



# Sistemas de reparación estructural de pavimento rígido con inyecciones de resinas epóxicas

Rigid pavement structural repair systems with epoxy resin injections

Sistemas de reparaçãõ estrutural para pavimentos rígidos com injeções de resina epoxídica

**Ariane Andreina Calizaya Romero**

[a\\_riane\\_7@hotmail.com](mailto:a_riane_7@hotmail.com)

<https://orcid.org/0000-0002-5374-085X>

Universidad del Valle, Sucre-Bolivia

Artículo recibido el 12 de agosto 2021, / Aceptado el 22 de octubre 2021 / Publicado el 15 de enero 2022

## RESUMEN

El objetivo de este estudio fue proponer el uso de sistemas de reparación estructural para fisuras en pavimento rígido, a través de la aplicación de aditivo usando inyecciones de resina epóxica. Se trató de un estudio experimental prospectivo de corte longitudinal cuya metodología comprende seis pasos. Los materiales, condiciones físicas y la normativa responden al contexto de la ciudad de Sucre, Bolivia y la necesidad de reparación de una avenida de esta ciudad. Como resultado se probó que la resina epóxica es altamente adherente, la resistencia a la reflexión es superior a 28 días que a 10 días de curado; la comparación de resultados obtenidos entre la primera y segunda ruptura demuestran poca variación. Las correcciones que usaron los sistemas de reparación permitieron demostrar que son una solución viable, óptima y eficaz para corregir estas patologías, constituyéndose en una alternativa para evitar la demolición innecesaria de las losas que presentan fallas.

**Palabras clave:** Pavimento; Resina; Reparación estructural; Hormigón; Losa

## ABSTRACT

The objective of this study was to propose the use of structural repair systems for cracks in rigid pavement, through the application of additive using epoxy resin injections. It was a prospective, longitudinal-cut experimental study whose methodology includes six steps. The materials, physical conditions and regulations respond to the context of the city of Sucre, Bolivia and the need to repair an avenue in this city. As a result, it was proven that the epoxy resin is highly adherent, the resistance to reflection is higher at 28 days than at 10 days of curing; the comparison of results obtained between the first and second rupture shows little variation. The corrections that the repair systems used allowed to demonstrate that they are a viable, optimal and effective solution to correct these pathologies, becoming an alternative to avoid the unnecessary demolition of the slabs that present failures.

**Key words:** Pavement; Resin; Structural repair; Concrete; Slab

## RESUMO

O objetivo deste estudo era propor a utilização de sistemas de reparaçãõ estrutural para fissuras em pavimentos rígidos, através da aplicação de um aditivo utilizando injeções de resina epoxídica. Este foi um estudo experimental longitudinal prospectivo com uma metodologia de seis etapas. Os materiais, as condições físicas e os regulamentos respondem ao contexto da cidade de Sucre, Bolívia, e à necessidade de reparar uma avenida nesta cidade. Como resultado, a resina epóxi provou ser altamente aderente, a resistência à reflexão é maior aos 28 dias do que aos 10 dias de cura; a comparação dos resultados obtidos entre a primeira e a segunda ruptura mostra pouca variaçãõ. As correções utilizando os sistemas de reparaçãõ permitiram demonstrar que são uma soluçãõ viável, óptima e eficaz para corrigir estas patologias, constituindo uma alternativa para evitar a demoliçãõ desnecessária de lajes falhadas.

**Palavras-chave:** Pavimento; Resina; Reparaçãõ estrutural; Betão; Laje; Reparaçãõ estrutural; Betão

## INTRODUCCIÓN

El pavimento rígido está compuesto de materiales duraderos de comportamientos predecibles, su durabilidad exige pocas reparaciones, resiste al contacto con gasolina o aceites lubricantes que continuamente depositan los vehículos, diseñados para las propiedades de subrasante, condiciones de tráfico, efectos medio ambientales a los que estará sometido durante su vida en servicio, la resistencia del pavimento rígido va aumentando con la edad hasta los 28 días, aparte que no presenta deformaciones con altas temperaturas y su característica más importante es distribuir las cargas de los vehículos en áreas mayores.

El desempeño del pavimento está íntimamente ligado al comportamiento de los materiales que lo componen ante la acción de las cargas externas (Juárez y Rico, 1995). Independientemente del tipo de pavimento, una adecuada respuesta estructural y funcional del pavimento depende de la calidad de los materiales, un proceso constructivo responsable y un programa de mantenimiento oportuno (Sánchez, 2001). Los avances tecnológicos permitieron contar con un material que resiste cargas pesadas de manera eficiente y duradera, una solución altamente usada es la construcción de caminos pavimentados (Solas y Giani, 2010). El pavimento rígido es el conjunto de capas que como función estructural transmite adecuadamente los esfuerzos a la subrasante, de modo que esta no se deforme de manera perjudicial y proporcione una superficie de rodadura uniforme diseñada para un volumen de vehículos (Brito, 2003).

Países como Bolivia implementan en gran cantidad este tipo de pavimento. En este país la ciudad de Santa Cruz fue la primera en utilizar esta técnica en gran escala, con más de dos millones de metros cuadrados hasta el año 2001 (Condori y Méndez, 2018). En la actualidad los gobiernos municipales realizan proyectos de pavimentación, posibilitando a los conductores tener mayor comodidad, seguridad y velocidad al conducir por zonas urbanas.

En la ciudad de Sucre, capital del departamento de Chuquisaca, la Avenida Juana Azurduy de Padilla fue construida el año 1970 con el objetivo primordial de implementar una vía pavimentada que comunicara a la ciudad de Sucre con el Aeropuerto. Esta vía fue concebida con un ancho total de pavimento de 8 m y 5.48 km de longitud. En agosto de 2014 el Gobierno Autónomo Municipal de Sucre inició la ejecución del Proyecto "Ampliación Avenida Juana Azurduy de Padilla" (Gobierno Autónomo Municipal de Sucre, 2016). El objetivo fundamental de este proyecto fue implementar un carril adicional paralelo a la avenida existente de 3.9 km de longitud ubicada entre el sector de ingreso al Condominio Bancario y el Aeropuerto Juana Azurduy de Padilla, transformándola en una doble vía, y mejorando integralmente su condición estructural, funcional y estética. Para alcanzar este objetivo, se consideró la construcción de un nuevo pavimento rígido de 20 cm de espesor sobre plataforma estabilizada.

