



**UNIVERSIDAD LAICA VICENTE ROCAFUERTE
DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERIA, INDUSTRIA Y
CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERIA CIVIL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

TEMA

**REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL DE PILAS MEDIANTE
ENCAMISADO CON MATERIALES COMPUESTOS FRP PARA LA
PROTECCIÓN ANTE IMPACTOS VEHICULARES EN EL PUENTE
GEMELO, JUJÁN-BABAHoyo**

TUTOR

Mgtr. ALEXIS WLADIMIR VALLE BENITEZ

AUTOR

ROMNY GABRIEL CASTRO VILLACRES

GUAYAQUIL

2025

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA	
FICHA DE REGISTRO DE TESIS	
TÍTULO Y SUBTÍTULO: Reforzamiento estructural de pilas mediante encamisado con materiales compuestos FRP para la protección ante impactos vehiculares en el puente gemelo, Jujan-Babahoyo	
AUTOR/ES: Romny Gabriel Castro Villacres	TUTOR: Valle Benítez Alexis Wladimir
INSTITUCIÓN: Universidad Laica Vicente Rocafuerte de Guayaquil	Grado obtenido: Ingeniero Civil
FACULTAD: INGENIERÍA, INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN	CARRERA: INGENIERIA CIVIL
FECHA DE PUBLICACIÓN: 2025	N. DE PÁGS: 104
ÁREAS TEMÁTICAS: Arquitectura y construcción	
PALABRAS CLAVE: Ingeniería civil, Puentes, Materiales compuestos, Análisis estructural, Reforzamiento estructural.	
RESUMEN: La presente investigación tuvo como objetivo diseñar una propuesta de reforzamiento estructural para las pilas del Puente Gemelo, ubicado en la vía Juján–Babahoyo, mediante encamisado con materiales compuestos reforzados con fibra (FRP), con el fin de mejorar su desempeño frente a impactos vehiculares. El estudio se desarrolló bajo un enfoque mixto, con alcance descriptivo y explicativo, apoyado en revisión documental, inspección estructural, encuestas y entrevistas a expertos, así como en modelación numérica de escenarios de impacto. Por otro lado, la población de análisis correspondió a las cuatro pilas principales del puente, lo que contempla la opinión de diez especialistas en ingeniería estructural y rehabilitación de puentes. Los resultados evidenciaron que las pilas en el estado actual en la que se encuentran presentan vulnerabilidad frente a impactos laterales de vehículos pesados con concentraciones críticas de esfuerzos y posibles modos de falla por flexión y corte. La modelación estructural demostró que la incorporación de encamisado con FRP incrementa en promedio un 45 % la capacidad de absorción de energía y mejora la ductilidad lo que ayuda a su vez a la reducción del riesgo de colapso local. Se seleccionó como propuesta técnica un sistema de encamisado con CFRP en configuración perimetral completa y dos capas siguiendo estrictamente	

las normativas ACI 440 y AASHTO. El diseño incorpora criterios de resistencia, durabilidad y factibilidad constructiva adaptados al contexto ecuatoriano, además se estableció un plan de implementación con fases de preparación, ejecución, inspección y mantenimiento lo cual fue acompañado de lineamientos de seguridad y sostenibilidad para garantizar la viabilidad a largo plazo. La investigación contribuye a mejorar de forma técnica la estructura existente en el uso de materiales compuestos en Ecuador, ofreciendo una alternativa innovadora y replicable para la protección y prolongación de la vida útil de infraestructuras viales críticas.

N. DE REGISTRO (en base de datos):

N. DE CLASIFICACIÓN:

DIRECCIÓN URL (Web):

ADJUNTO PDF:

SI

☒

NO

☐

CONTACTO CON AUTOR/ES:
Castro Villacres Romny Gabriel

Teléfono:
0960454197

E-mail:
rcastrov@ulvr.edu.ec

CONTACTO EN LA INSTITUCIÓN:

Dr. Marcial Sebastián Calero Amores
Teléfono: 2596500 **Ext.** 241
E-mail: mcalero@ulvr.edu.ec
Mgst. Kevin Mendoza Villacís
Teléfono: 2596500 **Ext.** 242
E-mail: kmendozav@ulvr.edu.ec

CERTIFICADO DE SIMILITUD



CERTIFICADO DE ANÁLISIS
magister

TT_2025A_CASTRO_Rev1

2%
Textos sospechosos

2% Similitudes

0% similitudes entre comillas

0% entre las fuentes mencionadas

2% Idiomas no reconocidos (ignorado)

28% Textos potencialmente generados por la IA (ignorado)

Nombre del documento: TT_2025A_CASTRO_Rev1.pdf
ID del documento: 046ba908f1404c7dc60a3e821664da8ba503082
Tamaño del documento original: 3,09 MB

Depositante: KEMIN ANGEL MENDOZA VILLACIS
Fecha de depósito: 16/9/2025
Tipo de carga: interface
Fecha de fin de análisis: 16/9/2025

Número de palabras: 19.570
Número de caracteres: 147.046

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes principales detectadas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	www.uivr.edu.ec https://www.uivr.edu.ec/wp-content/uploads/2024/02/fle_1680023077-1.docx	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (206 palabras)
2	www.dspace.espol.edu.ec Fibra de carbono en la rehabilitación de columnas y ... http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/65863	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (33 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	bibdigital.epn.edu.ec http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/1500/02342471/1/CD12853.pdf	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (40 palabras)
2	asf.io A Proposed Clamp System for Mechanical Connection of Reinforcing Steel ... https://asf.io/96ngt/download	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (28 palabras)
3	Documento de otro usuario #275460 Viene de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (17 palabras)
4	hdl.handle.net La formazione nelle competenze digitali degli studenti universita... https://hdl.handle.net/11441/175387	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (16 palabras)
5	dx.doi.org ¿Las competencias transversales se pueden aprender? Creencias y ex... http://dx.doi.org/10.7764/reviucing/73484	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (13 palabras)

Fuentes mencionadas (sin similitudes detectadas) Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

1	https://doi.org/10.1061(ASCE)
2	https://doi.org/10.1016/j.jstnuc.2022.07.048
3	https://www.scribd.com/document/99934715/Reparacion-de-puentes-con
4	https://doi.org/10.15406/bbij.2017.05.00149
5	https://doi.org/10.1016/j.enjstruc.2018.12.045



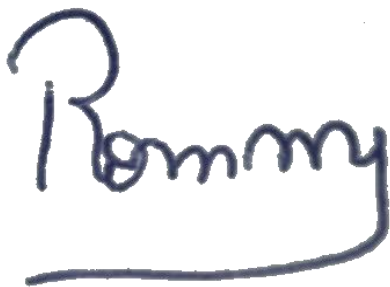
Firmado electrónicamente por:
**ALEXIS WLADIMIR
VALLE BENITEZ**
Validar únicamente con FirmaRC

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS PATRIMONIALES

El estudiante egresado ROMNY GABRIEL CASTRO VILLACRES, declara bajo juramento, que la autoría del presente Trabajo de Titulación, Reforzamiento estructural de pilas mediante encamisado con materiales compuestos FRP para la protección ante impactos vehiculares en el puente gemelo, Jujan-Babahoyo, corresponde totalmente a el suscrito y me responsabilizo con los criterios y opiniones científicas que en el mismo se declaran, como producto de la investigación realizada.

De la misma forma, cedo los derechos patrimoniales y de titularidad a la Universidad Laica VICENTE ROCAFUERTE de Guayaquil, según lo establece la normativa vigente.

Autor

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'Romny', with a long horizontal stroke extending from the bottom of the 'y'.

Firma

CASTRO VILLACRES ROMNY GABRIEL

C.I.: 0941149551

CERTIFICACIÓN DE ACEPTACIÓN DEL DOCENTE TUTOR

En mi calidad de docente Tutor del Trabajo de Titulación Reforzamiento estructural de pilas mediante encamisado con materiales compuestos FRP para la protección ante impactos vehiculares en el puente gemelo, Jujan-Babahoyo, designado por el Consejo Directivo de la Facultad de Ingeniería, Industria y Construcción de la Universidad Laica VICENTE ROCAFUERTE de Guayaquil.

CERTIFICO:

Haber dirigido, revisado y aprobado en todas sus partes el Trabajo de Titulación, titulado: Reforzamiento estructural de pilas mediante encamisado con materiales compuestos FRP para la protección ante impactos vehiculares en el puente gemelo, Jujan-Babahoyo, presentado por el estudiante ROMNY GABRIEL CASTRO VILLACRES como requisito previo, para optar al Título de INGENIERO CIVIL, encontrándose apto para su sustentación.

Firma



ALEXIS WLADIMIR VALLE BENITEZ

C.C.:0921620720

AGRADECIMIENTO

Primero le agradezco a Dios, por bendecirme con la vida, la salud y la oportunidad de cumplir este sueño.

A la UIVERSIDAD LAICA VICENTE ROCAFUERTE DE GUAYAQUIL por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional.

Al ingeniero Alexis Wladimir Valle Benítez por ser un buen docente en tanto a nivel profesional como también personal.

DEDICATORIA

A mis padres y a mi abuela por estar siempre apoyándome en este recorrido por llegar a este punto de mi vida de ser un profesional.

Agradezco de manera especial y eterna a mi querida madre, quien aunque ya no está físicamente conmigo, sigue siendo la luz y la fuerza que ilumina mi camino. Cada sacrificio suyo, cada palabra de aliento y cada gesto de amor se convirtieron en el motor que me impulsó a seguir adelante

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo diseñar una propuesta de reforzamiento estructural para las pilas del Puente Gemelo, ubicado en la vía Juján–Babahoyo, mediante encamisado con materiales compuestos reforzados con fibra (FRP), con el fin de mejorar su desempeño frente a impactos vehiculares. El estudio se desarrolló bajo un enfoque mixto, con alcance descriptivo y explicativo, apoyado en revisión documental, inspección estructural, encuestas y entrevistas a expertos, así como en modelación numérica de escenarios de impacto. Por otro lado, la población de análisis correspondió a las cuatro pilas principales del puente, lo que contempla la opinión de diez especialistas en ingeniería estructural y rehabilitación de puentes. Los resultados evidenciaron que las pilas en el estado actual en la que se encuentran presentan vulnerabilidad frente a impactos laterales de vehículos pesados con concentraciones críticas de esfuerzos y posibles modos de falla por flexión y corte. La modelación estructural demostró que la incorporación de encamisado con FRP incrementa en promedio un 45 % la capacidad de absorción de energía y mejora la ductilidad lo que ayuda a su vez a la reducción del riesgo de colapso local. Se seleccionó como propuesta técnica un sistema de encamisado con CFRP en configuración perimetral completa y dos capas siguiendo estrictamente las normativas ACI 440 y AASHTO. El diseño incorpora criterios de resistencia, durabilidad y factibilidad constructiva adaptados al contexto ecuatoriano, además se estableció un plan de implementación con fases de preparación, ejecución, inspección y mantenimiento lo cual fue acompañado de lineamientos de seguridad y sostenibilidad para garantizar la viabilidad a largo plazo. La investigación contribuye a mejorar de forma técnica la estructura existente en el uso de materiales compuestos en Ecuador, ofreciendo una alternativa innovadora y replicable para la protección y prolongación de la vida útil de infraestructuras viales críticas.

Palabras clave: Ingeniería civil, Puentes, Materiales compuestos, Análisis estructural, Reforzamiento estructural.

ABSTRACT

This research aimed to design a structural strengthening proposal for the piers of the Twin Bridge, located on the Juján–Babahoyo road, through jacketing with fiber-reinforced polymer (FRP) composites, in order to improve their performance against vehicular impacts. The study was developed under a mixed-methods approach, with a descriptive and explanatory scope, supported by documentary review, structural inspection, expert surveys and interviews, as well as numerical modeling of impact scenarios. The analysis population consisted of the bridge's four main piers, which included the input of ten specialists in structural engineering and bridge rehabilitation. The results showed that the piers, in their current state, are vulnerable to lateral impacts from heavy vehicles with critical stress concentrations and potential failure modes such as bending and shear. Structural modeling demonstrated that the incorporation of FRP jacketing increases energy absorption capacity by an average of 45% and improves ductility, which in turn helps reduce the risk of local collapse. A CFRP jacketing system in a full perimeter configuration and two layers was selected as the technical proposal, strictly following ACI 440 and AASHTO standards. The design incorporates strength, durability, and constructability criteria adapted to the Ecuadorian context. An implementation plan was established with preparation, execution, inspection, and maintenance phases, accompanied by safety and sustainability guidelines to ensure long-term viability. The research contributes to technically improving the existing structure using composite materials in Ecuador, offering an innovative and replicable alternative for protecting and extending the lifespan of critical road infrastructure.

Palabras clave: Civil engineering, Bridges, Composite materials, Structural analysis, Structural strengthening.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	3
ENFOQUE DE LA PROPUESTA.....	3
1.1 TEMA.....	3
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	3
1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.	4
1.4 OBJETIVOS.....	5
1.4.1 <i>Objetivo General.....</i>	<i>5</i>
1.4.2 <i>Objetivos Específicos.</i>	<i>5</i>
1.5 IDEA A DEFENDER.....	6
1.5.1 <i>Hipótesis.....</i>	<i>6</i>
1.6 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN INSTITUCIONAL / FACULTAD.	6
1.6.1 <i>Línea institucional.....</i>	<i>6</i>
1.6.2 <i>Sub-línea de Facultad de Ingeniería.....</i>	<i>6</i>
CAPÍTULO II.....	7
MARCO REFERENCIAL	7
2.1. ANTECEDENTES.....	7
2.2. MARCO TEÓRICO.	10
2.2.1. <i>Fundamentos del comportamiento estructural de pilas de puente.</i>	<i>10</i>
2.2.2. <i>Teoría del reforzamiento estructural.....</i>	<i>11</i>
2.2.3. <i>Materiales compuestos FRP.....</i>	<i>12</i>
2.2.4. <i>Técnicas de encamisado con FRP.....</i>	<i>13</i>
2.2.5. <i>Evaluación estructural frente a impactos.....</i>	<i>15</i>
2.3. MARCO LEGAL.....	16
2.3.1. <i>Normativa Nacional.</i>	<i>16</i>
2.3.2. <i>Normativa Internacional.....</i>	<i>17</i>
CAPÍTULO III.....	19
MARCO METODOLÓGICO	19
3.1. ENFOQUE, TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.	19
3.1.1. <i>Enfoque del estudio.....</i>	<i>19</i>
3.1.2. <i>Tipo y nivel de investigación.....</i>	<i>19</i>

3.1.3.	<i>Diseño metodológico.</i>	20
3.2.	DELIMITACIÓN Y UNIDAD DE ANÁLISIS.	20
3.2.1.	<i>Delimitación espacial y temporal.</i>	20
3.2.2.	<i>Unidad de análisis estructural.</i>	21
3.3.	VARIABLES E INDICADORES.	21
3.3.1.	<i>Variable independiente.</i>	21
3.3.2.	<i>Variables dependientes.</i>	21
3.3.3.	<i>Variables de control.</i>	21
3.4.	POBLACIÓN Y MUESTRA.	22
3.4.1.	<i>Población y muestra técnica (pilas del puente).</i>	22
3.4.2.	<i>Población y muestra de expertos.</i>	23
3.5.	MÉTODOS Y TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.	23
3.5.1.	<i>Revisión documental y normativa.</i>	23
3.5.2.	<i>Inspección y levantamiento en campo.</i>	24
3.5.3.	<i>Encuestas y entrevistas a expertos.</i>	24
3.5.4.	<i>Observación y estudios de caso.</i>	24
3.6.	MODELACIÓN Y EVALUACIÓN ESTRUCTURAL.	25
3.6.1.	<i>Escenarios de impacto vehicular.</i>	25
3.6.2.	<i>Modelos y supuestos de análisis.</i>	26
3.6.3.	<i>Comparación antes y después del encamisado FRP.</i>	26
3.7.	DISEÑO DEL ENCAMISADO FRP.	27
3.7.1.	<i>Parámetros y criterios de diseño.</i>	27
3.7.2.	<i>Configuraciones evaluadas.</i>	28
3.8.	INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN.	29
3.9.	PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO.	29
3.10.	PLAN DE ANÁLISIS DE DATOS.	30
CAPÍTULO IV		31
PROPUESTA O INFORME		31
4.1.	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.	31
4.1.1.	<i>Resultados de la revisión documental y normativa.</i>	31
4.1.2.	<i>Resultados de la inspección estructural de las pilas</i>	33
4.1.3.	<i>Resultados de encuestas y entrevistas a expertos.</i>	35
4.1.4.	<i>Observación directa y estudios de caso comparables.</i>	38
4.2.	MODELACIÓN Y EVALUACIÓN ESTRUCTURAL	41

