abren una serie de preguntas que vale la pena seguir explorando. Una de ellas tiene que ver con la fatiga del CCR bajo tránsito pesado. Conocer mejor la relación entre número de repeticiones de carga, nivel de tensión en la fibra inferior y aparición de fisuras permitiría afinar aún más los criterios de espesor y, eventualmente, proponer secciones diferentes para vías de baja, media y alta intensidad de tránsito.

Otra línea interesante es la vinculación entre el CCR y soluciones superficiales complementarias. En algunos casos, puede ser conveniente combinar una losa de concreto rodillado con una capa delgada de mezcla asfáltica, destinada a mejorar la textura y el confort de rodadura. Analizar cómo se comporta esta combinación en climas andinos, tanto desde el punto de vista estructural como de mantenimiento, ofrecería alternativas aún más versátiles para el diseño urbano (Pitta Rocha y Hurtado Diaz, 1994).

El estudio de comportamiento frente al agua —ya sea por lluvia, por riego o por infiltración desde redes subterráneas— resulta especialmente pertinente en ciudades donde el drenaje urbano presenta deficiencias. Evaluar la respuesta del CCR frente a ciclos prolongados de humedad, la posible pérdida de soporte en subrasantes saturadas y la interacción con sistemas de drenaje longitudinal y transversal son temas que podrían nutrir futuros trabajos y enriquecer las decisiones de diseño.

El concreto compactado con rodillo ofrece la oportunidad de pensar las vías urbanas del Valle del Mantaro desde una lógica distinta: más cercana a la eficiencia, a la rapidez constructiva y a la durabilidad. No se trata de una solución milagrosa, ni de una

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

respuesta válida para todos los casos, pero sí de una alternativa sólida, técnicamente respaldada y económicamente atractiva cuando se la aplica con criterio y responsabilidad.

Este libro ha querido acompañar al lector en el tránsito desde el contexto y la motivación, pasando por la teoría y la modelación, hasta llegar a una propuesta práctica de dimensionamiento y gestión. Si algo queda como idea central, quizá sea esto: que las calles que recorremos cada día pueden diseñarse y construirse con un poco más de ciencia, un poco más de cuidado y una mirada más amplia sobre el territorio que las sostiene. El concreto rodillado es solo una de las herramientas posibles para lograrlo; el compromiso con una infraestructura urbana más justa, eficiente y duradera es la tarea que permanece abierta.

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

## EPÍLOGO

Llegados a este punto del camino, el concreto compactado con rodillo ya no es solo una definición técnica ni una alternativa más en una lista de opciones. Es una posibilidad real para transformar la forma en que concebimos y construimos las vías urbanas, especialmente en territorios como el Valle del Mantaro, donde cada sol invertido en infraestructura tiene un peso muy concreto en la vida diaria de las personas.

A lo largo del libro hemos visto cómo convergen tres dimensiones que no deberían separarse: el comportamiento estructural del pavimento, la naturaleza de los materiales que lo componen y las condiciones económicas y de tiempo que enfrentan las entidades que lo ejecutan. Cuando estas piezas se miran en conjunto, el CCR aparece como una solución capaz de ofrecer pavimentos más densos, mejor aprovechamiento del cemento, menor duración de las obras y costos totales más contenidos, sin sacrificar seguridad ni durabilidad.

Nada de lo presentado aquí pretende ser palabra final. Los modelos pueden refinarse, las mezclas pueden optimizarse y nuevos escenarios de tránsito y clima exigirán ajustes y verificaciones adicionales. Pero sí puede afirmarse que existe ya una base sólida para que equipos técnicos, autoridades locales y comunidad académica dialoguen con más información y menos intuición sobre el papel del concreto rodillado en la infraestructura urbana.

Si este libro logra que una ingeniera, un planificador o un estudiante miren de otra manera el pavimento que recorren cada día, y se pregunten cómo podría diseñarse mejor, habrá cumplido su cometido esencial: abrir preguntas, ofrecer herramientas y acompañar, con datos y argumentos, la búsqueda de ciudades más coherentes, eficientes y habitables.