Sin embargo, durante la ejecución del proyecto, al estar el concreto expuesto a múltiples influencias, se identificaron

inconvenientes relacionados con un deterioro temprano en algunas losas de pavimento rígido (fisuras estructurales y de retracción) que requirió la formulación de soluciones inmediatas, lo cual implicará tiempo y costos adicionales. Desde un punto de vista general, se considera que los defectos de construcción son subsanables, con lo que se puede recuperar la capacidad estructural propia de los elementos.

El objetivo de este estudio fue proponer el uso de sistemas de reparación estructural para fisuras en pavimento rígido, a través de la aplicación de aditivo usando inyecciones de resina epóxica en la Avenida Juana Azurduy de Padilla de la ciudad de Sucre. Este objetivo responde a una de las misiones de la ingeniería, brindar soluciones óptimas a bajos costos, que satisfagan los requerimientos deseados en las obras de construcción civil. Los resultados de laboratorios y su respectiva interpretación son documentos de referencia para profesionales del área, constituyéndose en base teórica y empírica sobre sistemas no destructivos que garanticen la reparación y protección estructural de losas de pavimento rígido, planteando nuevas soluciones.

## MÉTODO

La investigación tuvo alcance experimental y corte longitudinal prospectivo. Se realizó la demostración práctica de la reparación de fisuras en vigas de hormigón, se elaboraron los ensayos según la norma AASHTO T-97 o ASTM C 78 para determinar la resistencia de las vigas de hormigón reparada. El estudio empezó evaluando las propiedades del uso

de aditivos puente de adherencia epóxicos<sup>1</sup>, demostrando una solución para la reparación estructural en pavimentos rígidos y cuyos agentes reflejan una buena adherencia al concreto, como también de resistencia a cargas sometidas.

Se realizaron los ensayos respectivos para los distintos agregados, una dosificación por el método del Instituto Americano del Concreto ACI (ACI, 1987; ACI, 2005), se fabricaron probetas de hormigón simple que fueron sometidas a esfuerzos de tracción simulando los efectos que producen las cargas en las losas de pavimento rígido, dichas probetas fueron fisuradas a un estado que permite la reparación de fisuras, así como también cuando llega a una rotura completa debido al esfuerzo de carga aplicada, dichos ensayos de laboratorio fueron realizados según las normas establecidas en la norma boliviana (Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón, 2017a; Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón, 2017b).

La técnica de la observación y las pruebas experimentales realizadas a las probetas de hormigón durante el proceso de la investigación, permitieron visualizar mediante el análisis de los resultados el grado de incidencia del aditivo Sikadur 52 CL, determinando las variaciones de resistencia a la flexión en las probetas, lo cual proporciona evidencia empírica para determinar si es una solución factible para la reparación de losas de pavimento rígido, aplicado a la avenida Juana Azurduy de Padilla.

Se realizó el estudio de los distintos componentes que comprende la mezcla

para concreto. Los agregados que se usaron para la preparación de la mezcla fueron: grava chancada de  $1\frac{1}{2}$  y gravilla chancada de  $\frac{3}{4}$ ; arena; cemento y; agua. El esquema del método para la demostración de los resultados comprende seis pasos: [1] análisis de los agregados; [2] dosificación por el método CBH; [3] elaboración de probetas de hormigón simple para cargas a flexión; [4] rotura de las probetas de hormigón a flexión; [5] reparación de las probetas usando el aditivo puente de adherencia epóxico y; [6] comparación de resultados obtenidos.

Para el análisis de los agregados finos y gruesos se realizaron los siguientes tipos de análisis: Método estándar para obtención de muestras de; piedra, grava y arena para emplear como materiales para hormigones y morteros (AASHTO D-75); Granulometría de agregados grueso y fino (AASHTO-27 y ASTM C 136); Peso específico y absorción de agregados gruesos (AASHTO T-85 ASTM C 127) y finos (AASHTO T-84 ASTM C 128); Determinación del peso unitario de los agregados (AASHTO T-19/T19M y ASTM C 29/C 29M); Desgaste en la máquina de Los Ángeles (AASHTO T-96 y ASTM C 131).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se identificaron 54 losas de hormigón de la avenida Juana Azurduy de Padilla con defectos relacionados principalmente con la formación de fisuras transversales y por reacción. Las losas presentan fisuras transversales y por retracción, de 1 mm a 3 mm de espesor, con desempeño estructural de losas de pavimento rígido afectado en grado leve. Para alcanzar el objetivo de la investigación se estudiaron las

propiedades resultantes del uso de aditivos puente de adherencia epóxicos (SIKADUR 52 CI), demostrando una solución para la reparación estructural en pavimentos rígidos, con buena adherencia al concreto; con base en el esquema de seis pasos explicados previamente y desglosado líneas abajo.

**Análisis de los agregados.** A continuación, se detallan los análisis realizados para los agregados gruesos y finos. Método estándar para obtención de muestras de piedra, grava y arena para emplear como materiales para hormigones y morteros (AASHTO D-75), destinado a investigar y obtener criterios de aceptación o rechazo de la fuente de suministro o yacimiento e inspección de materiales en el lugar de trabajo. Los agregados (grava, gravilla y arena) con los que se realizó el ensayo fueron proporcionados por la empresa Concretc de la ciudad Sucre. El material que almacenan en esta planta se usa para la fabricación de mezclas de hormigón para la pavimentación de calles.

### **Granulometría de agregados grueso y fino (AASHTO: ensayo T 27 y ASTM: Ensayo C 136).**

El objetivo de este ensayo fue encontrar la distribución granulométrica por medio de los tamices con aberturas cuadradas. Para realizar el ensayo primero se procedió a cuartear la muestra, tanto para el agregado grueso (grava y gravilla) como para el agregado fino (arena), se puso a secar a en el horno, posteriormente se dejó enfriar a temperatura ambiente para luego pesar la cantidad requerida. Se determinó el peso del agregado determinado por el tamaño máximo de las partículas del

agregado grueso (1 pulgada), por lo cual se pesaron 10000 gr. de agregado grueso. Posteriormente se prepararon los tamices en el orden que indica la norma ASTM C - 33 bandas granulométricas para hormigón de cemento portland.