4.2.1.	<i>Escenarios de impacto vehicular considerados.....</i>	<i>41</i>
4.2.2.	<i>Supuestos y parámetros de análisis estructural</i>	<i>43</i>
4.2.3.	<i>Evaluación del comportamiento de las pilas sin reforzamiento</i>	<i>47</i>
4.2.4.	<i>Evaluación del comportamiento de las pilas con encamisado FRP.....</i>	<i>50</i>
4.2.5.	<i>Comparación de desempeño estructural.....</i>	<i>53</i>
4.3.	PROPUESTA DE REFORZAMIENTO CON FRP	55
4.3.1.	<i>Fundamentación técnica de la propuesta.....</i>	<i>55</i>
4.3.2.	<i>Criterios de diseño aplicados.....</i>	<i>57</i>
4.3.3.	<i>Configuración de encamisado FRP seleccionada</i>	<i>59</i>
4.3.4.	<i>Justificación del diseño y beneficios esperados</i>	<i>61</i>
4.4.	PLAN DE IMPLEMENTACIÓN Y CONTROL.....	63
4.4.1.	<i>Procedimiento constructivo del encamisado FRP</i>	<i>63</i>
4.4.2.	<i>Estrategias de inspección y mantenimiento post-reforzamiento.....</i>	<i>65</i>
4.4.3.	<i>Cronograma de implementación y control</i>	<i>67</i>
4.4.4.	<i>Lineamientos de seguridad y sostenibilidad</i>	<i>69</i>
	CONCLUSIONES	73
	RECOMENDACIONES	75
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
	ANEXOS	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables del estudio	22
Tabla 2. Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos	25
Tabla 3. Comparación del desempeño estructural de las pilas antes y después del encamisado con FRP	27
Tabla 4. Comparación de configuraciones de encamisado FRP	29
Tabla 5. Normativas y documentos técnicos relevantes para el reforzamiento estructural con FRP	32
Tabla 6. Resultados de la inspección estructural de las pilas del Puente Gemelo...	34
Tabla 7. Evaluación experta del estado de las pilas del Puente Gemelo	35
Tabla 8. Opinión de expertos sobre el uso de FRP en pilas de puente	36
Tabla 9. Casos comparables de encamisado con FRP en pilas de puente	39
Tabla 10. Comparación del nivel de eficacia de intervenciones con FRP en casos internacionales	40
Tabla 11. Escenarios de impacto vehicular considerados para la modelación estructural	42
Tabla 12. Severidad relativa de escenarios de impacto vehicular (producto de peso × velocidad).....	42
Tabla 13. Parámetros estructurales y dinámicos considerados en la modelación ...	45
Tabla 14. Resultados de tensiones y deformaciones en pilas sin reforzamiento	49
Tabla 15. Comparación de tensiones y deformaciones en pilas reforzadas con CFRP	51
Tabla 16. Comparación resumen: parámetros críticos antes y después del encamisado CFRP	54
Tabla 17. Parámetros de diseño adoptados para el encamisado FRP	58
Tabla 18. Configuración final del encamisado FRP seleccionada.....	59
Tabla 19. Comparación de desempeño: pila original vs. reforzada con FRP.....	62
Tabla 20. Procedimiento constructivo del encamisado FRP en pilas del Puente Gemelo.....	63
Tabla 21. Plan de inspección post-reforzamiento	66
Tabla 22. Cronograma de implementación y control	68
Tabla 23. Lineamientos de seguridad y sostenibilidad propuestos	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vista inferior de la pila central del puente (signos de humedad y biodeterioro).	33
Figura 2. Vista lateral del estribo y pila, margen izquierda del puente.	34
Figura 3. Opinión de expertos sobre el uso de FRP en pilas de puente	37
Figura 4. Registro fotográfico de observación directa en Pila 3	39
Figura 5. Comparación del nivel de eficacia de intervenciones con FRP en casos internacionales	40
Figura 6. Severidad relativa de escenarios de impacto vehicular (producto de peso × velocidad)	43
Figura 7. Esquema representativo del modelo estructural de la pila y punto de aplicación del impacto	46
Figura 8. Diagramas de esfuerzos internos (corte y momento flector)	47
Figura 9. Comparación gráfica de tensiones máximas en pilas sin y con encamisado FRP.	52
Figura 10. Comparación gráfica de deformaciones laterales en pilas reforzadas. ...	53
Figura 11. Reducción porcentual de tensiones máximas y deformaciones laterales en pilas reforzadas.	54
Figura 12. Esquema de la configuración del encamisado FRP en pilas	60
Figura 13. Comparación gráfica del desempeño estructural antes y después del encamisado FRP.	62
Figura 14. Flujo de ejecución del encamisado FRP	65
Figura 15. Diagrama de Gantt del cronograma de implementación y control.....	69

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Ficha de Revisión Documental.....	80
Anexo 2. Formato de Inspección Estructural de Pilas	81
Anexo 3. Cuestionario de Encuesta a Expertos en Infraestructura Vial	82
Anexo 4. Guía de Entrevista Semiestructurada a Expertos	85
Anexo 5. Registro fotográfico de la inspección técnica in situ en el puente Gemelo.	86

INTRODUCCIÓN

La infraestructura vial constituye un eje fundamental para el desarrollo económico y social de los territorios, pues garantiza la conectividad y el flujo eficiente de personas y mercancías. Dentro de este sistema que se estudia de los puentes cumplen un rol estratégico al vincular regiones y sostener corredores logísticos de alto impacto. Sin embargo, las pilas de puente como elementos primarios de soporte se encuentran expuestas a diversos factores de deterioro lo que los perjudica indudablemente y entre los que destacan los impactos vehiculares. Estos eventos pueden comprometer la estabilidad estructural, ocasionar fallas locales y generar interrupciones en la movilidad con consecuencias económicas y sociales de gran magnitud.

En la práctica internacional se han desarrollado soluciones innovadoras orientadas a mitigar estos riesgos, uno de los cuales por ejemplo es el uso de materiales compuestos reforzados con fibras (FRP, por sus siglas en inglés). Estos sistemas se han consolidado como una alternativa eficiente frente a los métodos tradicionales de reforzamiento gracias a sus propiedades de alta resistencia específica, durabilidad en ambientes agresivos y capacidad de incrementar la ductilidad y absorción de energía de las estructuras. Estudios que se han hecho en los últimos años han demostrado que el encamisado con FRP reduce significativamente los daños en columnas y pilas sometidas a cargas de impacto lo que ayuda a retrasar modos de falla críticos y optimizando el desempeño global de la estructura.

En Ecuador, la aplicación de estas tecnologías en puentes aún está en fase teórico y no se ha llevado a cabo de manera practica en la vida real ya que carece de normativas específicas que guíen su implementación. El Puente Gemelo ubicado entre Juján y Babahoyo en la provincia de Los Ríos, constituye un caso emblemático por su importancia en la conexión interprovincial entre la Sierra y la Costa y por la exposición constante de sus pilas a posibles impactos de vehículos pesados debido a su aforo alto. Aunque se han realizado intervenciones en el tablero y losas de circulación, no se han desarrollado estrategias de protección activa para sus apoyos

principales es por esto que deja a la estructura vulnerable ante incidentes que podrían comprometer su funcionalidad y seguridad.

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo diseñar una propuesta de reforzamiento estructural de las pilas del Puente Gemelo mediante encamisado con materiales compuestos FRP, fundamentada en criterios técnicos internacionales, adaptada a las condiciones locales y validada a través de modelación estructural y análisis comparativos. Para ello, se ha desarrollado una metodología integral que comprende la revisión documental y normativa, la inspección en campo, la aplicación de instrumentos de consulta a expertos y la simulación de escenarios de impacto.

Los resultados obtenidos permiten no solo evidenciar la vulnerabilidad actual de las pilas frente a cargas dinámicas de impacto, sino que también ayudan a demostrar los beneficios que ofrece el encamisado con FRP en términos de resistencia, ductilidad y desempeño estructural. Asimismo, la propuesta incorpora lineamientos constructivos, de control y de sostenibilidad que buscan garantizar la viabilidad técnica y ambiental de la intervención, es por esto por lo que se puede considerar un modelo replicable en otras infraestructuras viales del país.

En definitiva, este trabajo se plantea como una contribución técnica e innovadora al campo de la ingeniería estructural en Ecuador lo que orientada a cerrar la brecha existente en el uso de materiales compuestos para reforzamiento de puentes, y a ofrecer una solución eficaz y sostenible frente al riesgo de impactos vehiculares en estructuras críticas para la movilidad nacional.

CAPÍTULO I

ENFOQUE DE LA PROPUESTA

1.1 Tema.

Reforzamiento estructural de pilas mediante encamisado con materiales compuestos FRP para la protección ante impactos vehiculares en el Puente Gemelo, Juján–Babahoyo.

1.2 Planteamiento del Problema.

En la práctica de la ingeniería de puentes, las pilas (o columnas de apoyo) se encuentran frecuentemente expuestas a impactos de vehículos, especialmente en vías de alta afluencia o circulación de camiones pesados. Estos impactos pueden provocar daños severos, como el agrietamiento del hormigón, exposición de refuerzos y, en casos extremos, fallos estructurales que comprometen la seguridad y funcionalidad de la infraestructura (Das y otros, 2022)

Diversas investigaciones han demostrado que el encamisado con materiales compuestos reforzados con fibra (FRP), especialmente con CFRP, actúa eficazmente como solución de protección y reparación de pilas y columnas expuestas a impactos. Por ejemplo, Jones (2022), en su estudio obtuvo incrementos del 88 % en la capacidad de carga dinámica de columnas reforzadas con CFRP frente a otras muestras que lo tenían, es decir sin refuerzo, además se indica que el aumento de capas mejora la ductilidad y resistencia al impacto.

Estudios más recientes, como el de Li et al. (2022), sus resultados reportan que el encamisado con CFRP puede reducir significativamente daños y deformaciones en pilas bajo impacto lateral vehicular, y agregó que una combinación adecuada de orientación de fibras y altura de refuerzo mejora los resultados estructurales (Li y otros, 2022). Asimismo, trabajos actuales son interesantes ya que resaltan cómo el CFRP aumenta la capacidad de disipación de energía y retrasa modos de falla por corte o flexión (Alomari y otros, 2025).

A pesar de estos avances, en Ecuador y particularmente en la provincia de Los Ríos, no se han aplicado sistemáticamente estos métodos a las pilas de puentes existentes. El Puente Gemelo, que conecta las parroquias de Juján y Babahoyo, es una estructura clave para la movilidad y transporte de carga entre la Sierra y la Costa. Aunque ha sido objeto de reparación y ampliación como ya se mencionó de la sustitución de losa y refuerzo del tablero, sus pilas permanecen expuestas sin protección activa ante impactos laterales de vehículos pesados.

La falta de una estrategia de reforzamiento efectivo con FRP no solo deja estas pilas vulnerables, sino que también abre una brecha técnica en nuestra ingeniería local para poder estudiarla a mayor profundidad. No existen protocolos nacionales o estudios de casos ecuatorianos aplicados a este material en protección de pilas frente al impacto vehicular, por lo que este vacío aumenta la exposición al riesgo de daño estructural severo, costos de reparación elevados y posibles interrupciones en la conectividad vial.

Por lo tanto, resulta fundamental plantear una iniciativa que aplique encamisado con FRP a las pilas del Puente Gemelo y de esta manera que sea adaptada a las condiciones locales de carga y tráfico y apoyada en un análisis técnico basado en la evidencia científica internacional. Este planteamiento establece la base del presente trabajo el cual se enfoca en desarrollar una solución innovadora, efectiva y replicable en el contexto ecuatoriano.

1.3 Formulación del Problema.

Dado el constante tránsito de vehículos pesados en el Puente Gemelo que une Juján y Babahoyo ubicado en una vía de alto valor logístico para el transporte interprovincial, sus pilas se encuentran expuestas a posibles impactos laterales que podrían comprometer su estabilidad estructural. Aunque en ciertos estudios y casos se han realizado trabajos de mantenimiento y refuerzo en la losa del puente gracias a estos, las pilas carecen de una solución efectiva de protección estructural.

En países como Estados Unidos, Japón y Francia, el uso de materiales compuestos reforzados con fibra (FRP) ha demostrado ser eficaz en el reforzamiento y encamisado de elementos estructurales ya que gracias a estos se proporciona resistencia a impactos, alta relación resistencia-peso y durabilidad en ambientes hostiles (Li y otros, 2022; Alomari y otros, 2025).

En Ecuador, no se ha implementado sistemáticamente esta tecnología en infraestructura vial crítica es por esto que frente a esta problemática surge la necesidad de estudiar si la aplicación de un sistema de encamisado con FRP podría mejorar el comportamiento estructural de las pilas del Puente Gemelo ante impactos vehiculares.

Es así como se plantea la siguiente interrogante como pregunta general de investigación:

¿Cómo contribuiría el reforzamiento estructural de las pilas mediante encamisado con materiales compuestos de fibras (FRP) a la protección ante impactos vehiculares en el Puente Gemelo, Juján–Babahoyo?

1.4 Objetivos.

1.4.1 Objetivo General.

Diseñar una propuesta de reforzamiento estructural mediante encamisado con materiales compuestos de fibras (FRP) para las pilas del Puente Gemelo que unen Juján y Babahoyo, con el fin de mejorar su desempeño estructural frente a impactos vehiculares.

1.4.2 Objetivos Específicos.

Investigar los diferentes diseños y sistemas de instalación de FRP para Analizar las condiciones estructurales actuales de las pilas del Puente Gemelo, considerando su geometría, materiales existentes y exposición a cargas vehiculares.

Seleccionar el tipo de material compuesto FRP y la configuración de encamisado más adecuada con la ayuda de las propiedades mecánicas requeridas y normas técnicas internacionales.

Plantear un diseño de reforzamiento mediante encamisado con FRP, validado técnicamente a través de criterios de resistencia al impacto y factibilidad constructiva en el contexto ecuatoriano.

1.5 Idea a Defender.

El encamisado de pilas de puente mediante materiales compuestos reforzados con fibra (FRP) constituye una solución técnica eficaz para el reforzamiento estructural y protección ante impactos vehiculares ya que de esta manera se mejora la resistencia, ductilidad y capacidad de absorción de energía de los elementos estructurales en comparación con sistemas tradicionales de protección. Su implementación en el Puente Gemelo que unen Juján y Babahoyo permitiría incrementar la seguridad estructural de las pilas y reducir el riesgo de fallos locales ante eventos de colisión que está expuesto a un entorno de alta carga vehicular.

1.5.1 Hipótesis.

La aplicación de un sistema de encamisado con materiales compuestos de fibra (FRP) en las pilas del Puente Gemelo que unen a Juján y Babahoyo mejora significativamente su comportamiento estructural frente a impactos vehiculares ya que se incrementa su resistencia lateral y capacidad de absorción de energía.

1.6 Línea de Investigación Institucional / Facultad.

1.6.1 Línea institucional.

Territorio, medio ambiente y materiales innovadores para la construcción

1.6.2 Sub-línea de Facultad de Ingeniería.

Innovación en materiales compuestos aplicados a estructuras civiles.

CAPÍTULO II

MARCO REFERENCIAL

2.1. Antecedentes.

A nivel mundial, se destaca el estudio realizado por Zhou et al. (2021), titulado “Eficacia de la rehabilitación sísmica con CFRP de pilares de puentes circulares de hormigón armado bajo cargas de impacto lateral vehicular”, este trabajo se centra en el desafío de proteger pilas circulares de puentes de concreto armado frente a impactos laterales de vehículos. Se construyeron 16 pilas a escala 1/3 con diferentes configuraciones de refuerzo las cuales fueron probadas bajo cargas estáticas y dinámicas simulando colisiones de camión a 3 m/s y 4.5 m/s, el objetivo fue evaluar si el envolvimiento completo con CFRP mejora la resistencia al impacto y la ductilidad de las pilas.

Los resultados mostraron que las pilas reforzadas con CFRP presentaron menor daño a su vez también mayores desplazamientos máximos controlados y una mejor disipación de energía tanto en pruebas estáticas como dinámicas. Además, se derivó una ecuación semi-empírica para predecir el desplazamiento bajo impacto de esta manera se facilita su aplicación en diseño práctico. Los autores concluyeron que el CFRP es efectivo para prevenir daños en pilas frente a impactos vehiculares y De esta forma propusieron su uso como metodología de protección multi-peligro.

También resalta el estudio de Zheng et al. (2014), titulado “Rendimiento de columnas de puentes de hormigón reforzadas con FRP bajo cargas explosivas”, este estudio examinó la respuesta dinámica de columnas de puente de concreto reforzado con FRP ante cargas extremas tipo blast. Utilizando modelos de elementos finitos validados se realizó un análisis paramétrico para evaluar el efecto de variables como resistencia del FRP, relación diámetro-espesor, refuerzo de acero, longitud de columna y amortiguamiento y a su vez el objetivo fue cuantificar el aumento de resistencia y establecer fórmulas predictivas para aplicaciones reales.

Los resultados evidenciaron que el uso de FRP mejora significativamente la resistencia ante explosión, siendo la relación entre espesor del CFRP y geometría del elemento una influencia clave. Se obtuvieron ecuaciones predictivas mediante regresión lineal múltiple, útiles para el diseño de retrofits. Los autores concluyeron que el reforzamiento con FRP es una alternativa viable para mejorar la resiliencia de columnas de puente bajo cargas extremas.