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40

## REFERENCIAS


Aylas Fernandez, K. J., & Mancha Canchero, M. G. (2025). *Steel Fibres Wirand para mejorar la resistencia de flexión de una carpeta asfáltica del pavimento flexible-Huancavelica*. https://repositorio.continental.edu.pe/gestion/bitstreams/b90862d0-c892-4249-ad74-f8f237b390b6/download

Castro Vélez, L. A., & Moll Martínez, R. (2024). Concreto compactado con rodillo como alternativa de pavimentación para la red vial de Portoviejo. *Polo del Conocimiento*, *9*(8), 619-636. https://doi.org/10.23857/pc.v9i8.7716

Curasi Curasi, P. (2016). *Diseño del concreto compactado con rodillo (a región de Junín* [Tesis de grado] Universidad Nacional Del Altiplano. http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/5340

Hernandez Quiñonez, J. B., & Sajamí Satalaya, D. (2024). Evaluación del costo y tiempo de ejecución entre los pavimentos: rígidos, flexibles y semirrígidos en el jr. los vencedores, distrito de la banda de shilcayo, provincia y departamento de San Martín–2021. https://repositorio.ucp.edu.pe/items/ae4e6319-f692-4a87-a64c-9f71688aa922

Lozano Morales, D. A. (2023). *DISEÑO DE PAVIMENTO RIGIDO PARA LA CARRERA 45ª ENTRE LA CALLE 134D Y 137* (Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA). https://repository.umng.edu.co/server/api/core/bitstreams/2c18e915-9f37-48b7-8609-1febc616fb71/content

Mamani Rodrigo, E. (2024). *Evaluación de los factores que originan el deterioro en pavimentos con adoquines de concreto en la Ciudad de Puno 2023*. https://repositorio.uancv.edu.pe/items/fa022329-6c7e-4c23-a7b3-dfe33f9c6bbc

Ramos Piñas, D. (2020). *Análisis numérico para dimensionamiento óptimo del concreto rodillado en vías urbanas del Valle del Mantaro*. Universidad Peruana Los Andes. https://hdl.handle.net/20.500.12848/1588

Rocha Pitta, M., & Hurtado Diaz, P. S. (1994). *Estado-del-arte de los pavimentos de concreto compactado con rodillo*. ASOCEM, Asociacion de Productores de Cemento.

Sánchez Sabogal, F. (2014). *Factores que han contribuido al deterioro prematuro de los pavimentos asfálticos en las carreteras nacionales*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

https://repositorio.escuelaing.edu.co/entities/publication/5abafbf0-2074-4bd4-a830-95ffc60fc105
Vilcapaza Zeballos, E. (2024). Evaluación superficial del pavimento rígido mediante el método pavement condition index del Jirón Francisco Pizarro de la Ciudad de Juliaca, año 2023. https://repositorio.uancv.edu.pe/items/8bbef4ec-35a2-4afd-ac0e-0857512c2de9
Zirión, R. (2007). Análisis comparativo de costos entre el pavimento flexible y el pavimento rígido. https://biblio.ingenieria.usac.edu.gt/tesis/T8282.pdf

**FINANCIACIÓN**
Ninguna

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

## USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Uso de IA para la mejora de coherencia en la redacción del texto de creación propia.

## INFORMACIÓN ADICIONAL

La responsabilidad ética y jurídica sobre los contenidos presentados en esta publicación recae exclusivamente en sus autores, incluyendo el cumplimiento de la normativa vigente en materia de propiedad intelectual y derechos de autor. La editorial queda eximida de cualquier compromiso derivado de dichos contenidos y de su uso por parte de terceros.

Derecho de autor © 2026 David Ramos Piñas, Jefrin Marlon Silva Murillo y Javier Amador Navarro Veliz

Este texto está protegido por una licencia Creative Commons de Atribución 4.0.



Usted es libre de compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato, así como de adaptarlo, remezclarlo, transformarlo y crear a partir de él para cualquier propósito, incluso con fines comerciales. Sin embargo, debe cumplir con la condición de atribución, lo que significa que debe otorgar el crédito correspondiente a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia e indicar si se han realizado modificaciones. Puede hacerlo en cualquier formato razonable, pero no de manera que sugiera que cuenta con el respaldo del licenciante o que recibe algún beneficio por el uso de la obra.

Resumen de licencia – Texto completo de la licencia

ISBN: 978-628-97459-1-7
DOI: 10.69821/PLAGCIS.40

Esta obra se publicó en primera edición durante el año 2026, como resultado de la colaboración entre instituciones comprometidas con la difusión del conocimiento académico.

El proceso editorial fue desarrollado por el Fondo Editorial PLAGCIS, perteneciente a la Plataforma de acción, gestión, e investigación social S.A.S. Sincelejo, Sucre, con el respaldo y auspicio del Sello Editorial de la Institución de Educación Superior del Litoral, Barranquilla, Atlántico.

La edición se finalizó en Sincelejo, Colombia, consolidando el compromiso interinstitucional por la divulgación de investigaciones de alto impacto en el ámbito educativo y cultural

https://doi.org/10.69821/PLAGCIS.40