En la parte superior de la Tabla 1 se presenta la gradación aplicada a la muestra de 10000 gr de grava, con base en la especificación NB-598-91 para el agregado grueso. En la parte inferior se presenta la gradación aplicada a la muestra de 1500 gr de arena.

**Tabla 1.** Valores de granulometría agregado grueso y fino.

Agregado	Abertura Tamices		Peso retenido c/tamiz	% Retenido c/tamiz	% Retenido Acumulado	% que Pasa c/tamiz
	Pulg	mm				
Grava	3"	76.2	0	0	0	100
	2 1/2"	63.5	0	0	0	100
	3/4"	19.1	4880	48.8	48.8	51.2
	3/8"	9.5	3450	34.5	83.3	16.7
	N° 4	4.76	1450	14.5	97.8	2.2
	Base			40	0.4	98.2
Arena	N° 4	4.76	15.1	3.02	3.02	96.98
	N° 8	2.38	25.26	5.052	8.072	91.928
	N° 16	1.19	103.69	20.738	28.81	71.19
	N° 30	0.6	137.82	27.564	56.374	43.626
	N° 50	0.3	109.21	21.842	78.216	21.784
	N° 100	0.15	75.88	15.176	93.392	6.608
	N° 200	0.075	19.25	3.85	97.242	2.758
Base			12.4	2.48	95.872	4.128

De los resultados obtenidos de la granulometría del agregado grueso se obtuvo el tamaño máximo del agregado de 1", el módulo de fineza 7.21 y un porcentaje de pérdida de 0.8%. En la granulometría del agregado fino se obtuvo un módulo de fineza de 2.68 y el porcentaje de pérdida del 0.28%. Los resultados obtenidos muestran que la curva granulométrica ambos agregados, está dentro de la banda granulométrica según la norma ASTM ensayo C-33.

**Peso específico y absorción de agregados gruesos (AASHTO: ensayo T-85, ASTM: ensayo C 127) y finos (AASHTO: ensayo T-84, ASTM: ensayo C 128).** Se realizaron ensayos en laboratorio para determinar los pesos específicos para ambos agregados. En cada caso, los valores promedio fueron usados para el diseño de la dosificación de hormigón, los valores son: peso específico agregado grueso 2.62 gr/cm<sup>3</sup> con 1.10% de absorción y; peso específico agregado fino 2.60 gr/cm<sup>3</sup> con 1.42% de absorción.

**Determinación del peso unitario de los agregados (AASHTO: ensayo T-19/T19M y ASTM: ensayo C 29/C 29M).** Mediante los ensayos realizados en laboratorio se pudo determinar los pesos unitarios compactado y suelto para la grava y la arena. Los promedios de los tres distintos pesos unitarios obtenidos para la grava son: 1.525 gr/cm<sup>3</sup> (suelta) y 1.684 gr/cm<sup>3</sup> (varillada). Los promedios de los tres distintos pesos unitarios obtenidos para la arena son: 1.4917 gr/cm<sup>3</sup> (suelta) y 1.6532 gr/cm<sup>3</sup> (varillada).

**Desgaste en la máquina de Los Ángeles (AASHTO: ensayo T-96 y ASTM: ensayo C 131).**

El objetivo de este ensayo fue determinar el índice de desgaste del árido que se relaciona con la resistencia a la abrasión por medio mecánico y también a la capacidad de resistencia de los hormigones ya que con estos fueron fabricados.

**Tabla 2.** Gradación de agregados grueso y fino.

Tamaño de tamiz (aberturas cuadradas)		Gradación y peso de la muestra de ensayo, gr.			
Pasa	Retenido	A	B	C	D
1 ½	1"	1250625	-	-	-
1"	¾"	1250625	-	-	-
¾"	½"	1250610	2500610	-	-
½"	¾"	1250610	2500610	-	-
¾"	¼"	-	-	2500610	-
¼"	N° 4	-	-	2500610	-
N° 4	N° 8	-	-	-	5000610
<b>Total</b>		<b>5000610</b>	<b>5000610</b>	<b>5000610</b>	<b>5000610</b>

Para realizar el ensayo se determinó primero la gradación del agregado grueso que se detalla en la Tabla 2. Una vez definida la carga de desgaste (5.000.626,00 gr para 12 esferas, gradación A), se procedió a pesar el agregado grueso que posteriormente fue lavado con un chorro de agua para eliminar el polvo adherido y puesto a secar en el horno a una temperatura constante de 110 °C. Una vez seco el material, se procedió a colocar en la máquina de desgaste de Los Ángeles,

su puso en funcionamiento a una velocidad de 30 a 33 revoluciones por minuto durante 500 revoluciones. Al finalizar el ensayo el agregado grueso se descargó de la máquina y se hizo una separación usando el tamiz número 12, el material retenido del tamiz se lavó, se procedió a meter al horno hasta que se secó y posteriormente se procedió a pesar. Se usaron 5000 gr del agregado grueso según se especifica en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Peso del agregado grueso utilizado.

PASA	RETENIDO EN	PESO UTILIZADO	UNIDADES
1 1/2	1"	1250	gr.
1"	3/4"	1250	gr.
3/4"	1/2"	1250	gr.
1/2"	3/8"	1250	gr.

Los datos del ensayo de laboratorio desgasten de los ángeles son: 5000 gr de material utilizado (P); 3720 gr retenidos en tamiz número 12; 1280 diferencia en gr entre el peso inicial y el peso retenido del tamiz número 12 (Pt).

$$\text{Porcentaje de desgaste} = \frac{P_f}{P} * 100$$

$$\% \text{ DESGASTE} = \frac{1280}{5000} * 100$$

$$\% \text{ DESGASTE} = 25.60\%$$

Se pudo determinar que la dureza del agregado es de 74.40% y sufrió un desgaste de 25.60% según la ASTM C131 el porcentaje máximo de desgaste no debe ser superior al 40% por lo tanto el agregado es apto para emplearlo en el diseño de mezclas de hormigón.