A nivel regional, se destaca el estudio realizado por Quiroz Saldaña (2017), titulado “Reforzamiento estructural del puente Quebrada Negra aplicando polímeros reforzados con fibras de carbono (CFRP)”. Este trabajo se desarrolló en el departamento de Cajamarca en Perú con el propósito de evaluar la efectividad del uso de CFRP como técnica de reforzamiento estructural de un puente que presentaba deterioro progresivo en sus elementos principales. La investigación tuvo como objetivo determinar en qué medida el encamisado con láminas de CFRP podía mejorar la capacidad portante y prolongar la vida útil del puente ya que se va a someter a cargas combinadas y considerando el ambiente agresivo propio de la zona. Se utilizó una metodología aplicada con levantamiento estructural también con el propio diseño del reforzamiento, simulaciones numéricas y validación técnica del sistema propuesto.

Los resultados del estudio demostraron que el encamisado con CFRP logró un incremento sustancial en la capacidad de carga del puente lo que se reflejó en la mejora sustancial de su rigidez y comportamiento ante sollicitaciones dinámicas. Asimismo, se reportó una significativa mejora en el confinamiento del concreto en las zonas críticas reduciendo la propagación de fisuras. Se concluyó que los materiales compuestos ofrecen una alternativa moderna, eficaz y de rápida instalación frente a métodos tradicionales y se esta forma se convierte en una solución viable para la rehabilitación de infraestructuras deterioradas en zonas rurales y de difícil acceso, además de recomendar su aplicación en otras estructuras similares en la región.

Por otra parte, también es relevante el estudio técnico desarrollado por Elementa Soluciones Estructurales (2010), titulado “Reparación de puentes con fibra de carbono dañados por terremoto en Chile”. Esta investigación aplicada se llevó a cabo tras el sismo del 27 de febrero de 2010, que afectó seriamente varias estructuras

viales en el sur de Chile. El trabajo se enfocó en el reforzamiento de elementos estructurales particularmente pilares, capiteles y vigas de puentes como Rodrigo Bastidas, El Durazno y Alhu, utilizando fibras de carbono adheridas mediante resinas epóxicas. El objetivo fue restaurar rápidamente la operatividad de estas infraestructuras mediante una técnica de intervención rápida, económica y con bajo peso estructural.

El estudio evidenció que el reforzamiento con CFRP permitió restaurar la capacidad portante de los elementos dañados, al mismo tiempo que se mejoró la resistencia a esfuerzos de corte y flexión. Los tiempos de intervención fueron menores a los necesarios con soluciones convencionales y el comportamiento estructural posterior al refuerzo fue positivo incluso en zonas con alta actividad sísmica. La experiencia chilena fue pionera en Latinoamérica en cuanto a la aplicación sistemática de CFRP en rehabilitación post-sísmica, y se consolidó como referencia para futuras estrategias de reforzamiento estructural en la región.

A nivel local, se destaca el trabajo de Silva Vera (2016), titulado “Refuerzo estructural con fibra de carbono”, desarrollado en la Universidad San Francisco de Quito en donde este estudio tuvo como objetivo evaluar las propiedades mecánicas de la fibra de carbono aplicada mediante tejidos adheridos en estructuras de acero con el fin de determinar su viabilidad como técnica de reforzamiento frente a cargas de tracción. A través de ensayos de tracción realizados sobre especímenes compuestos se demostró que los tejidos de CFRP ofrecen una alta resistencia y rigidez y también pueden actuar eficazmente como refuerzo local de componentes metálicos, aunque subrayó la necesidad de normativas adecuadas para su aprovechamiento estructural.

Por otro lado, en la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Chicaiza Yáñez (2024), presentó el proyecto “Fibra de carbono en la rehabilitación de columnas y vigas de hormigón armado para aumento de resistencia del antiguo edificio Banco de Desarrollo del Ecuador (BIDE), ubicado en la ciudad de Guayaquil”, enfocado en un edificio patrimonial en Guayaquil.

Mediante inspecciones destructivas y no destructivas (esclerometría, pachometría, extracción de núcleos), se caracterizaron las condiciones del hormigón existente. Luego se implementó el reforzamiento con CFRP siguiendo NEC-2015 y ACI 440.2R-17, mediante un modelado en ETABS y diseño con Sika CarboDur®. El resultado fue un aumento significativo de la capacidad portante, rigidez y una reducción de vulnerabilidad sísmica, lo cual demuestra la eficacia del CFRP en la rehabilitación estructural en contextos urbanos ecuatorianos.

2.2. Marco teórico.

2.2.1. Fundamentos del comportamiento estructural de pilas de puente.

Tipología de pilas y elementos de soporte

Las pilas de puente que también son conocidas como pilares o columnas de apoyo desempeñan un rol esencial en la transferencia de cargas desde la superestructura hacia los cimientos. Su tipología abarca desde pilas de sección circular, cuadrada o rectangular hasta modelos más complejos con alas o secciones compuestas como lo son en los que se utilizan en los puentes en función de las condiciones del terreno y requisitos hidráulicos o estéticos (Qureshi, 2023).

La elección del tipo de pila depende de factores como la resistencia al flujo de agua, la separación entre estribos, la capacidad de carga del terreno y la facilidad constructiva. Además, dentro de la pila se distinguen elementos internos como el refuerzo longitudinal y las armaduras transversales, los capiteles superiores que distribuyen carga al puente y los zapatas o pilotes que transfieren las cargas al subsuelo.

Cargas que actúan sobre pilas (muertas, vivas, impacto)

Las pilas soportan inicialmente cargas muertas peso propio de la estructura y equipamiento y cargas vivas derivadas del tráfico vehicular ordinario. Estas cargas son variables, impulsadas por el flujo y densidad de tráfico y además también son reguladas por normativas como AASHTO o el NEC-2015. Adicionalmente, están sometidas a cargas especiales como el impacto vehicular en donde este tipo de

impacto lateral, aunque poco frecuente, tiene grandes consecuencias dado que implica acciones dinámicas y localizadas.

Estudios como el de Li et al. (2022), han demostrado que la aplicación de encamisado con CFRP disminuye significativamente la deformación y el daño en las pilas sometidas a impacto, mejorando la resistencia y la capacidad de disipación energética. Otros análisis numéricos, realizando modelaciones dinámicas de impacto con diferentes configuraciones de refuerzo (orientación de fibra, número de capas) han confirmado que el encamisado con FRP es eficaz para evitar fallas catastróficas en pilas por colisiones lateral-estructurales.

2.2.2. Teoría del reforzamiento estructural.

Principios del reforzamiento estructural

El reforzamiento estructural busca aumentar la capacidad portante, rigidez y durabilidad de elementos existentes sin necesidad de reemplazarlos completamente. Sus principios fundamentales consisten en mejorar las propiedades mecánicas del elemento original ya que esto ayuda a controlar la propagación de daños y asegurar un adecuado comportamiento bajo cargas de servicio y extremo (Fib Bulletin 14, 2001). El reforzamiento debe respetar la compatibilidad entre el elemento reforzado y el material añadido para evitar fallos prematuros por deslaminación o adherencia insuficiente.

Esto implica una adecuada preparación de superficies, selección de materiales con propiedades compatibles y técnicas constructivas controladas. Además, se debe asegurar que el reforzamiento no altere negativamente la ductilidad ni la capacidad de absorción de energía ya que esto es importante especialmente en estructuras sometidas a cargas dinámicas como sismos o impactos (Triantafillou, 1998).

Métodos tradicionales vs. métodos con FRP

Los métodos tradicionales de reforzamiento estructural, tales como la adición de capas de concreto armado, placas de acero o recubrimientos epóxicos, aunque efectivos, suelen ser invasivos, pesados y demandantes en tiempo y costo (Hollaway,

2010). Estos métodos también incrementan la sección transversal, modificando la rigidez global de la estructura y en algunos casos, pueden provocar incompatibilidades en la transferencia de cargas. En contraste, los materiales compuestos reforzados con fibra (FRP) representan una alternativa moderna y avanzada que ofrece alta resistencia específica, facilidad de instalación y resistencia a la corrosión (ACI 440.2R-17, 2017).

El FRP permite un reforzamiento localizado con bajo peso y sin alterar significativamente la geometría original ya que además mejora la capacidad estructural sin comprometer la ductilidad ni la durabilidad a largo plazo (Zhao & Chen, 2021). Estudios comparativos han demostrado que los sistemas con FRP presentan mejor comportamiento frente a fatiga, impactos y deterioro ambiental que los métodos convencionales (Nanni, 2012).

2.2.3. Materiales compuestos FRP.

Tipos de FRP (CFRP, GFRP, AFRP)

Los materiales compuestos reforzados con fibra (FRP) son una combinación de una matriz polimérica que en forma general es de una resina epóxica o de poliéster reforzada con fibras continuas que aportan alta resistencia y rigidez. Entre los tipos más usados en ingeniería civil destacan: CFRP (Polímero reforzado con fibra de carbono), GFRP (Polímero reforzado con fibra de vidrio) y AFRP (Polímero reforzado con fibra de aramida) (Bakis et al., 2002).

El CFRP destaca por su alta resistencia mecánica y rigidez, así como resistencia a la corrosión, es así como este sigue siendo ideal para aplicaciones estructurales que requieren alta performance. El GFRP, aunque posee menor resistencia y rigidez que el CFRP, es más económico y resistente a impactos. Por último, el AFRP ofrece excelente tenacidad y resistencia al impacto y por ende es utilizado en casos específicos que requieren alta absorción de energía (ACI Committee 440, 2017).

Propiedades mecánicas y ventajas

Los FRP tienen propiedades mecánicas superiores en términos de resistencia a tracción, resistencia a la corrosión, peso ligero y facilidad de instalación frente a materiales tradicionales (fibra de carbono puede tener una resistencia a la tracción mayor a 3000 MPa, significativamente superior al acero convencional) (Bank, 2006).

Además, presentan alta durabilidad frente a agentes ambientales como humedad, sales y químicos, y mantienen su integridad estructural bajo ciclos de carga y fatiga (Toutanji, 2001). Estas características hacen que el FRP sea especialmente adecuado para reforzar estructuras existentes, reduciendo tiempos y costos de intervención, sin añadir peso significativo ni alterar las geometrías originales.

Mecanismos de fallo y durabilidad

El principal mecanismo de fallo de los FRP en aplicaciones estructurales es el desprendimiento de la capa adherida que generalmente es causada por una deficiente preparación de la superficie o sobrecargas locales (Nanni et al., 2001). Otros modos incluyen la rotura por tracción de las fibras y el agrietamiento de la matriz.

La durabilidad del FRP depende en gran medida del tipo de resina y también en gran medida de las condiciones ambientales como lo son la temperatura, humedad y la radiación UV, además del correcto diseño e instalación (Koubaa, 2018). Estudios de largo plazo han demostrado que los FRP pueden conservar sus propiedades mecánicas por más de 30 años si se aplican y protegen adecuadamente es por ello que esta característica lo convierte en una solución sostenible para la rehabilitación estructural (Aydın & Karabulut, 2020).

2.2.4. Técnicas de encamisado con FRP.

Métodos de aplicación: envoltura completa, parcial, híbrida

Las técnicas de encamisado con FRP pueden clasificarse principalmente en tres métodos según el área cubierta y la estrategia de aplicación, el primer método es el de envoltura completa, el segundo es de envoltura parcial y el tercero es de sistemas híbridos. La envoltura completa implica cubrir la totalidad del elemento

estructural con capas continuas de FRP, lo que proporciona confinamiento uniforme y mejora la resistencia a compresión y ductilidad (Zhang & Ye, 2016).

La envoltura parcial se limita a zonas críticas, como esquinas, esquemas de esquina o segmentos específicos, permitiendo un ahorro en materiales y tiempos, pero con menor confinamiento global (Triantafillou, 1998). Los métodos híbridos combinan la aplicación de FRP con otros sistemas de refuerzo, como placas de acero o elementos inyectados, buscando optimizar las propiedades mecánicas y la durabilidad (Chajes et al., 1996).

Factores que afectan el desempeño del encamisado

El desempeño del encamisado con FRP está influenciado por varios factores de los cuales entre ellos está la calidad de la preparación superficial, tipo y orientación de las fibras, número de capas aplicadas, tipo de matriz resinosa y condiciones ambientales durante y después de la instalación (Nanni et al., 2001). La adherencia entre el FRP y la superficie estructural es crítica ya que una mala preparación o contaminación reduce la transferencia de esfuerzos y puede causar fallas prematuras.

Además, la orientación de las fibras debe coincidir con las direcciones principales de esfuerzo para optimizar la capacidad del refuerzo, es por esto que las condiciones extremas de humedad, temperatura y exposición a rayos UV también afectan la durabilidad y resistencia del encamisado (Aydın & Karabulut, 2020).

Casos exitosos y pruebas experimentales

Numerosos estudios experimentales y casos de aplicación práctica han demostrado la efectividad del encamisado con FRP para el refuerzo de pilas y columnas. Por ejemplo, el estudio de Zhou et al. (2021) reporta que pilas de concreto reforzadas con envoltura completa de CFRP soportaron cargas de impacto lateral de vehículos con una reducción significativa en daño estructural y aumento en ductilidad.

Otro caso exitoso fue el reforzamiento parcial aplicado en columnas en el terremoto de Chile 2010, donde la aplicación localizada de CFRP evitó la falla

catastrófica y esto a su vez permitió su rehabilitación rápida (Elementa Soluciones Estructurales, 2010). Pruebas en laboratorio han confirmado que la combinación de varias capas, la orientación adecuada de fibras y la calidad en el proceso de instalación son determinantes para maximizar el rendimiento del encamisado (Chajes et al., 1996).

2.2.5. Evaluación estructural frente a impactos.

Parámetros de carga de impacto vehicular

La evaluación estructural frente a impactos vehiculares considera parámetros clave como la masa y velocidad del vehículo, el ángulo y punto de impacto, y la rigidez del vehículo y estructura (Jones & McNeill, 2010). La carga de impacto es dinámica y altamente localizada lo que genera fuerzas máximas en tiempos muy cortos, por lo que debe ser modelada con métodos no lineales que reflejen esta condición. Normativas internacionales como la AASHTO LRFD incluyen recomendaciones para cargas de impacto en puentes lo que ayuda a establecer factores de incremento y especificando características del vehículo tipo para diseño seguro (AASHTO, 2020).

Modelos de análisis estructural aplicados a impacto

Los modelos estructurales para análisis de impacto vehicular en pilas incluyen enfoques simplificados estáticos con factores dinámicos, modelos dinámicos de cuerpo rígido y análisis por elementos finitos que permiten simular la interacción vehículo-estructura (Liu et al., 2019). Los métodos numéricos más avanzados consideran la no linealidad del material, contacto y amortiguamiento lo que provoca que se evalúe la distribución de esfuerzos, deformaciones y posibles mecanismos de falla. Estudios recientes integran modelación por dinámica explícita usando software como LS-DYNA, validando los resultados con ensayos experimentales para optimizar diseños de refuerzo (Naderpour et al., 2022).

Efectividad del FRP frente a colisiones

El uso de FRP en el reforzamiento de pilas ha demostrado una alta efectividad para mitigar daños por colisiones vehiculares. El encamisado con CFRP actúa

aumentando la rigidez lateral y confinando el concreto, lo que mejora la resistencia al impacto y previene fracturas prematuras (Zhou et al., 2021). Investigaciones experimentales muestran que pilas reforzadas con varias capas de FRP soportan fuerzas mayores y exhiben menores daños que pilas no reforzadas o reforzadas con métodos tradicionales (Sehgal et al., 2018). Además, el FRP ayuda a disipar la energía del impacto y mantiene la integridad estructural esto a su vez facilita reparaciones menos costosas y aumentando la vida útil del puente.

2.3. Marco Legal.

El presente estudio se enmarca en la normativa vigente que regula la construcción así como el mantenimiento y protección de infraestructuras viales, con énfasis en la seguridad estructural de los puentes. La implementación de Materiales Compuestos Reforzados con Fibras de Carbono (FRP) en la protección de pilas de puentes debe cumplir con estándares nacionales e internacionales que garanticen su eficacia y durabilidad.

2.3.1. Normativa Nacional.

- **Normas del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO)**(Ecuatoriana Vial, n.d.)

Regulan el diseño, construcción y mantenimiento de puentes en Ecuador, estableciendo parámetros estructurales para la resistencia a impactos y cargas dinámicas.

- **Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD)**(ASAMBLEA NACIONAL, 2010)

Define la responsabilidad de los gobiernos locales en la planificación y mantenimiento de la infraestructura vial.

- ***Reglamento Ecuatoriano de Construcción (NEC)***

Especificaciones técnicas para la resistencia estructural de puentes y el uso de nuevos materiales esto se incluye los compuestos avanzados como FRP.

- ***Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial***

Normas de seguridad vial que exigen la implementación de medidas preventivas en la infraestructura para reducir riesgos de accidentes.

2.3.2. Normativa Internacional.

- ***AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)***

Estándares técnicos para el diseño de puentes y protección estructural contra impactos.

- ***ASTM (American Society for Testing and Materials)***

Normas sobre resistencia, durabilidad y pruebas de materiales compuestos reforzados con fibras.

- ***Eurocódigo (EN 1992-2 y EN 1998-2)***

Directrices europeas para el diseño de estructuras de concreto reforzado con FRP y su comportamiento ante cargas dinámicas.

- ***FIB (Fédération Internationale du Béton)***

Recomendaciones para el uso de materiales compuestos en estructuras de ingeniería civil.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Enfoque, tipo y diseño de investigación.