### Diseño de mezcla para concreto método del código boliviano del hormigón (CBH)

El código boliviano de hormigón recomienda realizar ensayos característicos en laboratorio aplicando métodos de dosificación como primera aproximación a las proporciones de mezcla a ser aprobadas

(Vargas, 2003). En este sentido, se determinaron las cantidades de grava, arena, cemento y agua, según la resistencia media, para elaborar una mezcla de concreto optimizando la cantidad de material.

Determinación de la resistencia media fcm

$$f_{cm} = 1,35 * f_{ck} + 15 \text{ [ Kg/cm}^2 \text{ ]}$$

Para:

$$f_{ck} = 250 \text{ [ Kg/cm}^2 \text{ ]}$$

$$f_{cm} = 352.5 \text{ [ Kg/cm}^2 \text{ ]}$$

Determinación de la relación Agua - Cemento

$$C/A = (K * f_{cm}) + 0,5$$

Siendo K = Coeficiente que depende del tipo de áridos y del cemento

$$K = 0.003$$

$$C/A = 1.5575$$

$$A/C = 0.6421$$

Se determinó un tamaño máximo de 25.400 mm, consistencia plástica entre 3-5, A=204.600 Ltr.

Cantidad de agua por M3 de Hormigón

$$C = 1.5575 * A$$

$$C = 318.665 \text{ [Kg / M}^3 \text{] H}^\circ$$

Composición granulométrica

30 mm ----- 5.687  
 25.4 mm ----- m  
 25 mm ----- 5.512

**m = 5.526**

Módulo de la arena = 2.680

Módulo de la grava = 7.190

Ecuación para determinar el porcentaje que entra de arena y grava en la mezcla (cálculo de proporciones).

$$\frac{m_r}{100} X + \frac{m_g}{100} Y = m$$

$$X + Y = 100$$

Resolviendo el sistema:

X = 41.32 %

Y = 58.67 %

A =	204.60	Lts
C =	318.66	gr
P1 =	2.600	gr/cm <sup>3</sup>
P2 =	2.620	gr/cm <sup>3</sup>
P =	3.10	gr/cm <sup>3</sup>

Donde:

G1 Y G2 = Pesos de la arena y de la grava en kg/m<sup>3</sup> de hormigón

A = Litros de agua por m<sup>3</sup> de Hormigón

C = Peso del cemento en kg/m<sup>3</sup> de hormigón

P1 = Peso específico arena

P2 = Peso específico grava

P = Peso específico cemento

Cantidad necesaria de arena y grava

$$A + \frac{C}{P} + \frac{G1}{P1} + \frac{G2}{P2} = 1025$$

G1/G2 = x/y = (55.15) / (44.85)

Luego:

G1 =	774.483 Kg/M <sup>3</sup>	H arena
G2 =	1099.684 Kg/M <sup>3</sup>	H grava

Resumen de materiales para 1 M<sup>3</sup> de H<sup>o</sup>:

Cemento	319	Kg
Arena	774	Kg
Grava	1100	Kg
Agua	205	Lts

<u>C</u>	<u>Ar</u>	<u>G</u>	<u>A</u>
C	C	C	C
319	774	<u>1100</u>	<u>205</u>
319	319	319	319
1.0000	2.4304	3.4509	0.6421

Aproximado:

CEMENTO	ARENA	GRAVA	AGUA
1	2.4	3	0.6

Se obtuvo la cantidad de material para 1 m<sup>3</sup> de hormigón, no obstante, se tomó en cuenta que al momento de formar la mezcla hormigón el contenido de agua se ve afectado por el contenido de humedad del agregado grava y arena. Si estos están secos el aire absorberá agua y disminuirá la relación a/c y la trabajabilidad. Por lo tanto, aportarán

agua al contenido de la mezcla de hormigón, aumentando la relación a/c, la trabajabilidad y disminuyendo la resistencia. Se tomaron en cuenta estos efectos se y se realizó el ajuste mostrado a continuación.

Correcciones por humedad:

Contenido humedad de la arena = 6.12%

Contenido humedad de la grava = 1.68%

Absorción de la arena = 1.10%

Absorción de la grava = 1.42%

Donde:

% W = Contenido de humedad

% a = Porcentaje de Absorción

$$\text{Peso húmedo} = \text{peso seco} * \left( 1 + \frac{\%W - \%a}{100} \right)$$

Peso húmedo arena =	813.347	Kg
Peso húmedo grava =	1102.516	Kg
Diferencia de arena =	38.864	Kg
Diferencia de grava =	2.832	Kg

Peso total de agua = peso agua  
- (dif. arena + dif. agua)

Peso total de agua = 162.905 Lts.

La cantidad de material requerida para 1m<sup>3</sup> de hormigón es: 319 Kg de cemento, 813 kg de arena, 1103 kg de grava y 163 Lts de agua.

## Preparación de la mezcla de hormigón

Se fueron introduciendo los materiales grava, arena, agua y cemento a la mezcladora, hasta que la mezcla este totalmente distribuida. A continuación, en el molde de la probeta se realizó el vaciado del concreto en tres capas cada una de ellas de 10 cm de altura aproximadamente según el siguiente detalle: se compacto la primera capa usando la Varilla lisa con extremo redondeado, mediante 25 inserciones; se golpeó suavemente alrededor del molde con el martillo para liberar las burbujas de aire que hayan podido quedar atrapadas en el interior de la mezcla; el mismo procedimiento se realizó para la segunda y tercera capa, con la diferencia que en la última capa o tercera capa se niveló el exceso de mezcla con el enrasador para tener una superficie lisa y plana. Las probetas fueron almacenadas 24 horas antes de retirar el molde. Una vez desmoldadas se procedió a curar las probetas, se colocaron en agua en un contenedor tipo estanque. Para realizar el ensayo de resistencia del hormigón se dejaron las probetas en agua durante 28 días según la norma AASHTO: Ensayo T 22 – ASTM C 39.

## Resistencia a la compresión en cilindros de hormigón

Las probetas cilíndricas se sometieron a ensayo de acuerdo con AASHTO ensayo T 22 - ASTM ensayo C 39, Método estándar de prueba de resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de concreto. Para ensayar las probetas se determinó un tiempo de secado de 7 y 28 días antes de ser ensayadas,

se determinado la tolerancia de 6 horas o 3.6% con 7 días de edad de muestra y 20 horas o 3% con 28 días de edad de muestra.

Una vez transcurrido el tiempo de secado se registraron sus dimensiones.

Posteriormente se sometieron a presión en placa de alojamiento esférico. Los resultados se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Resultados de la resistencia a compresión en cilindros de hormigón.

Resistencia a compresión a los 7 Días (kg/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a compresión para los 28 Días (kg/cm <sup>2</sup> )
196.93	265.04
189.46	254.99
198.51	267.18

Según se observa en la Tabla 4, el promedio de resistencias de las tres probetas a compresión es de 262 Kg/cm<sup>2</sup> por encima de  $f'c$  250 Kg/cm<sup>2</sup>, lo que indicó la aceptación del diseño de la dosificación de mezcla de hormigón.

### Resistencia a la flexión en vigas de hormigón

Una vez elaboradas las vigas de hormigón, se procedió a realizar el ensayo de determinación de la resistencia a la flexión en

vigas de hormigón según la norma AASHTO T 97 – ASTM C 78, con el fin de obtener resultados más precisos se fabricaron 6 vigas de hormigón cuya carga de rotura se muestra en la Tabla 5. Las mismas se usaron para ser reparadas con el aditivo Sikadur 52 un sistema de dos componentes, los resultados obtenidos se usaron para la comparación de la de resistencia entre el hormigón sin reparación frente a la reparación de las vigas de hormigón usando el aditivo.

**Tabla 4.** Resultados de la resistencia a flexión en vigas de hormigón para un H-25 (primer ensayo).

N° Viga	Edad (Días)	Ancho (cm)	Alto (cm)	Longitud (cm)	Carga de Rotura	Luz Libre (cm)	Resistencia a Flexión (kg / cm <sup>2</sup> )	Observaciones
1	28	15	15.1	54.9	2850	46	38.33	Rotura en la zona de 2/3 de la viga. Rotura de la viga a totalidad
		15	15.1	55				
		15	14.9	55				
2		15	15	54.9	2880	46	39.43	Rotura en la zona de 2/3 de la viga. Se observa que la rotura no fue a totalidad.
		15	15	55				

N° Viga	Edad (Días)	Ancho (cm)	Alto (cm)	Longitud (cm)	Carga de Rotura	Luz Libre (cm)	Resistencia a Flexión (kg / cm <sup>2</sup> )	Observaciones
3	28	15.1	15	55	2800	46	38.16	Rotura en la zona de 2/3 de la viga. Rotura de la viga a totalidad
		15	15	55				
		15.1	14.9	55				
4	28	15	14.9	54.9	2740	46	37.51	Rotura en la zona de 2/3 de la viga. Rotura de la viga a totalidad
		15	15	55				
		15	15	55				
5	28	14.98	15	54.9	2740	46	37.45	Rotura en la zona de 2/3 de la viga. Rotura de la viga a totalidad
		14.9	15	55				
		15	15.1	55				
6	28	15	15.1	55	2860	46	38.47	Rotura en la zona de 2/3 de la viga. Rotura de la viga a totalidad

La Tabla 5 presenta los resultados de la primera rotura en primer ensayo a flexión en vigas de hormigón H-25. Se determinó la presencia fisuras por retracción y falta de hidratación.

### Reparación de las vigas de hormigón utilizando puente de adherencia epóxicos sikadur 52 CL

Se detalla el procedimiento de la reparación y los resultados obtenidos de resistencia usando el aditivo Sikadur 52 como reparador estructural. Este aditivo es de reacción rápida, por lo tanto, se dispone de un lapso de tiempo limitado de aplicación. En el transcurso del mezclado de los componentes se produce una reacción química de tipo

exotérmico (desarrolla calor), acelerando el proceso de endurecimiento. Puede ser aplicado a grietas de ancho máximo de 5 mm, con temperatura de sustrato mínima 5° C y máxima de 30° C, a hormigones de edad mínima de 3 a 6 semanas.

Se usó una viga de hormigón de 15 cm x 15 cm de sección y 55 cm de longitud, la cual presento una fisura en las cuatro caras de su sección, como paso inicial para la reparación de dicha viga se procedió a sellar tres caras seleccionadas de la viga una inferior y dos lados laterales dejando la superficie superior libre para la aplicación de aditivo, posteriormente se esperó a que el material sellante haya endurecido en un tiempo aproximando de 24 horas.