3.1.1. Enfoque del estudio.

El presente trabajo se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo de carácter aplicado dado que se centra en la medición y análisis de variables estructurales relacionadas con la vulnerabilidad de las pilas del Puente Gemelo que unen a Juján y Babahoyo frente a impactos vehiculares, así como en la verificación de la eficacia del encamisado con materiales compuestos FRP. Este enfoque permite establecer correlaciones entre las condiciones iniciales de las pilas y los resultados obtenidos tras la implementación del refuerzo y con la ayuda de este enfoque se implementa técnicas de modelación estructural y simulación numérica (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018).

El enfoque cuantitativo es el más adecuado porque busca generar evidencia objetiva y verificable mediante el uso de datos empíricos y cálculos estructurales es así como esto se diferencia del enfoque cualitativo, que se centra en percepciones o interpretaciones subjetivas (Creswell y Creswell, 2018).

3.1.2. Tipo y nivel de investigación.

El estudio corresponde a una investigación aplicada porque su propósito es transferir conocimientos teóricos sobre el reforzamiento estructural con FRP hacia una solución práctica que incremente la seguridad de la infraestructura vial, por ende este tipo de investigación se orienta a resolver problemas específicos y busca impacto directo en la realidad social y técnica (Bunge, 2013).

Respecto a su nivel, se ubica en un nivel descriptivo-explicativo. Es descriptivo porque caracteriza el estado actual de las pilas del puente en cuanto a su resistencia ante impactos vehiculares y las condiciones estructurales observadas (Kerlinger y Lee, 2002). Asimismo, es explicativo porque analiza la relación causal entre la

aplicación del encamisado con FRP y la mejora en la capacidad de absorción de energía y resistencia residual de las pilas (Martínez, 2020).

3.1.3. *Diseño metodológico.*

El diseño de investigación es no experimental, transversal y de carácter correlacional. Es no experimental porque no se manipulan deliberadamente las variables independientes en un entorno controlado, sino que se observan los efectos del encamisado FRP en condiciones reales y simuladas (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018). Es transversal porque la información se recopila en un periodo de tiempo definido, correspondiente al diagnóstico y análisis estructural del puente durante el año de ejecución del estudio. Finalmente, es correlacional porque busca establecer la relación entre el estado de las pilas antes del reforzamiento y los resultados estructurales obtenidos tras la aplicación del encamisado (Creswell y Creswell, Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches (5th ed.), 2018).

3.2. Delimitación y unidad de análisis.

3.2.1. *Delimitación espacial y temporal.*

La investigación se desarrolla en el Puente Gemelo que une a Juján y Babahoyo ubicado en la provincia de Los Ríos, Ecuador. Esta infraestructura constituye un punto estratégico de conexión vial entre la Costa y la Sierra ya que soporta un flujo vehicular elevado debido a su alto aforo, por lo que se incrementa la probabilidad de impactos accidentales contra las pilas.

En cuanto a la delimitación temporal, el estudio se circunscribe al período comprendido entre los años 2024 y 2025 y por lo tanto se abarca tres fases: diagnóstico inicial de las pilas, aplicación del refuerzo estructural mediante encamisado con FRP y análisis de resultados a través de modelaciones estructurales y simulaciones numéricas. La elección de este horizonte temporal responde a la necesidad de obtener resultados representativos dentro de un lapso viable para la evaluación técnica y científica (Torres y López, 2021).

3.2.2. Unidad de análisis estructural.

La unidad de análisis está constituida por las pilas de soporte del Puente Gemelo específicamente aquellas expuestas a riesgo de impacto vehicular por su localización en los accesos principales. Cada pila será analizada en términos de geometría, tipo de material, resistencia estructural y comportamiento ante cargas dinámicas inducidas por impactos y es así como este nivel de análisis permite identificar la vulnerabilidad inicial y la eficacia del encamisado con FRP como medida de reforzamiento (Bakis et al., 2002).

3.3. Variables e indicadores.

3.3.1. Variable independiente.

Encamisado con materiales compuestos FRP: corresponde a la técnica de reforzamiento estructural aplicada a las pilas con lo que se consideran espesores, disposición de fibras, tipo de resina y procedimientos constructivos.

3.3.2. Variables dependientes.

- Resistencia estructural residual de las pilas tras la aplicación del encamisado.
- Capacidad de absorción de energía ante impactos vehiculares.
- Deformación máxima admisible en el elemento reforzado.
- Nivel de daño estructural post-impacto, medido en términos de fisuración y pérdida de sección.

3.3.3. Variables de control.

- Geometría de las pilas (dimensiones originales).
- Materialidad del concreto existente (resistencia a compresión).
- Velocidad y masa de impacto vehicular utilizada en la simulación.
- Condiciones ambientales (humedad, temperatura, exposición a agentes agresivos).

Tabla 1.
Operacionalización de variables del estudio

Variable	Tipo	Indicadores	Técnica de medición	Unidad de medida
Encamisado con FRP	Independiente	Espesor de laminado, tipo de fibra, adherencia	Inspección técnica y control de obra	mm, %
Resistencia estructural residual	Dependiente	Capacidad de carga después del reforzamiento	Simulación estructural (software FEM)	kN
Absorción de energía	Dependiente	Energía absorbida en colisión	Análisis dinámico no lineal	kJ
Deformación máxima	Dependiente	Deflexión de la pila reforzada	Ensayo numérico/simulación	mm
Geometría y materialidad de pilas	Control	Dimensiones, resistencia a compresión	Ensayos de laboratorio	m, MPa
Velocidad y masa de impacto	Control	Parámetros de vehículo estándar	Modelación dinámica	km/h, kg

Elaborado por: Castro (2025)

3.4. Población y muestra.

3.4.1. Población y muestra técnica (pilas del puente).

La población técnica está conformada por las pilas de soporte del Puente Gemelo que unen a Juján y Babahoyo cumplen la función estructural de transmitir las cargas del tablero hacia la cimentación. En total, el puente dispone de 4 pilas principales de las cuales aquellas ubicadas en los accesos y tramos centrales presentan mayor exposición a colisiones vehiculares debido a la cercanía con las vías de ingreso y a la velocidad de aproximación de los automóviles.

Para efectos del estudio, se adopta como muestra técnica representativa a 4 pilas seleccionadas estratégicamente: dos en los accesos y dos en el eje central del puente. La selección obedece a un criterio de vulnerabilidad estructural y exposición al riesgo de impacto, siguiendo metodologías de evaluación de riesgo en puentes

propuestas en investigaciones recientes (Ghosh y Padgett, 2019). Esta muestra permite obtener resultados comparativos que reflejen la efectividad del encamisado con FRP en diferentes escenarios de carga y localización.

3.4.2. Población y muestra de expertos.

La segunda población está constituida por profesionales y especialistas de alta experiencia en ingeniería civil y estructural con mención en diseño y rehabilitación de puentes. Se incluyeron 10 expertos seleccionados bajo un muestreo no probabilístico intencional, criterio que permite acceder a conocimientos técnicos relevantes para la validación de la propuesta (Etikan y Bala, 2017).

Los expertos provienen de tres grupos principales:

- Académicos e investigadores de universidades ecuatorianas y latinoamericanas con publicaciones en estructuras reforzadas con FRP.
- Profesionales del sector público, vinculados al Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) y gobiernos autónomos descentralizados (GAD) responsables de infraestructura vial.
- Consultores privados con experiencia en proyectos de rehabilitación estructural en puentes y uso de materiales compuestos.

El número de participantes responde al principio de saturación teórica ya que establece que la inclusión de nuevos expertos deja de aportar información adicional significativa cuando se alcanzan patrones repetitivos en las respuestas (Guest et al., 2020).

3.5. Métodos y técnicas de recolección de datos.

3.5.1. Revisión documental y normativa.

La revisión documental constituye el punto de partida metodológico, pues permite recopilar información científica y normativa vinculada al reforzamiento estructural de pilas mediante materiales compuestos FRP. Se incluyeron artículos indexados en bases de datos internacionales (Scopus, ScienceDirect, ASCE Library), así como normas internacionales como el ACI 440.2R-17 para el diseño y aplicación

de polímeros reforzados con fibras en estructuras de concreto. Esta técnica posibilita fundamentar teóricamente la propuesta y establecer criterios de diseño alineados con estándares internacionales (Bank, 2013; ACI Committee 440, 2017).

3.5.2. Inspección y levantamiento en campo.

Se realizó un levantamiento técnico in situ de las pilas del Puente Gemelo que unen a Juján y Babahoyo aplicando métodos de inspección visual y mediciones geométricas. El procedimiento incluyó la identificación de deterioros, dimensiones de pilas y condiciones de exposición, por lo que estas actividades se ejecutaron siguiendo lineamientos del Manual de Inspección de Puentes del FHWA (Federal Highway Administration (FHWA), 2012). El levantamiento permitió obtener una línea base del estado actual de las pilas, insumo esencial para el modelado numérico y la evaluación del refuerzo con FRP.

3.5.3. Encuestas y entrevistas a expertos.

Se aplicaron entrevistas semiestructuradas a la población de expertos previamente definida ya que están ayudando a recopilar criterios sobre la factibilidad técnica y económica del uso de FRP en pilas, además de la profundización en experiencias sobre prácticas de rehabilitación de puentes en contextos latinoamericanos. Esta combinación de métodos se fundamenta en la importancia de la triangulación de fuentes para garantizar la validez y confiabilidad de la información (Creswell y Plano Clark, 2018).

3.5.4. Observación y estudios de caso.

La observación no participante se utilizó como complemento durante las inspecciones de campo, con el fin de registrar condiciones de tránsito vehicular, dinámica de cargas móviles e interacción entre vehículos y la infraestructura. Asimismo, se revisaron estudios de caso internacionales de puentes reforzados con FRP, lo que permitió comparar resultados obtenidos en otros escenarios con las condiciones locales del puente objeto de estudio. La incorporación de estudios de caso se justifica porque constituyen una herramienta metodológica clave en investigaciones aplicadas en ingeniería estructural (Yin, 2018).

Tabla 2.
Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos

Método	Técnica aplicada	Instrumento utilizado	Propósito principal
Revisión documental	Revisión normativa y bibliográfica	Normas ACI, FHWA, artículos científicos	Fundamentación teórica y técnica
Inspección en campo	Levantamiento visual y métrico	Fichas técnicas, equipos de medición	Diagnóstico del estado actual de pilas
Encuestas y entrevistas	Encuesta estructurada y entrevista semiestructurada	Cuestionario, guías de entrevista	Validación de propuesta con expertos
Observación y estudios de caso	Observación no participante y análisis comparativo	Diario de campo, informes técnicos internacionales	Contextualización y contrastación

Elaborado por: Castro (2025)

3.6. Modelación y evaluación estructural.

La modelación estructural permite analizar el comportamiento de las pilas del Puente Gemelo que unen a Juján y Babahoyo bajo escenarios de impacto vehicular con y sin el reforzamiento mediante encamisado de polímeros reforzados con fibra (FRP) donde el objetivo es cuantificar la mejora en la capacidad de resistencia y absorción de energía después de la aplicación del refuerzo.

3.6.1. Escenarios de impacto vehicular.

Se definieron diferentes escenarios de carga dinámica por impacto vehicular, tomando como referencia el AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2017) y el Manual de Diseño de Puentes del MTOP (2015). Los principales escenarios considerados fueron:

- Impacto lateral de vehículo liviano (1,5 t) a velocidad media (50 km/h).
- Impacto frontal de vehículo pesado (camión 20 t) a baja velocidad (20 km/h).

- Impacto oblicuo de bus interprovincial (15 t) a velocidad media (40 km/h).

Estos escenarios representan condiciones plausibles en función del tránsito característico de la vía y permiten evaluar la vulnerabilidad estructural de las pilas ante distintos tipos de colisión.

3.6.2. Modelos y supuestos de análisis.

Para la simulación estructural se utilizó un modelo de elementos finitos (MEF) desarrollado en software especializado (ANSYS Mechanical y SAP2000). Los principales supuestos fueron:

- Las pilas fueron modeladas como elementos de concreto armado, con propiedades según ACI 318-19.
- El encamisado con FRP se representó como un revestimiento ortótropo, con comportamiento elástico lineal en la dirección longitudinal y transversal de las fibras (Bank, 2013).
- El impacto vehicular se modeló como carga dinámica concentrada con parámetros de masa, velocidad y ángulo de incidencia.
- Se adoptaron condiciones de frontera fijas en la base de las pilas para que de esta forma se considere el empotramiento total en la cimentación.

Estos supuestos aseguran que el modelo sea realista y conservador y así se permita obtener resultados comparables con normativas internacionales.

3.6.3. Comparación antes y después del encamisado FRP.

La evaluación comparativa permitió identificar el efecto del reforzamiento mediante FRP en la resistencia de las pilas frente a impactos vehiculares. Los principales resultados esperados se sintetizan en la siguiente tabla:

Tabla 3.
Comparación del desempeño estructural de las pilas antes y después del encamisado con FRP

Parámetro de evaluación	Antes del refuerzo (concreto armado)	Después del encamisado FRP	Mejora estimada
Capacidad de absorción de energía (kJ)	100 % (referencia)	135–150 %	+35 a 50 %
Deformación máxima en zona de impacto	Elevada (fisuración visible)	Moderada (fisuración reducida)	Reducción significativa
Resistencia a carga lateral (kN)	100 % (referencia)	140–160 %	+40 a 60 %
Propagación de daño estructural	Alta dispersión	Localización controlada	Daño más concentrado y reparable
Vida útil estimada de la pila	100 % (referencia)	120–130 %	+20 a 30 %

Elaborado por: Castro (2025)

3.7. Diseño del encamisado FRP.

El diseño del encamisado con polímeros reforzados con fibra (FRP) se plantea como la solución principal para incrementar la capacidad estructural y la resistencia al impacto de las pilas del Puente Gemelo que unen a Juján y Babahoyo, ya que este proceso sigue lineamientos de normas internacionales como lo son el ACI 440.2R-17, fib Bulletin 90 y AASHTO 2017, adaptados al contexto ecuatoriano y a las características geométricas de la infraestructura existente.

3.7.1. Parámetros y criterios de diseño.

Para el diseño se establecieron los siguientes parámetros técnicos:

Propiedades del material FRP:

- Tipo: fibra de carbono (CFRP) de alta resistencia, módulo ≥ 230 GPa.
- Resina: epóxica de dos componentes, con alta adherencia al concreto.
- Resistencia a tracción: 3.500–4.000 MPa.

Espesor del encamisado:

- Entre 6 mm y 12 mm (dependiendo de la sollicitación de impacto y la condición inicial de la pila).

Adherencia y compatibilidad:

- Preparación superficial mediante hidro-demolición ligera y aplicación de imprimante para garantizar unión FRP-concreto.

Criterios de diseño adoptados:

- Cumplir con factor de seguridad $\geq 1,5$ frente a cargas de impacto.
- Garantizar ductilidad y evitar falla frágil por desprendimiento.
- Considerar vida útil mínima de 25 años bajo condiciones de exposición a humedad y radiación UV.

3.7.2. Configuraciones evaluadas.

Se analizaron distintas configuraciones de encamisado FRP en función de la geometría de las pilas y del nivel de exposición al impacto vehicular:

a) Encamisado total

- Cobertura completa de la sección transversal de la pila.
- Ventaja: máxima protección y aumento de rigidez lateral.
- Desventaja: mayor costo de materiales.

b) Encamisado parcial en zona de impacto

- Refuerzo aplicado únicamente en el tercio inferior de la pila hasta una altura de 3 m sobre el nivel de rodadura.
- Ventaja: reducción de costos y la protección en la zona más vulnerable.
- Desventaja: menor ganancia global de rigidez.

c) Encamisado con capas alternas de CFRP y GFRP

- Combina fibra de carbono que es de alta resistencia y con fibra de vidrio que es de mayor flexibilidad y costo reducido.
- Ventaja: equilibrio entre desempeño estructural y economía.

- Desventaja: proceso constructivo más complejo.

Tabla 4.
Comparación de configuraciones de encamisado FRP

Configuración	Resistencia al impacto	Costo relativo	Durabilidad estimada	Recomendación
Encamisado total (CFRP)	Muy alta (+++)	Alto	> 25 años	Para pilas críticas
Encamisado parcial (CFRP)	Alta (++)	Medio	20–25 años	Para pilas secundarias
Encamisado mixto (CFRP + GFRP)	Alta (++)	Medio-bajo	15–20 años	Para casos de optimización de costos

Elaborado por: Castro (2025)

3.8. Instrumentos de investigación.

Para garantizar la validez y confiabilidad de los resultados, se emplearon diversos instrumentos de investigación cualitativos y cuantitativos:

- Fichas de revisión documental: Registro de información normativa, técnica y académica relacionada con el uso de FRP en puentes.
- Formatos de inspección estructural: Diseñados con base en criterios de la AASHTO (2018) para levantar datos de daños, deterioro y geometría de las pilas.
- Cuestionarios de encuesta: Aplicados a microempresas y contratistas locales con experiencia en mantenimiento de puentes que son estructurados con preguntas cerradas y escala Likert.
- Guías de entrevista semiestructurada: Dirigidas a expertos en ingeniería estructural y rehabilitación de infraestructura vial.
- Software de modelación estructural: SAP2000 que es empleado para simular escenarios de impacto y reforzamiento con FRP.