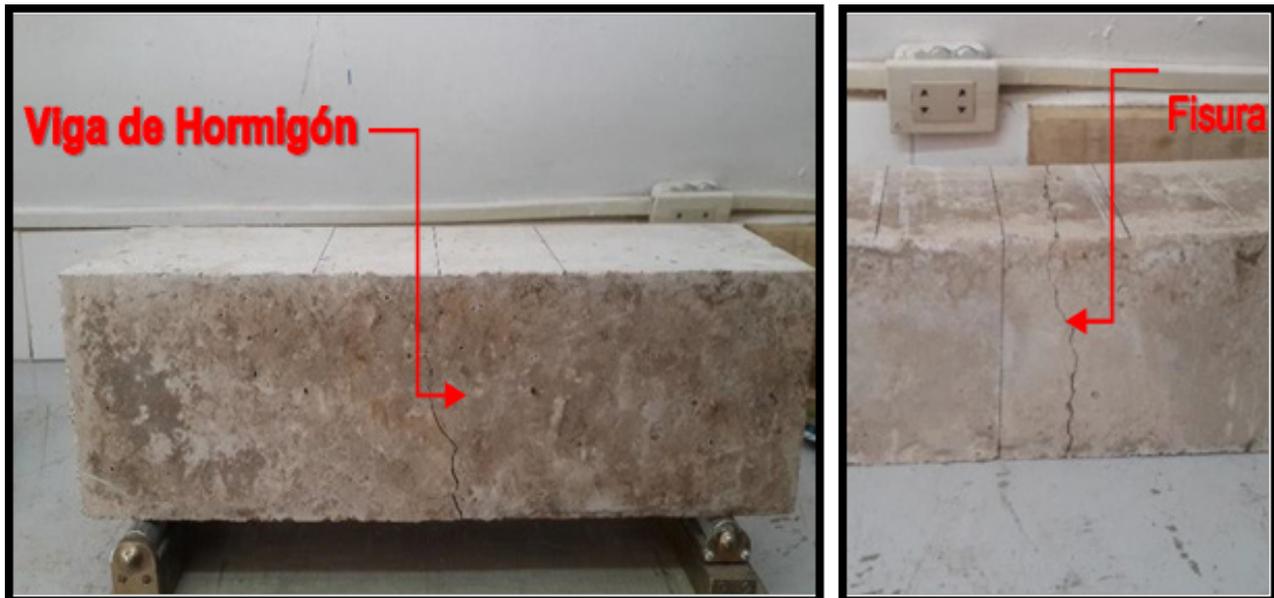


Figura 1. Fisura en la viga de hormigón.



Figura 2. Inyección por gravedad.

Para obtener los resultados de resistencia, según la norma Aashto T 97 – Astm C 78, aplicando el aditivo como alternativa para su reparación, se realizó el ensayo a los 10 días y

28 días posteriores a su reparación estructural. En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos de las resistencias empleando la reparación con el aditivo Sikadur 52 CL.

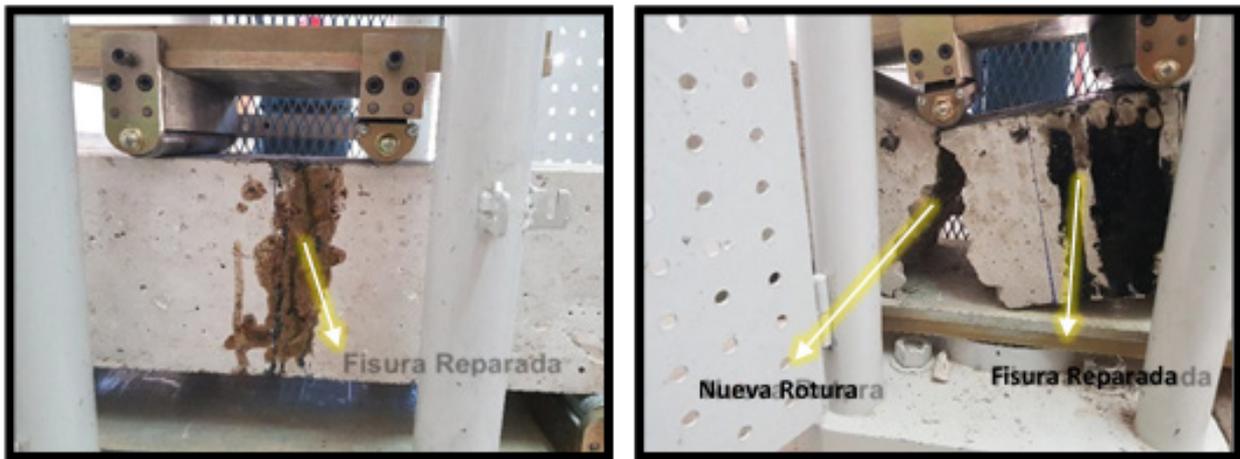
**Tabla 6.** Resultados de la resistencia a flexión en vigas de hormigón para un H-25 usando Sikadur 52 CL (segundo ensayo).

N° Viga	Edad (Días)	Ancho (cm)	Alto (cm)	Longitud (cm)	Carga de Rotura	Luz Libre (cm)	Resistencia a Flexión (kg / cm <sup>2</sup> )	Observaciones
1	10	15	15.1	55	2460	46	32.87	Rotura a 2/3 de la viga, la rotura no ocurrió en el lugar donde se aplicó el aditivo, se presenta a 8 cm. de la primera rotura.
		14.9	15.2	54.9				
		15	15.2	55				
2	10	15.1	14.9	55	3530	46	48.01	Rotura a 2/3 de la viga, la rotura no ocurrió en el lugar donde se aplicó el aditivo, se presenta a 10 cm. de la primera rotura.
		15.1	15	54.9				
		15.1	15	55				
3	10	15.1	15	55	2380	46	32.44	Rotura a 2/3 de la viga, la rotura no ocurrió en el lugar donde se aplicó el aditivo, se presenta a 11 cm. de la primera rotura.
		15	15	55				
		15.1	14.9	55				
4	28	15	14.9	54.9	2360	46	32.24	Rotura a 2/3 de la viga, la rotura no ocurrió en el lugar donde se aplicó el aditivo, se presenta a 6 cm. de la primera rotura.
		15.1	15	55				
		15	15	55				
5	28	14.9	15.1	55	2690	46	36.2	Rotura a 2/3 de la viga, la rotura no ocurrió en el lugar donde se aplicó el aditivo, se presenta a 1 cm. de la primera rotura.
		14.98	15.2	54.9				
		14.9	15.1	55				
6	28	15	15.1	55	2750	46	36.99	Rotura a 2/3 de la viga, la rotura no ocurrió en el lugar donde se aplicó el aditivo, se presenta a 5 cm. de la primera rotura.
		15	15.1	55				
		15	15.1	55				

Con la ayuda de material fotográfico se describirá lo ocurrido en el ensayo de la resistencia a flexión en vigas de hormigón usando el aditivo Sikadur 52 CL. Se ensayaron 6 vigas de hormigón, realizándose el mismo procedimiento de reparación y se ejecutó el ensayo de resistencia a la flexión de las vigas

de hormigón. Donde se presentaron 3 casos diferentes.

Caso 1, se presentó en las vigas 1, 3, 5 y 6; se observa intacta el área de reparación presentando así la nueva fisura adyacente a la rotura inicial, el área reparada no sufrió cambio o fisuras nuevas (ver Figura 3).