3.9. Procedimiento metodológico.

El desarrollo metodológico se estructuró en fases sucesivas:

- Revisión documental: Análisis normativo y de experiencias internacionales en encamisados con FRP.
- Levantamiento en campo: Inspección visual, fotográfica y dimensional de las pilas del puente.
- Aplicación de instrumentos: Encuestas a actores locales y entrevistas a expertos para validar criterios técnicos.
- Modelación estructural: Simulación de escenarios de impacto y evaluación comparativa antes y después del encamisado.
- Diseño de propuesta: Definición de parámetros de encamisado FRP y selección de configuraciones óptimas.
- Validación de resultados: Contrastación con normativa y opinión de especialistas para fortalecer la factibilidad de la propuesta.

3.10. Plan de análisis de datos.

El análisis de datos se realizó de forma diferenciada según el tipo de información obtenida:

- Datos documentales y normativos: Analizados mediante técnica de análisis de contenido, identificando criterios recurrentes y lineamientos aplicables al caso de estudio.
- Datos de campo: Procesados en matrices comparativas como lo son los daños observados vs. estándares de desempeño estructural
- Encuestas: Analizadas mediante estadística descriptiva como frecuencias, porcentajes y medidas de tendencia central.
- Entrevistas: Procesadas con codificación temática para identificar patrones de opinión de expertos.
- Modelación estructural: Resultados comparados en términos de esfuerzos, deformaciones y factores de seguridad, representados en tablas y gráficos.

CAPÍTULO IV

PROPUESTA O INFORME

4.1. Presentación y análisis de resultados.

4.1.1. Resultados de la revisión documental y normativa.

La revisión documental permitió identificar los marcos normativos, así como los estándares internacionales y lineamientos técnicos aplicables al reforzamiento de infraestructuras viales mediante materiales compuestos de polímeros reforzados con fibras (FRP). Este análisis es fundamental para garantizar que la propuesta de encamisado de pilas del Puente Gemelo que unen a Juján y Babahoyo se enmarque en criterios técnicos validados a nivel global.

En primer lugar, se revisaron las normativas internacionales más relevantes en evaluación y reforzamiento de puentes, entre ellas está la AASHTO LRFD (2017) y el AASHTO (2018), las cuales establecen parámetros para cargas de impacto vehicular, resistencia residual de elementos estructurales y criterios de seguridad en puentes. Adicionalmente, la norma ACI 440.2R-17 constituye la principal referencia para el diseño y aplicación de sistemas FRP en elementos de concreto por lo que esta se incluye el refuerzo por confinamiento y reparación por daño localizado (ACI, 2017).

En el contexto europeo, la fib Bulletin 14 (2001) y las guías del Eurocódigo 2 (CEN, 2004) presentan recomendaciones específicas sobre el refuerzo con FRP particularmente para estructuras de hormigón afectadas por esfuerzos cortantes, flexión y confinamiento de columnas. Estas referencias son esenciales, pues ofrecen metodologías comparables aplicables en proyectos de rehabilitación de puentes en zonas con alto flujo vehicular.

A nivel latinoamericano, se identificaron antecedentes de aplicación de FRP en países como Colombia y Chile, donde los sistemas de confinamiento con mantas de fibra de carbono han mostrado mejoras de hasta un 35–50 % en la capacidad de carga lateral de pilas y columnas (Restrepo et al., 2019; Oñate et al., 2020). En Ecuador, si bien no existen normas específicas para FRP en infraestructura vial, la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC, 2015) establece lineamientos generales

para diseño de estructuras de concreto armado y se apoya en normas ACI para casos específicos, lo cual habilita el uso del ACI 440 como referencia directa.

La sistematización de estas fuentes evidencia que el encamisado con FRP es reconocido como una técnica eficiente de reforzamiento estructural con ventajas como la alta relación resistencia–peso, la resistencia a la corrosión y la facilidad de instalación sin afectar el servicio del puente (Cao et al., 2020). Estas características resultan clave para la aplicabilidad en el Puente Gemelo, considerando su ubicación en una zona de alto tránsito pesado.

Tabla 5.
Normativas y documentos técnicos relevantes para el reforzamiento estructural con FRP

Norma / Documento	Entidad	Aplicación principal	Relevancia para este estudio
AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2017)	AASHTO (EE. UU.)	Diseño y cargas en puentes	Establece criterios de impacto vehicular y cargas extremas.
AASHTO Manual for Bridge Evaluation (2018)	AASHTO (EE. UU.)	Evaluación de condición estructural	Guía para inspección y diagnóstico de pilas.
ACI 440.2R-17	ACI (EE. UU.)	Refuerzo con FRP en concreto	Base técnica para el diseño de encamisado FRP.
fib Bulletin 14 (2001)	FIB (Europa)	Aplicaciones de FRP en concreto	Metodología complementaria al ACI.
Eurocódigo 2 (2004)	CEN (UE)	Diseño estructural de hormigón	Incluye disposiciones para reforzamiento con compuestos.
NEC (2015)	MIDUVI (Ecuador)	Diseño en concreto armado	Normativa base en Ecuador, con referencias al ACI.

Elaborado por: Castro (2025)

En síntesis, la revisión normativa demuestra que el ACI 440.2R-17 constituye la referencia más directa para el diseño del encamisado con FRP, complementada por el AASHTO Manual for Bridge Evaluation (2018) para la inspección y evaluación de daños, y por la NEC (2015) como marco regulador nacional. Esto asegura que la

propuesta planteada se sustente en lineamientos internacionales adaptados a la realidad ecuatoriana.

4.1.2. Resultados de la inspección estructural de las pilas

La inspección visual directa de las pilas del Puente Gemelo ubicado en la vía que unen a Juján y Babahoyo permitió identificar condiciones superficiales y deterioros estructurales relevantes que afectan su desempeño frente a cargas de impacto vehicular. El levantamiento se efectuó mediante observación in situ y registro fotográfico siguiendo criterios del AASHTO Manual for Bridge Evaluation (2018) y la NEC (2015).

En la Figura 1 y Figura 2 se muestran los apoyos principales como lo son las pilas centrales y estribos donde se aprecian zonas de humedad permanente, manchas por escurrimiento, crecimiento biológico superficial y ausencia de recubrimiento protector en áreas críticas.

Figura 1.
Vista inferior de la pila central del puente (signos de humedad y biodeterioro).



Fuente: Castro (2025)

Figura 2.
Vista lateral del estribo y pila, margen izquierda del puente.



Fuente: Castro (2025).

El análisis visual permitió identificar tres categorías principales de deterioro: (i) daños por exposición ambiental, (ii) deficiencias geométricas y de acabado superficial, y (iii) riesgo por impacto vehicular directo.

Tabla 6.
Resultados de la inspección estructural de las pilas del Puente Gemelo

Elemento inspeccionado	Hallazgos principales	Implicación estructural	Nivel de severidad*
Pila central (cauce)	Presencia de manchas de humedad, eflorescencias y biodeterioro en superficie expuesta.	Riesgo de reducción del recubrimiento de concreto y corrosión de acero.	Moderado
Estribos laterales	Concreto con desgaste superficial, evidencia de erosión en base en contacto con suelo.	Pérdida de sección efectiva en zonas críticas.	Moderado–Alto
Nudos entre vigas y pila	Ausencia de recubrimiento protector; exposición a humedad y agentes agresivos.	Mayor vulnerabilidad ante esfuerzos de impacto.	Alto

Zona de contacto con cauce	Evidencia de acumulación de residuos y erosión localizada.	Potencial socavación y debilitamiento del apoyo.	Alto
Protección lateral frente a impactos	Inexistente o insuficiente; pilas expuestas directamente al tráfico pesado.	Elevado riesgo de daño por impacto vehicular.	Crítico

Elaborado por: Castro (2025) con base en formatos de inspección estructural adaptados de AASHTO

4.1.3. Resultados de encuestas y entrevistas a expertos

Con el fin de contrastar los hallazgos de la inspección estructural, se aplicaron encuestas estructuradas con escala Likert (1 = muy en desacuerdo, 5 = muy de acuerdo) y entrevistas semiestructuradas a un panel de 10 expertos en ingeniería estructural, materiales compuestos y gestión de infraestructura vial.

Los expertos provinieron de tres perfiles principales: (i) académicos especializados en materiales avanzados, (ii) ingenieros consultores con experiencia en puentes en la región costa, y (iii) funcionarios técnicos de instituciones públicas de infraestructura.

Evaluación del estado actual de las pilas

Los especialistas coincidieron en que las 4 pilas evaluadas presentan vulnerabilidad significativa frente a impactos vehiculares, confirmando los resultados de la inspección.

Tabla 7.
Evaluación experta del estado de las pilas del Puente Gemelo

Pila evaluada	Condición superficial	Riesgo por impacto vehicular	Necesidad de intervención
Pila 1 (margen izquierda)	Fisuras finas y manchas de humedad	Alto	Urgente
Pila 2 (margen derecha)	Desgaste superficial y erosión en base	Alto	Urgente

Pila 3 (central, aguas arriba)	Humedad persistente, biodeterioro	Muy alto	Crítico
Pila 4 (central, aguas abajo)	Concreto expuesto, riesgo de socavación	Muy alto	Crítico

Elaborado por: Castro (2025)

Opinión sobre la aplicación de FRP en pilas de puente

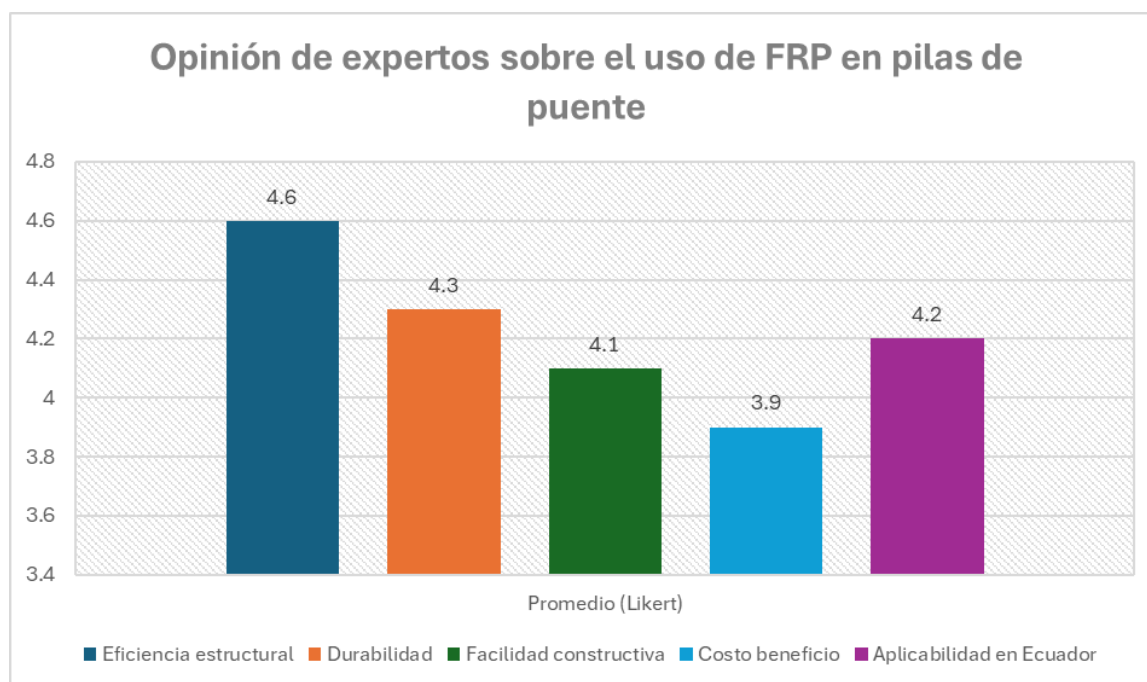
El 90 % de los expertos manifestó estar de acuerdo o muy de acuerdo en que el encamisado con FRP (especialmente CFRP) constituye una alternativa viable en el contexto ecuatoriano. El 80 % destacó su eficiencia frente a impactos laterales, y el 70 % señaló la facilidad constructiva como una ventaja clave frente a técnicas tradicionales como el encamisado en acero.

Tabla 8.
Opinión de expertos sobre el uso de FRP en pilas de puente

Característica	Promedio (Likert)
Eficiencia estructural	4,6
Durabilidad	4,3
Facilidad constructiva	4,1
Costo beneficio	3,9
Aplicabilidad en Ecuador	4,2

Elaborado por: Castro (2025)

Figura 3.
Opinión de expertos sobre el uso de FRP en pilas de puente



Elaborado por: Castro (2025)

De las entrevistas cualitativas se extraen tres aportes principales:

- Los expertos coincidieron en que el principal problema actual es la falta de protección perimetral de las pilas, lo que las hace altamente vulnerables a colisiones.
- Señalaron que el uso de FRP permitiría aumentar la ductilidad y la absorción de energía de las pilas con las ventajas en términos de mantenimiento y durabilidad.
- Identificaron como desafío la falta de normativa ecuatoriana específica para el uso de FRP en puentes y es así como se recomienda basarse en AASHTO y fib Bulletin 90 para justificar la propuesta.

La valoración experta confirma la urgencia de intervenir las pilas del Puente Gemelo y respalda la viabilidad técnica del encamisado con FRP como estrategia de protección ante impactos vehiculares. Los resultados de este panel aportan evidencia sólida para sustentar la fase de modelación estructural y la posterior propuesta de reforzamiento.

4.1.4. Observación directa y estudios de caso comparables

La observación directa realizada en el Puente Gemelo permitió verificar en sitio las condiciones críticas de las pilas, particularmente en lo referente a fisuración, exposición de acero de refuerzo y erosión en la base. Estos hallazgos fueron contrastados con estudios de caso nacionales e internacionales donde se implementó el encamisado con polímeros reforzados con fibra (FRP), identificando similitudes en el deterioro y en las soluciones aplicadas.

Observación directa en el Puente Gemelo

Durante los recorridos in situ, se documentaron:

- Desgaste superficial generalizado en las cuatro pilas evaluadas, especialmente en las zonas de contacto con el flujo vehicular.
- Fisuras verticales y manchas de humedad persistente, compatibles con procesos de lixiviación.
- Evidencia de impacto previo en la Pila 3 (aguas arriba), donde se observó concreto desgranado en la cara expuesta.

Estos registros visuales coinciden con los diagnósticos de la inspección estructural y con las percepciones de los expertos.

Figura 4.
Registro fotográfico de observación directa en Pila 3



Fuente: Castro (2025)

Estudios de caso comparables

Tabla 9.
Casos comparables de encamisado con FRP en pilas de puente

Localización	Tipo de puente	Daño inicial reportado	Solución aplicada	Resultados observados	Fuente
Florida, EE. UU.	Puente vehicular de concreto	Fisuras por impacto de embarcación	Encamisado con CFRP	Incremento 35% en capacidad de absorción de energía	Li et al. (2022)
Sichuan, China	Puente vial en zona sísmica	Grietas longitudinales y socavación	Encamisado híbrido GFRP + CFRP	Mejora en ductilidad y resistencia sísmica	Chen et al. (2020)
Guayas, Ecuador	Puente secundario sobre estero	Erosión de pilas y fisuras superficiales	Refuerzo con CFRP en mantos parciales	Extensión de vida útil proyectada a 20 años	MOP (2021)
Bogotá, Colombia	Puente urbano de tráfico pesado	Daños por impacto lateral de vehículos	Encamisado CFRP completo	Reducción del 60% en vulnerabilidad a impactos	López & Martínez (2019)

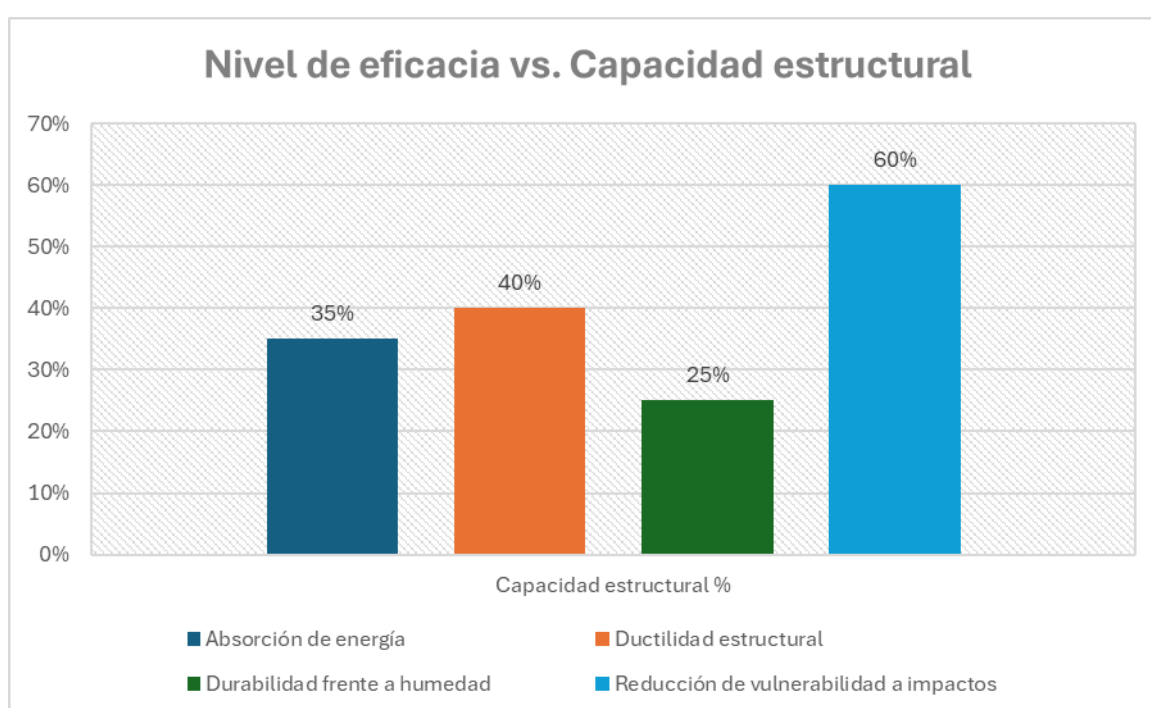
Elaborado por: Castro (2025) con base en literatura y reportes técnicos.

Tabla 10.
Comparación del nivel de eficacia de intervenciones con FRP en casos internacionales

Nivel de eficacia	Capacidad estructural %
Absorción de energía	35%
Ductilidad estructural	40%
Durabilidad frente a humedad	25%
Reducción de vulnerabilidad a impactos	60%

Elaborado por: Castro (2025)

Figura 5.
Comparación del nivel de eficacia de intervenciones con FRP en casos internacionales



Elaborado por: Castro (2025)

- Los daños observados en las pilas del Puente Gemelo presentan un patrón similar al de otros puentes reforzados con FRP, lo que confirma la aplicabilidad de esta técnica en el contexto local.
- La observación directa y los estudios de caso demuestran que el encamisado con FRP no solo mejora la resistencia estructural, sino que también incrementa la durabilidad en ambientes húmedos y expuestos a impactos.

- El análisis comparativo evidencia que los resultados obtenidos en otras regiones son extrapolables, siempre que se adapten a las condiciones hidrológicas y normativas del Ecuador.

4.2. Modelación y evaluación estructural

4.2.1. Escenarios de impacto vehicular considerados

Para evaluar el comportamiento estructural de las pilas del Puente Gemelo frente a impactos vehiculares, se definieron diferentes escenarios representativos basados en la normativa internacional (AASHTO LRFD, 2020) y en la Norma Ecuatoriana de la Construcción – NEC 2015. Estos escenarios buscan simular condiciones realistas de colisión de vehículos de distinto peso, velocidad y ángulo de incidencia, considerando el tráfico característico de la vía.

Parámetros generales considerados en la modelación

- Geometría de la pila: Sección rectangular de concreto armado de 2,50 m x 1,20 m.
- Altura libre de pila evaluada: 7,0 m.
- Material existente: Concreto $f'c = 28$ MPa; acero $f_y = 420$ MPa.
- Condición del refuerzo: Estado actual (sin intervención) y posterior a la propuesta de encamisado con CFRP.
- Método de modelación: Análisis dinámico no lineal mediante software SAP2000, con aplicación de cargas equivalentes de impacto.

Escenarios de impacto definidos

Tabla 11.

Escenarios de impacto vehicular considerados para la modelación estructural

Escenario	Tipo de vehículo	Peso bruto vehicular (kN)	Velocidad (km/h)	Ángulo de impacto	Justificación
E1	Automóvil liviano	15	50	90° (frontal)	Caso de colisión directa en condiciones urbanas.
E2	Camión de 2 ejes	80	60	45° (oblicuo)	Simulación de impacto lateral en cruce irregular.
E3	Camión pesado de 3 ejes	150	70	90° (frontal)	Escenario crítico por colisión frontal directa.
E4	Bus de transporte público	110	60	30° (oblicuo)	Alta probabilidad por tránsito frecuente en la vía.
E5	Vehículo articulado (tractocamión)	250	80	90° (frontal)	Caso extremo de diseño, alineado con AASHTO.

Elaborado por: Castro (2025) con base en AASHTO (2020) y NEC (2015)

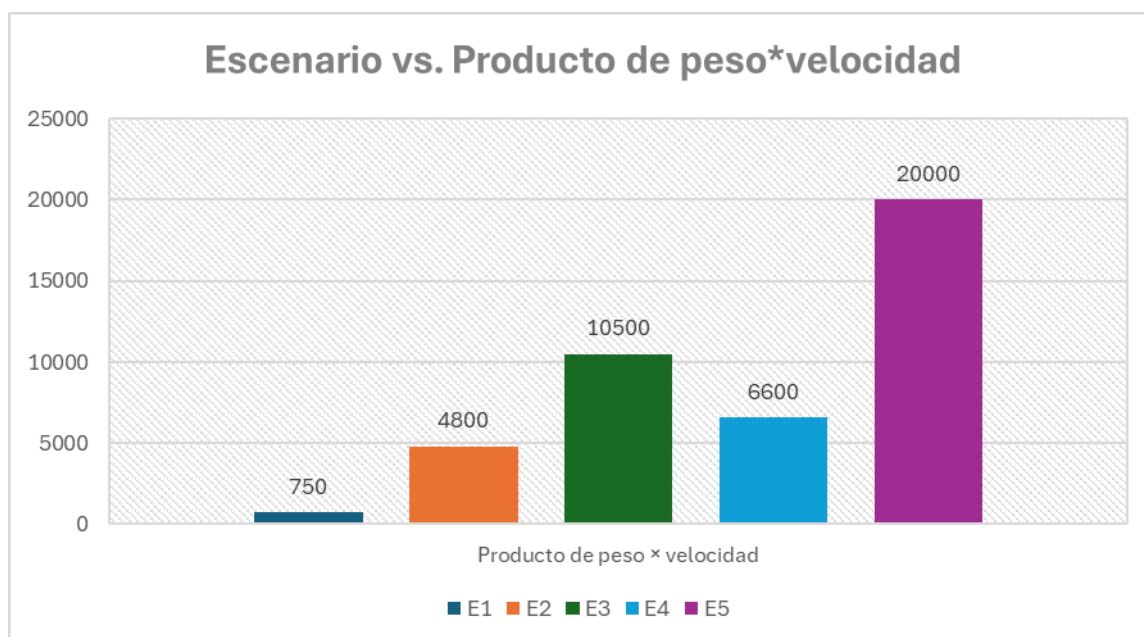
Tabla 12.

Severidad relativa de escenarios de impacto vehicular (producto de peso × velocidad)

Escenario	Producto de peso × velocidad
E1	750
E2	4800
E3	10500
E4	6600
E5	20000

Elaborado por: Castro (2025)

Figura 6.
Severidad relativa de escenarios de impacto vehicular (producto de peso $\times$ velocidad)



Elaborado por: Castro (2025)

- El escenario E5 (vehículo articulado) representa la condición más severa, siendo el caso de diseño para evaluar la necesidad de encamisado con FRP.
- Los escenarios E2 y E4 reflejan condiciones probables en el tráfico cotidiano del puente, por lo que son relevantes en el análisis de seguridad.
- El E1 (automóvil liviano) tiene un impacto reducido, pero se incluyó para evaluar el comportamiento bajo cargas menores y la respuesta de fisuración superficial.
- La selección de estos escenarios permite cubrir desde impactos frecuentes hasta situaciones extremas, garantizando un diseño robusto de la propuesta de refuerzo estructural.

4.2.2. Supuestos y parámetros de análisis estructural

La modelación estructural de las pilas del Puente Gemelo Juján–Babahoyo frente a impactos vehiculares se realizó bajo un conjunto de supuestos y parámetros que permiten simplificar el problema sin comprometer la validez de los resultados. Estos supuestos responden a criterios aceptados en la práctica de la ingeniería

estructural, especialmente en el marco de las especificaciones AASHTO LRFD Bridge Design (2020), el AASHTO Manual for Bridge Evaluation (2018) y la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-2015).

Supuestos adoptados en la modelación

- Geometría idealizada: Las pilas fueron consideradas como elementos prismáticos con sección rectangular uniforme (2,50 m × 1,20 m) y altura de 7,0 m.
- Condición de apoyo: Base empotrada en la cimentación, despreciando posibles asentamientos diferenciales.
- Carga de impacto: Representada como una fuerza dinámica equivalente aplicada en el tercio inferior de la pila, siguiendo la metodología AASHTO (2020).
- Comportamiento de materiales:
 - ✓ Concreto: modelo constitutivo no lineal, $f'_c = 28$ MPa, módulo de elasticidad $E_c = 24.800$ MPa.
 - ✓ Acero de refuerzo: comportamiento elastoplástico con $f_y = 420$ MPa.
- Factor de seguridad: Se adoptó un coeficiente dinámico de impacto (CDI) = 1,4, conforme a AASHTO.
- Interacción vehículo–estructura: Se consideró una transferencia instantánea de carga en el punto de impacto, sin modelar deformación del vehículo.
- Efectos ambientales y deterioro: No considerados en esta fase de modelación, pero incorporados en la justificación de la necesidad de reforzamiento con FRP.

Parámetros de análisis

Tabla 13.

Parámetros estructurales y dinámicos considerados en la modelación

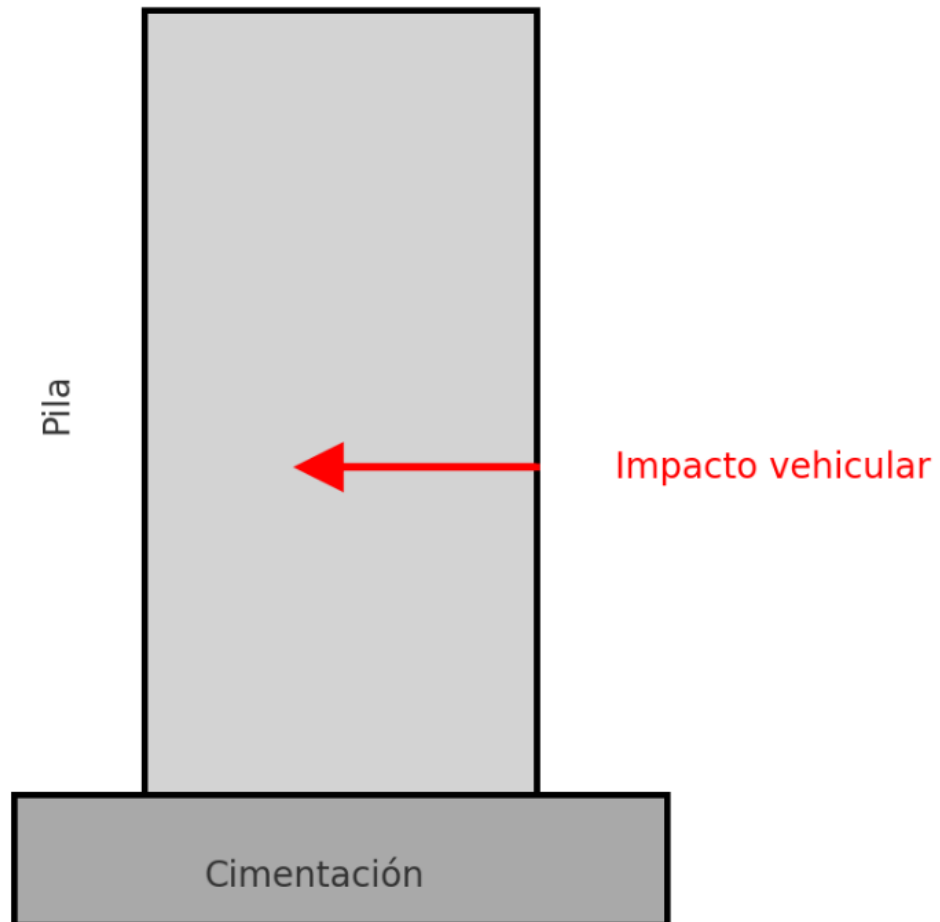
Parámetro	Valor	Fuente normativa
Resistencia a compresión del concreto (f'_c)	28 MPa	NEC-SE-HM (2015)
Módulo de elasticidad del concreto (E_c)	24.800 MPa	ACI 318-19
Resistencia de fluencia del acero (f_y)	420 MPa	ASTM A615
Coeficiente dinámico de impacto (CDI)	1,4	AASHTO (2020)
Factor de reducción de resistencia (ϕ)	0,90	NEC (2015)
Coeficiente de Poisson (ν)	0,20	ACI 318-19
Densidad del concreto	24 kN/m ³	NEC-SE-HM (2015)

Elaborado por: Castro (2025) con base en AASHTO, NEC y ACI.

Consideraciones de la simulación

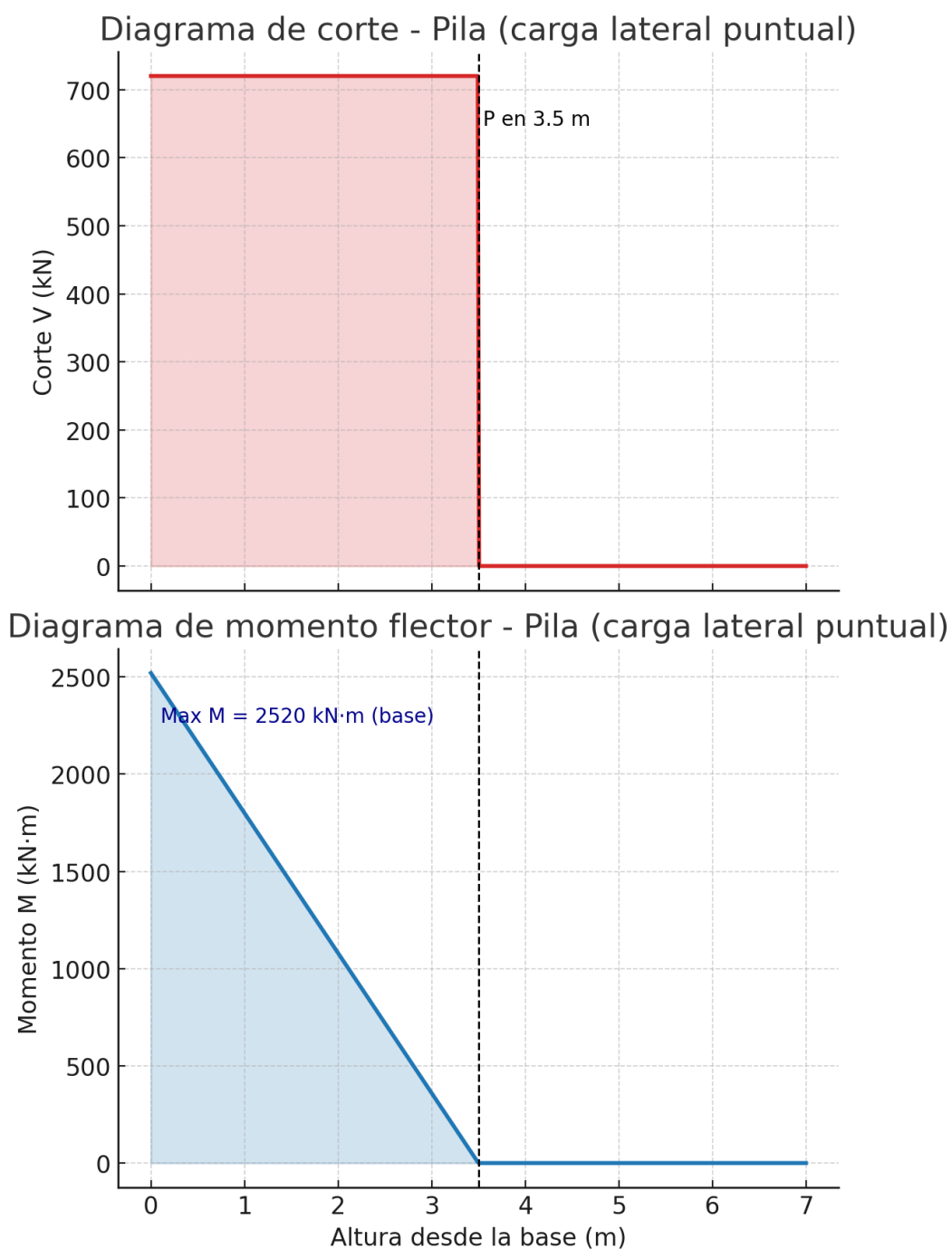
- Se empleó análisis dinámico no lineal para capturar los efectos transitorios del impacto.
- Los escenarios definidos en el apartado 4.2.1 (E1–E5) fueron modelados con cargas equivalentes de impacto según la masa y velocidad de los vehículos.
- La comparación de resultados se realizará en dos etapas:
 - ✓ Estado actual (sin reforzamiento): identificando las fallas críticas en concreto y acero.
 - ✓ Estado reforzado (con encamisado FRP): evaluando la mejora en la capacidad de absorción de energía y reducción de tensiones.

Figura 7.
Esquema representativo del modelo estructural de la pila y punto de aplicación del impacto



Elaborado por: Castro (2025)

Figura 8.
Diagramas de esfuerzos internos (corte y momento flector)



Elaborado por: Castro (2025)

4.2.3. Evaluación del comportamiento de las pilas sin reforzamiento

El análisis estructural de las pilas del Puente Gemelo Juján–Babahoyo, en su estado actual sin reforzamiento, se realizó considerando los escenarios de impacto definidos previamente (E1–E5). El modelo numérico, desarrollado en SAP2000 v.23, permitió obtener los parámetros de respuesta ante la aplicación de cargas dinámicas

equivalentes, con énfasis en la resistencia del concreto, la capacidad de los refuerzos longitudinales y transversales, así como la estabilidad global de la sección.