**Figura 3.** Caso 1: rotura adyacente a la fisura reparada.

Caso 2, se presenta en la viga número 2, no existe rotura completa a lo largo de la

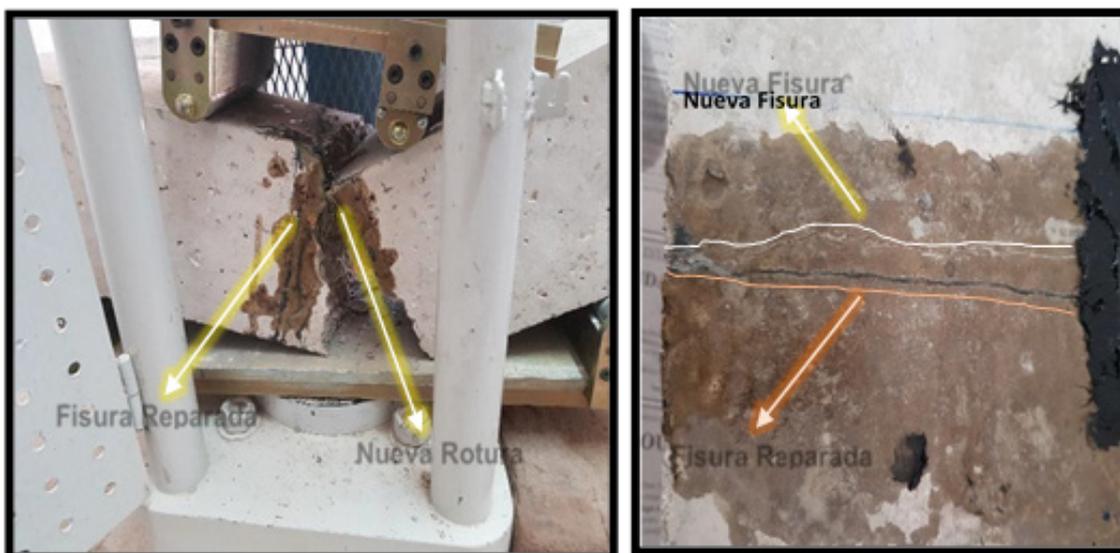
sección, la fisura se detuvo 2.0 cm antes de llegar completamente a la base (ver Figura 4).



**Figura 4.** Caso 2: viga fracturada parcialmente.

Caso 3; se presentó para la viga número 4, distinto tipo de rotura, la nueva rotura se encontró mucho más cerca del área reparada (ver Figura 5). El sello en la primera fisura no fue correctamente aplicado, al ejercer la carga de fisura busco el punto más débil, es ahí

donde se originó la falla. Se observó también como el aditivo Sikadur 52 CL presentó una alta adherencia al hormigón, siendo así que el área de reparación donde se presentó la fisura siguió adherida al hormigón sin presentar fisuras.



**Figura 5.** Caso 3: rotura cerca al área de reparación.

**Tabla 7.** Comparación de resultados obtenidos de resistencia en vigas.

N° Prisma	Resistencia a Flexión 10 Días (kg / cm <sup>2</sup> )		N° Prisma	Resistencia a Flexión 28 Días (kg / cm <sup>2</sup> )	
	Primera Rotura	Segunda Rotura		Primera Rotura	Segunda Rotura
1	38.33	33.09	1	37.51	32.72
2	39.43	48.33	2	37.45	36.76
3	38.16	32.44	3	38.47	36.99

Según se observa en la Tabla 7, en general la resistencia a la segunda rotura es inferior a la primera, excepto en el ensayo número 2 de 10 días, en el que la resistencia a la segunda rotura fue superior en 8.90 kg / cm<sup>2</sup>.

## Discusión

Se debe realizar a una evaluación para identificar si la alternativa propuesta es óptima para la reparación para las fisuras presentadas en las losas de la avenida Juana

Azurduy de Padilla, con el fin de evitar soluciones destructivas.

### **Vigas ensayadas a 10 días de su reparación**

Si bien se observa que los resultados de resistencia de la segunda rotura, en las cuales se realizó la reparación usando el aditivo, muestran menores resultados comparados con los de la primera rotura, esto no quiere decir que el aditivo como tal no funciona, ya que la diferencia entre una y otra no es significativa, se observa también que en el ensayo número 2, se presentó un caso especial donde la resistencia de la primera rotura es menor a comparación de la segunda rotura. Se debe tomar en cuenta los aspectos que serán detallados a continuación por cada caso que se presentó.

**Caso 1:** Cuando se realizó el ensayo a flexión para las vigas de hormigón 1 y 3 a los 10 días de ser reparadas, se observó que la nueva fisura se presentó a una distancia determinada entre 6cm a 10 cm de la fisura inicial. Al aplicar la carga de rotura con el equipo, no se observó ninguna alteración en la zona reparada, por lo que la nueva rotura no se presentó donde se realizó la reparación si no, busco otro lugar de falla adyacente a la rotura inicial reparada. En cuanto a la resistencia del hormigón frente a la reparación con el aditivo Sikadur 52 se observa una diferencia promedio de 5.51 Kg/cm<sup>2</sup> la cual no es excesiva, tomando en cuenta que una de las funciones principales del aditivo es de devolver su capacidad estructural, se debe tomar en cuenta que las

vigas fueron ensayadas a partir de los 10 días de su reparación.

**Caso 2:** Para viga de hormigón número 2, se observó que la rotura no fue completa y las fisuras presentadas fueron de 1 mm a 2 mm, por lo que al realizar la reparación el sello se empleó en dos caras y no así en tres como en los anteriores casos, siendo favorable al momento de manipular la viga y aplicar el sello. El aditivo inyectado tuvo mayor área de penetración, cuando se observó el resultado de resistencia para esta viga de hormigón reparada fue mayor, incluso fue superior que la resistencia del hormigón solamente. Se observó también que la nueva rotura fue a 10 cm de la rotura reparada. Una buena aplicación de sello y el aditivo presentaron mejores resultados de resistencia, lo que indica que el aditivo Sikadur 52 CL si ofrece una reparación estructural, además de presentar excelente adherencia al hormigón.