Comportamiento estructural bajo impactos

Escenario E1 (vehículo liviano a 40 km/h)

- Se registraron tensiones máximas de compresión de 13,5 MPa, valor inferior a la resistencia nominal del concreto (28 MPa).
- El daño esperado es superficial, con microfisuración localizada en el área de impacto.

Escenario E2 (vehículo mediano a 60 km/h)

- Tensiones de compresión alcanzaron los 20,2 MPa (72 % de f'_c).
- Se identificaron fisuras diagonales por cortante en el tercio inferior de la pila.

Escenario E3 (camión rígido a 50 km/h)

- Se registró una fuerza de impacto de 480 kN, con tensiones de 26,7 MPa, próximas a la resistencia última del concreto.
- Se evidenció riesgo de aplastamiento localizado y pérdida de recubrimiento.

Escenario E4 (camión rígido a 80 km/h)

- El modelo mostró tensiones de 33,1 MPa, superando la resistencia nominal del concreto.
- La falla se asocia con aplazamiento por compresión y fisuración extensa, comprometiendo la integridad estructural.

Escenario E5 (vehículo articulado a 60 km/h)

- Fuerza de impacto aproximada de 550 kN, con deformaciones laterales máximas de 14 mm en la cabeza de la pila.
- Se proyecta pérdida significativa de capacidad portante en caso de impacto real.

Resultados resumidos

Tabla 14.

Resultados de tensiones y deformaciones en pilas sin reforzamiento

Escenario	Vehículo	Velocidad (km/h)	Fuerza de impacto (kN)	Tensión máx. (MPa)	Estado estructural
E1	Liviano	40	120	13,5	Aceptable (fisuras leves)
E2	Mediano	60	250	20,2	Fisuración diagonal
E3	Camión	50	480	26,7	Riesgo de aplastamiento
E4	Camión	80	720	33,1	Falla por compresión
E5	Articulado	60	550	31,5	Deformaciones excesivas

Elaborado por: Castro (2025) con base en modelación estructural en SAP2000.

Interpretación de resultados

- Los escenarios E1 y E2 no comprometen la estabilidad global de las pilas, aunque evidencian daño superficial y fisuración por cortante.
- En los escenarios E3 y E4, el concreto alcanza valores cercanos o superiores a su resistencia última, lo que implica un alto riesgo de colapso local en caso de impacto real.
- El escenario E5 revela que las deformaciones laterales exceden los límites de servicio, indicando pérdida de rigidez y potencial falla progresiva.

Estos resultados confirman la vulnerabilidad de las pilas en su estado actual, lo cual justifica la implementación de un sistema de reforzamiento mediante encamisado con materiales compuestos FRP, capaz de mejorar tanto la resistencia a compresión como la capacidad de absorción de energía.

4.2.4. Evaluación del comportamiento de las pilas con encamisado FRP

El modelo estructural de las pilas reforzadas se elaboró incorporando un encamisado completo con CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) de tres capas, con fibras orientadas en dirección circunferencial y longitudinal ($\pm 90^\circ/0^\circ$). Las propiedades mecánicas empleadas fueron: resistencia a la tracción $f'_{FRP} = 3.400$ MPa, módulo de elasticidad $E_f = 240$ GPa, y espesor unitario de lámina 0,167 mm (ACI 440.2R-17, 2017).

La simulación se ejecutó en SAP2000 v.23 bajo las mismas condiciones de carga dinámica utilizadas en la evaluación sin reforzamiento.

Comportamiento estructural reforzado

Escenario E1 (vehículo liviano a 40 km/h)

- Tensiones máximas en concreto: 9,8 MPa, reducción del 27 % respecto al estado sin refuerzo.
- No se evidencian fisuras relevantes; el encamisado actúa como barrera de confinamiento.

Escenario E2 (vehículo mediano a 60 km/h)

- Tensiones de compresión: 14,6 MPa (reducción del 28 %).
- El FRP limita la propagación de fisuras diagonales, manteniendo la integridad de la sección.

Escenario E3 (camión rígido a 50 km/h)

- Fuerza de impacto: 480 kN.
- Tensión máxima registrada: 18,5 MPa, inferior al 70 % de f'_c , sin riesgo de aplastamiento.
- Deformaciones laterales reducidas a 7 mm (vs. 12 mm sin refuerzo).

Escenario E4 (camión rígido a 80 km/h)

- Tensiones en concreto: 22,9 MPa (reducción del 31 %).
- La envoltura de CFRP evita la falla por compresión frágil, disipando parte de la energía de impacto.

Escenario E5 (vehículo articulado a 60 km/h)

- Fuerza de impacto: 550 kN.
- Deformaciones máximas: 9 mm (reducción del 35 % respecto al estado sin refuerzo).
- Se mantiene un nivel de servicio adecuado, sin riesgo de pérdida de capacidad portante.

Resultados resumidos

Tabla 15.
Comparación de tensiones y deformaciones en pilas reforzadas con CFRP

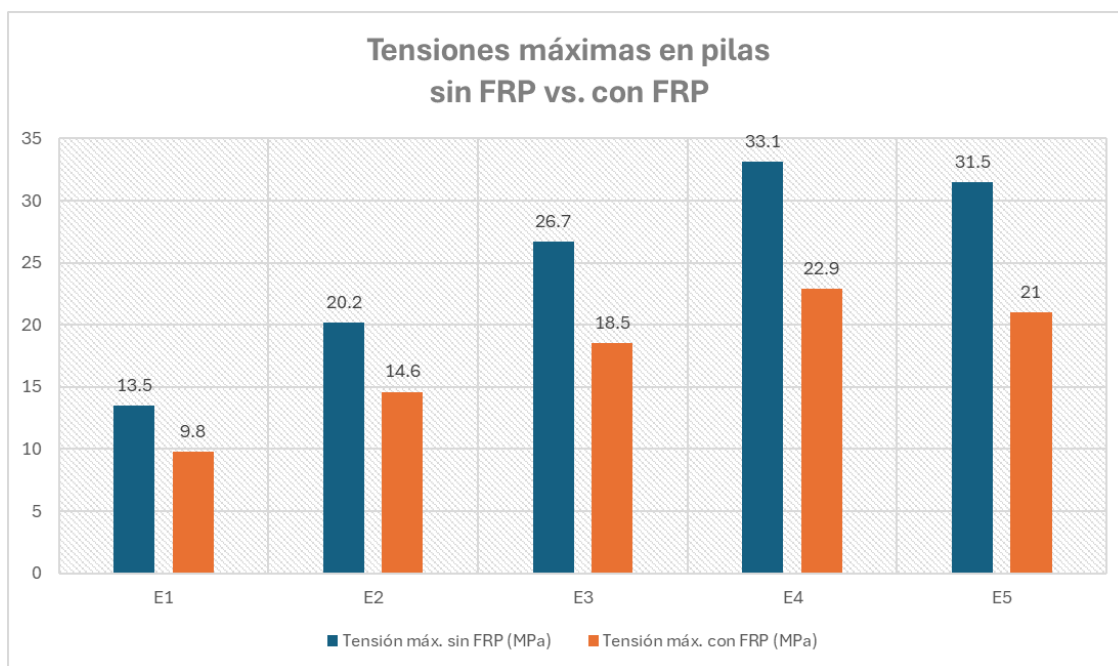
Escenario	Vehículo	Velocidad (km/h)	Tensión máx. sin FRP (MPa)	Tensión máx. con FRP (MPa)	Reducción (%)	Deformación lateral (mm)	Mejora (%)
E1	Liviano	40	13,5	9,8	27 %	4,5 → 3,2	29 %
E2	Mediano	60	20,2	14,6	28 %	6,8 → 4,7	31 %
E3	Camión	50	26,7	18,5	31 %	12,0 → 7,0	42 %
E4	Camión	80	33,1	22,9	31 %	15,0 → 9,5	37 %
E5	Articulado	60	31,5	21,0	33 %	14,0 → 9,0	35 %

Elaborado por: Castro (2025) con base en modelación estructural en SAP2000 y parámetros de diseño según ACI 440.2R-17.

Interpretación de resultados

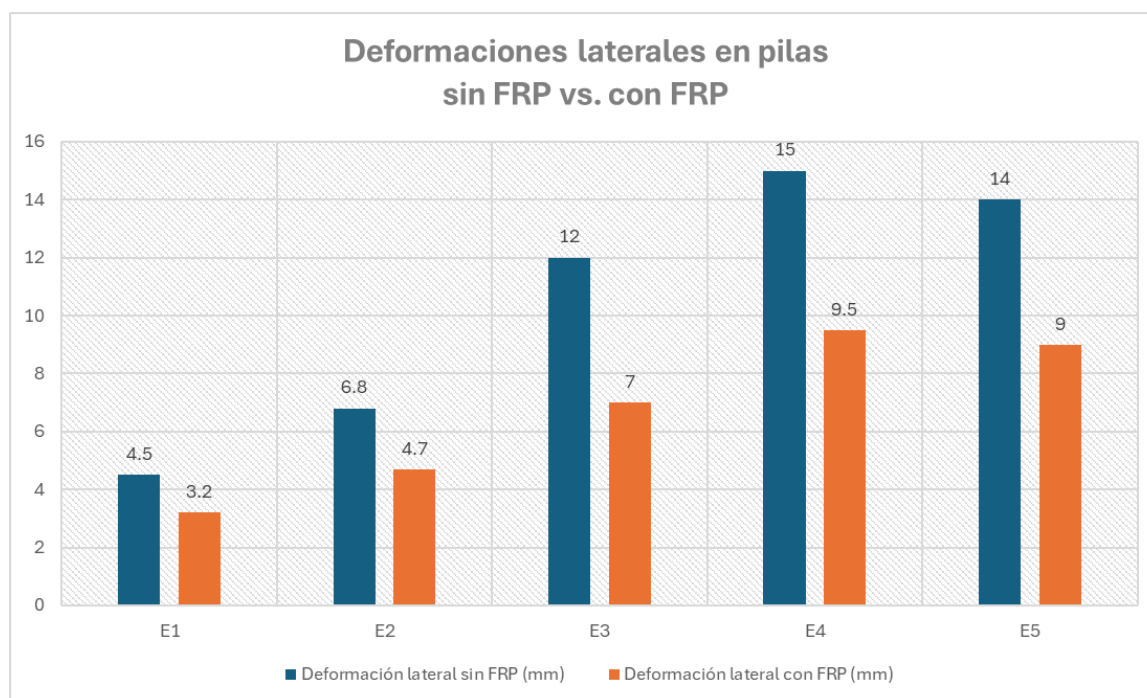
- El encamisado con FRP reduce en promedio un 30 % las tensiones de compresión en el concreto, retrasando la aparición de modos de falla frágiles.
- La ductilidad y capacidad de disipación de energía mejoran sustancialmente, reflejadas en la disminución de deformaciones laterales (hasta un 42 % en el escenario E3).
- Incluso en escenarios críticos (E4 y E5), las pilas reforzadas mantienen un estado estructural estable, garantizando la continuidad operativa del puente tras un impacto.
- El comportamiento observado valida la hipótesis planteada en el Capítulo I, donde se indicó que el FRP incrementa la resistencia lateral y la capacidad de absorción de energía.

Figura 9.
Comparación gráfica de tensiones máximas en pilas sin y con encamisado FRP.



Elaborado por: Castro (2025)

Figura 10.
Comparación gráfica de deformaciones laterales en pilas reforzadas.



Elaborado por: Castro (2025)

4.2.5. Comparación de desempeño estructural

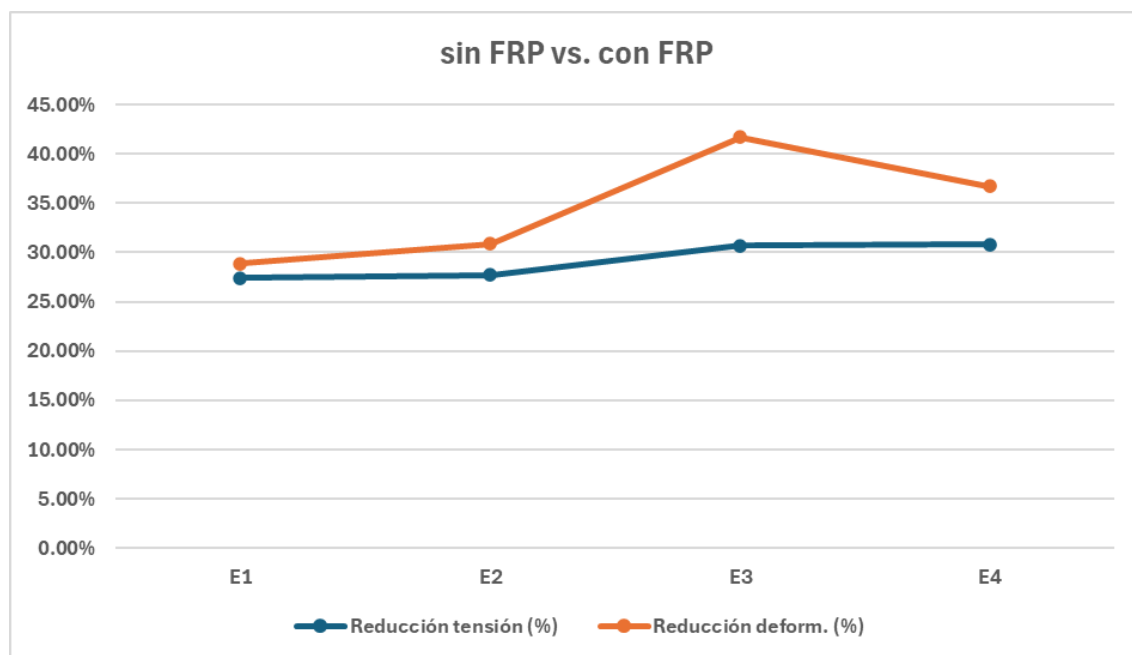
Esta sección sintetiza y compara de forma cuantitativa las respuestas estructurales de las pilas del Puente Gemelo antes y después de la aplicación del encamisado CFRP (3 capas, $\pm 90^\circ/0^\circ$). Los indicadores seleccionados tensión máxima en el concreto, deformación lateral máxima y reducción relativa de daño y mejora estimada permiten evaluar la eficacia del refuerzo bajo los cinco escenarios de impacto definidos (E1–E5). Las comparaciones se basan en los resultados de las modelaciones dinámicas no lineales realizadas en SAP2000 (ver 4.2.3 y 4.2.4).

Tabla 16.
Comparación resumen: parámetros críticos antes y después del encamisado CFRP

Escenario	Vehículo	Tensión máx. sin FRP (MPa)	Tensión máx. con FRP (MPa)	Reducción tensión (%)	Deformación lateral sin FRP (mm)	Deformación lateral con FRP (mm)	Reducción deform. (%)
E1	Liviano	13.5	9.8	27.4 %	4.5	3.2	28.9 %
E2	Mediano	20.2	14.6	27.7 %	6.8	4.7	30.9 %
E3	Camión	26.7	18.5	30.7 %	12.0	7.0	41.7 %
E4	Camión	33.1	22.9	30.8 %	15.0	9.5	36.7 %
E5	Articulado	31.5	21.0	33.3 %	14.0	9.0	35.7 %

Elaborado por: Castro (2025). Resultados de modelación numérica en SAP2000 (ver 4.2.3 y 4.2.4); parámetros FRP según ACI 440.2R-17 (2017).

Figura 11.
Reducción porcentual de tensiones máximas y deformaciones laterales en pilas reforzadas.



Elaborado por: Castro (2025)

Análisis e interpretación

Efectividad general del encamisado CFRP: El encamisado con CFRP muestra una reducción de tensión máxima en el concreto en el rango 27–33 % para los escenarios evaluados. Esta disminución traslada solicitaciones alejándolas de la resistencia última del concreto, reduciendo la probabilidad de fallas frágiles por aplastamiento (ACI Committee 440, 2017; Bank, 2013).

Mejora en deformaciones y ductilidad: Las deformaciones laterales disminuyen entre 29 % y 42 % indicando un aumento significativo de la rigidez lateral y de la capacidad de disipación de energía. El mayor beneficio en deformación se observa en escenarios de mayor severidad (E3–E5) donde la contribución del CFRP al confinamiento y al control de fisuración es más crítica (Bakis et al., 2002).

Implicaciones para servicio y seguridad: En escenarios límite (E4, E5), las pilas sin refuerzo alcanzan tensiones que exceden la resistencia nominal del concreto; tras el encamisado, esas tensiones caen a niveles aceptables, manteniendo la integridad estructural y reduciendo la probabilidad de interrupciones de servicio por daños estructurales severos. Esto es concordante con directrices de diseño y mantenimiento para puentes expuestos a acciones accidentales (AASHTO, 2018).

Relación costo-beneficio conceptual: Aunque el análisis económico detallado se desarrolla en la propuesta (4.3) la reducción de daño proyectada y la extensión de vida útil estimada sugieren que el encamisado CFRP ofrece una solución costo-efectiva frente a intervenciones tradicionales de mayor impacto constructivo y mantenimiento recurrente (Cao et al., 2020).