### **Vigas ensayadas a 28 días de su reparación**

Se observaron que los resultados de resistencia de la segunda rotura muestran resultados próximos comparados con los de la primera rotura, esto quiere decir que el aditivo Sikadur 52 fue aumentando la resistencia de la viga reparada llegando casi a devolver los valores iniciales de la máxima resistencia que presento la viga de hormigón en el primer ensayo realizado, ya que la diferencia promedio de la carga es de 1.08 kg/cm<sup>2</sup> entre una y otra no es significativa, por lo que se establece que el aditivo si devuelve

la capacidad estructural del elemento. En el ensayo número 2 y 3, presentó el caso 1 donde la fisura se encontraba adyacente a la fisura inicial, quedando el área de reparación intacta como se explicó anteriormente.

**Caso 3:** Se presentó en la viga de hormigón número 1 una rotura cercana al área reparada, entre 1cm a 2cm de la fisura inicial. El resultado de resistencia fue más bajo comparado con la resistencia de las vigas reparadas donde la nueva rotura se presentaba más alejada, detalladas anteriormente.

Al obtener resultados diferentes, se procedió a examinar la viga de hormigón, se percibió que el sello no estaba correctamente aplicado, es por esa razón que el área de acción del aditivo se redujo, deduciendo de esta manera el causal de la baja resistencia, por lo que al aplicar la carga a la viga reparada la nueva rotura busco el lugar más débil donde originó la rotura cerca del área reparada. La incorrecta aplicación del aditivo afectó la resistencia, se observa una diferencia de 4.79 Kg/cm<sup>2</sup> entre la primera resistencia de la viga frente a la segunda resistencia obtenida. Sin embargo, la diferencia entre los resultados obtenidos no es significativa.

### CONCLUSIONES

Se propuso una solución eficiente para resolver las patologías existentes en las losas de pavimento rígido de la avenida Juana Azurduy de Padilla de la ciudad de Sucre, la solución es adecuada para losas de pavimento rígido con presencia de fisuras transversales y

por retracción, de 1 mm a 3 mm de espesor, con desempeño estructural de losas de pavimento rígido afectado en grado leve. Corresponde enfatizar que, si bien dichas fallas no son un inconveniente mayor, deben ser atendidas con el fin de garantizar la serviciabilidad de la vía. Las correcciones que usaron los sistemas de reparación permitieron demostrar que son una solución viable, óptima y eficaz para corregir estas patologías, constituyéndose en una alternativa para evitar la demolición innecesaria de las losas que presentan fallas.

Con base en la teoría se identificó que este daño en el pavimento rígido puede ser reparado usando inyecciones de resina epoxica, se buscó dicho aditivo en el mercado local y se halló el aditivo sikadur 52 el cual cumple los requerimientos necesarios, este aditivo es para inyección por gravedad o por presión en grietas, esta resina trata de un sistema de dos componentes a base de resina epóxica para reparaciones estructurales y con excelente adherencia al hormigón.

Los ensayos de resistencia a flexión en vigas de hormigón permitieron comprobar el desempeño de los sistemas de reparación a través de la aplicación de inyecciones de resina epóxica, comprobándose así que el material es útil y efectivo para reparar estas losas. Al realizar las pruebas de laboratorio para las probetas se evidenciaron las buenas características de resistencia ofrecidas por el aditivo a los 10 días de haber sido reparadas las fisuras donde se comparan las resistencias obtenidas de las vigas de hormigón sin reparar frente a las vigas de hormigón reparadas con el

aditivo Sikadur 52, devolviendo el monolitismo a las vigas de hormigón. Asimismo, al ser ensayada las vigas después de 28 días de haber sido reparadas, se evidenció el aumento de resistencia, lo que indica que el aditivo devuelve su capacidad estructural. Se observó también la alta capacidad de adherencia al hormigón demostrando que se puede adherir a fisuras de abertura reducida.

Se debe tomar en cuenta que en 5 vigas ensayadas el área de aplicación del aditivo Sikadur 52 CL se mantuvo intacta y la nueva fisura se originó adyacente a la fisura inicial, esto quiere decir también que el aditivo presenta alta adherencia al hormigón. Se estableció también que al contar con un buen sellado de las fisuras la reparación presentara mejores resultados de resistencia.

La técnica consistió en sellar la fisura en las superficies expuestas e inyectar la resina epoxi por gravedad o presión dependiendo del tipo de patología que se presenta en las losas de pavimento rígido. Sin embargo, a menos que se haya corregido la causa que originó la fisuración, es probable que vuelva a aparecer una fisura cerca de la fisura original. Es importante determinar y eliminar la causa de la fisuración. La reparación para cada caso deberá ser estudiado cuidadosamente.

Finalmente se concluyó que el aditivo Sikadur 52 si es una solución factible para la reparación estructural de las losas de

pavimento rígido de la avenida Juana Azurduy de Padilla, cumple con los parámetros establecidos para devolver a la estructura su capacidad estructural.

## REFERENCIAS

- ACI (1995). Committee 318, Building Code Requirements for Reinforced Concrete, ACI Estándar 318-95. Detroit: American Concrete Institute
- ACI (2005). Requisitos de reglamento para concreto estructural y comentario. In A. 318S-05
- Brito, A. S. A. (2003). Recomendaciones para el control del agrietamiento por retracción en muros y losas de hormigón armado. Universidad de Chile
- Condori, P. J. F., y Méndez, C. (2018). Método de evaluación de calidad del cemento en hormigón para el mercado de Bolivia. Tesis Doctoral
- Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón (2017a). Lineamientos generales para el diseño geométrico de Juntas. Recuperado 11/11/2017
- Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón. (2017b). Obtenido de [http://www.ibch.com/index.php?option=com\\_remository&Itemid=&func=startdown&id=16](http://www.ibch.com/index.php?option=com_remository&Itemid=&func=startdown&id=16)
- Juárez, B. E., y Rico Rodríguez, A. (1995). Mecánica de Suelos Teoría y Aplicación de la Mecánica de Suelos Tomo II. México, D.F.: Limusa, S.A.
- Sánchez de Guzmán, D. (2001). Tecnología del Concreto y del Mortero. Santafé de Bogotá, D.C. - Colombia: Bhander
- Solas, A. A., y Giani, D. R. (2010). Tecnología del Hormigón Avanzada. Chile: Universidad Católica de Chile