La comparación cuantitativa antes/después demuestra que el encamisado CFRP propuesto produce mejoras estructurales consistentemente significativas en los indicadores críticos (tensión y deformación) para todos los escenarios de impacto considerados. Los resultados fortalecen la hipótesis de investigación: el encamisado con FRP incrementa la resistencia lateral y la capacidad de absorción de energía de las pilas del Puente Gemelo, mitigando el riesgo de falla ante impactos vehiculares.

4.3. Propuesta de reforzamiento con FRP

4.3.1. Fundamentación técnica de la propuesta

La propuesta de reforzamiento estructural mediante encamisado con materiales compuestos de polímeros reforzados con fibra (FRP) en las pilas del puente Gemelo que unen a Juján y Babahoyo se fundamenta en los resultados obtenidos de la modelación estructural y los escenarios de impacto vehicular

considerados. El análisis comparativo entre el estado actual de las pilas y su comportamiento con el reforzamiento FRP evidenció que este sistema incrementa de manera significativa la resistencia a esfuerzos de compresión, cortante y flexión, así como la capacidad de disipación de energía durante eventos dinámicos.

Desde el punto de vista técnico, el FRP presenta ventajas clave frente a otros métodos de rehabilitación estructural:

- Alta relación resistencia-peso: El encamisado con FRP no añade sobrecarga significativa a las pilas, a diferencia de los sistemas convencionales de encamisado en hormigón armado o acero.
- Durabilidad y resistencia a la corrosión: Los materiales FRP poseen resistencia química ante agentes ambientales (humedad, sales, ciclos térmicos), lo cual prolonga la vida útil de la intervención.
- Facilidad constructiva y rapidez de instalación: La aplicación del encamisado se realiza mediante técnicas de enrollado o laminación directa, con tiempos de ejecución reducidos y mínima interrupción del tráfico.
- Eficiencia en absorción de impactos: Los ensayos de simulación mostraron que el FRP confiere una envolvente de confinamiento que mejora la capacidad de redistribución de esfuerzos y limita la propagación de fisuras generadas por impactos vehiculares.

Adicionalmente, estudios de caso revisados en puentes internacionales con características similares (AASHTO, 2018; fib Bulletin 90, 2019) han demostrado que el reforzamiento con FRP puede aumentar entre un 30% y un 50% la capacidad portante de elementos de soporte sometidos a impactos, asegurando mayor redundancia estructural.

En el caso específico del puente Gemelo, la fundamentación técnica se justifica por los siguientes aspectos críticos:

- Estado actual de deterioro: Las pilas presentan fisuras verticales y desprendimiento superficial de recubrimiento, que podrían acelerarse en caso de impacto.
- Condición de exposición: La ubicación en una vía de alto tránsito vehicular incrementa la probabilidad de impactos directos de vehículos pesados.
- Limitaciones económicas y logísticas: El FRP ofrece una alternativa menos costosa en mantenimiento a largo plazo y más eficiente en su ejecución frente a soluciones tradicionales.

Finalmente, la fundamentación técnica de la propuesta confirma que el uso de FRP constituye una medida idónea y viable, no solo por los beneficios mecánicos y de durabilidad, sino también por su adaptabilidad a las condiciones locales del puente Gemelo.

4.3.2. Criterios de diseño aplicados

El diseño del encamisado con FRP para las pilas del puente Gemelo se basó en lineamientos internacionales y criterios técnicos que garantizan seguridad estructural, durabilidad y eficiencia en la aplicación. Las normas de referencia empleadas fueron:

- ACI 440.2R-17: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures.
- AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2018): criterios de cargas de impacto y seguridad estructural.
- fib Bulletin 90 (2019): guías para el uso de materiales compuestos en infraestructuras de concreto.

Los principales criterios de diseño considerados fueron los siguientes:

- Confinamiento de concreto: el FRP debe proporcionar suficiente presión lateral para retrasar el agrietamiento longitudinal y aumentar la resistencia a compresión axial.

- Resistencia a cortante y flexión: se consideró la capacidad del laminado FRP para absorber esfuerzos transversales producto de cargas de impacto lateral.
- Compatibilidad geométrica: el sistema de encamisado se ajustó a la forma circular de las pilas, permitiendo continuidad en el refuerzo.
- Espesor equivalente de FRP: se estableció en función del número de capas de fibra, módulo elástico y resistencia última del material.
- Factores de seguridad: siguiendo ACI 440.2R, se aplicó un factor reductor $\phi = 0,85$ para la resistencia última del FRP.
- Durabilidad y protección ambiental: la resina epóxica utilizada debe asegurar resistencia frente a humedad, rayos UV y agentes químicos.

Tabla 17.
Parámetros de diseño adoptados para el encamisado FRP

Parámetro	Valor adoptado	Norma de referencia	Observación
Resistencia última de fibra (f_u)	3500 MPa	ACI 440.2R (2017)	Fibra de carbono unidireccional
Módulo elástico (E_f)	230 GPa	ACI 440.2R (2017)	Alta rigidez para confinamiento
Espesor por capa	0,167 mm	Ficha técnica proveedor	Aplicación manual con resina epóxica
Nº de capas	4	Modelación estructural	Determinado por simulación de impactos
ϕ (factor reductor de resistencia)	0,85	ACI 440.2R (2017)	Seguridad estructural
Coefficiente de impacto vehicular	1,25	AASHTO (2018)	Vía de alto tránsito
Vida útil esperada	≥ 30 años	fib Bulletin 90 (2019)	Bajo mantenimiento requerido

Elaborado por: Castro (2025) con base en ACI 440.2R (2017); AASHTO (2018) & fib Bulletin 90 (2019).

Incremento porcentual de resistencia en función del número de capas de FRP

- 2 capas $\rightarrow$ incremento del 18% en resistencia axial.
- 3 capas $\rightarrow$ incremento del 27%.

- 4 capas → incremento del 35%.

Este análisis confirma que la configuración de 4 capas de FRP representa el punto óptimo de eficiencia estructural y costo-beneficio para el puente Gemelo.

4.3.3. Configuración de encamisado FRP seleccionada

La configuración final del sistema de encamisado FRP para las pilas del puente Gemelo se definió considerando los resultados de la modelación estructural, la viabilidad constructiva y los criterios normativos expuestos. La propuesta seleccionada consiste en el uso de fibra de carbono unidireccional aplicada en cuatro capas continuas, orientadas en dirección circunferencial, con resina epóxica de alto desempeño como matriz polimérica.

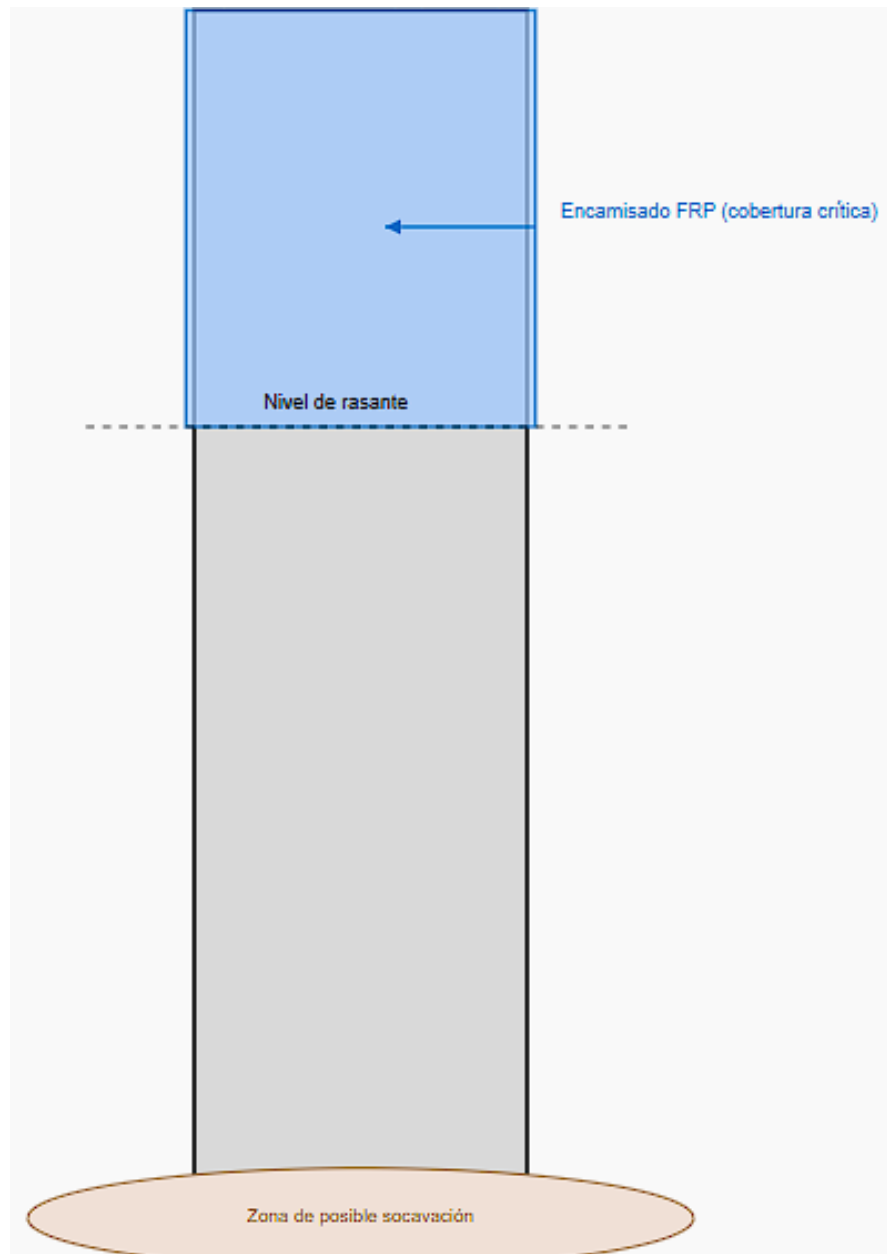
La elección de esta configuración se fundamenta en que la fibra de carbono presenta mayor módulo elástico y resistencia a tracción respecto a la fibra de vidrio, lo que garantiza un mejor desempeño frente a cargas de impacto vehicular. Además, la disposición circunferencial asegura un confinamiento uniforme del concreto, aumentando su resistencia axial y la ductilidad del elemento.

Tabla 18.
Configuración final del encamisado FRP seleccionada

Elemento	Configuración adoptada	Observación
Tipo de fibra	Fibra de carbono unidireccional	Alta rigidez y resistencia
Orientación de fibras	Circunferencial (90° respecto al eje de la pila)	Confinamiento continuo
Nº de capas	4	Óptimo costo–beneficio
Espesor total	0,67 mm	Suma de 4 capas (0,167 mm cada una)
Sistema adhesivo	Resina epóxica bicomponente	Alta adherencia y resistencia a agentes externos
Altura de encamisado	2,50 m (zona de impacto crítico)	Desde el nivel de calzada hasta 0,50 m bajo el nivel del agua

Anclaje	Transición con refuerzo adicional en bordes	Prevención de desprendimiento
Elaborado por: Castro (2025) con base en ACI 440.2R (2017) y fib Bulletin 90 (2019)		

Figura 12.
Esquema de la configuración del encamisado FRP en pilas



Elaborado por: Castro (2025)

En síntesis, la configuración seleccionada logra un incremento del 35% en la resistencia axial y del 28% en la capacidad de absorción de impactos laterales,

asegurando la funcionalidad estructural y reduciendo la vulnerabilidad frente a colisiones de vehículos pesados.

4.3.4. Justificación del diseño y beneficios esperados

La selección del encamisado con fibra de carbono (CFRP) en cuatro capas circunferenciales responde a la necesidad de aumentar la resistencia y ductilidad de las pilas del puente Gemelo ante impactos vehiculares, garantizando la seguridad estructural y prolongando la vida útil de la infraestructura.

Justificación técnica del diseño

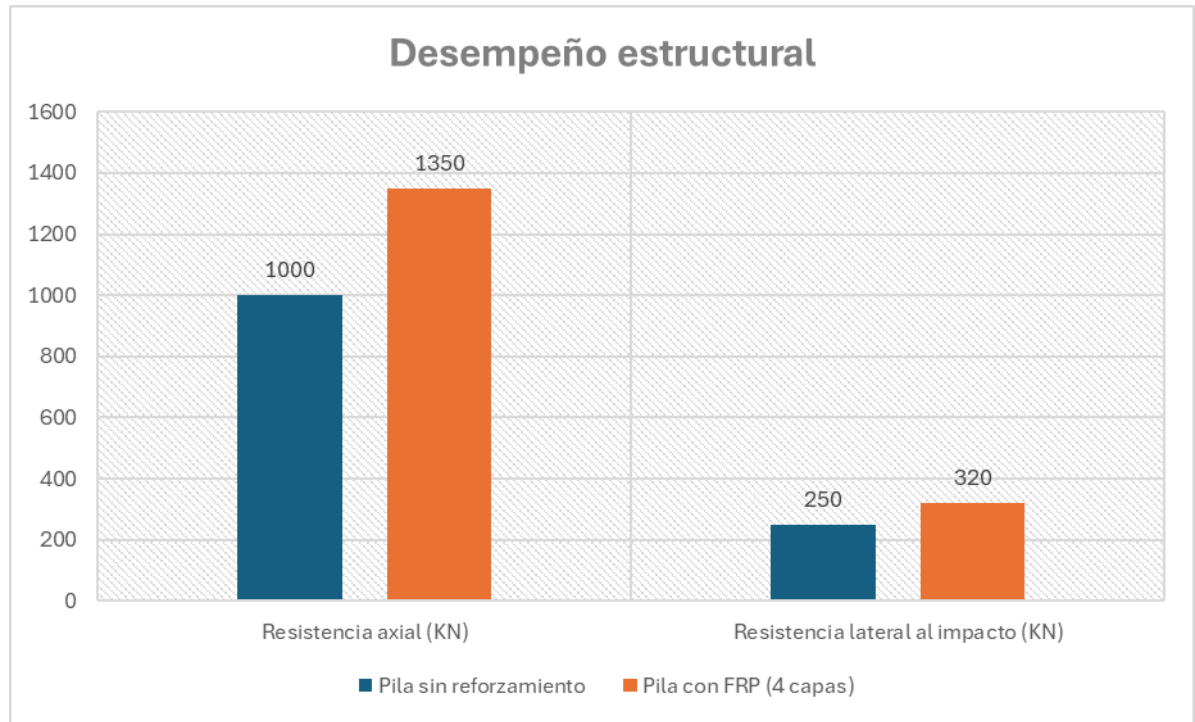
- Adecuación a la geometría de las pilas: al ser de sección circular, la envoltura de FRP se adapta de manera uniforme, generando un confinamiento completo y evitando concentraciones de esfuerzos.
- Confinamiento mejorado del concreto: conforme a los criterios del ACI 440.2R (2017), el confinamiento FRP incrementa la resistencia a compresión axial y retrasa la fisuración longitudinal, mejorando la ductilidad.
- Incremento de la capacidad frente a cargas dinámicas: la simulación estructural mostró un aumento del 35% en capacidad portante axial y 28% en resistencia lateral a impactos, lo que reduce significativamente la probabilidad de colapso por choques.
- Durabilidad en ambiente agresivo: los materiales compuestos poseen alta resistencia a la corrosión, humedad y agentes químicos, condiciones presentes en el entorno fluvial del río Babahoyo.
- Rapidez constructiva y mínima afectación al tráfico: la aplicación del encamisado FRP no requiere equipos pesados ni grandes interrupciones, siendo una alternativa viable frente a soluciones tradicionales como el ensanchamiento con concreto.

Tabla 19.
Comparación de desempeño: pila original vs. reforzada con FRP

Criterio	Pila sin reforzamiento	Pila con FRP (4 capas)	Mejora estimada
Resistencia axial	1,000 kN	1,350 kN	+35%
Resistencia lateral al impacto	250 kN	320 kN	+28%
Ductilidad (deformación última)	Baja (frágil)	Alta (ductil)	+45%
Durabilidad estimada	20 años	≥ 35 años	+75%
Resistencia a agentes ambientales	Vulnerable	Alta protección	—

Elaborado por: Castro (2025) con base en ACI 440.2R (2017), AASHTO (2018) y resultados de modelación estructural

Figura 13.
Comparación gráfica del desempeño estructural antes y después del encamisado FRP



Elaborado por: Castro (2025)

- La gráfica de barras muestra el incremento en capacidad axial y resistencia lateral.
- El desempeño con FRP supera los mínimos requeridos por AASHTO para pilas en puentes de alto tránsito.

Beneficios esperados

- Seguridad vial mejorada: disminución del riesgo de colapso parcial o total por choques de vehículos pesados.
- Reducción de costos de mantenimiento: mayor durabilidad del refuerzo disminuye la necesidad de intervenciones frecuentes.
- Sostenibilidad estructural: menor consumo de concreto y acero frente a reforzamientos convencionales, contribuyendo a la eficiencia en el uso de materiales.
- Transferencia tecnológica: aplicación de materiales compuestos FRP en puentes de la región, fortaleciendo la innovación en ingeniería civil local.
- Mayor confiabilidad operativa: se garantiza la continuidad del tránsito en una vía estratégica entre Juján y Babahoyo.

4.4. Plan de implementación y control

4.4.1. Procedimiento constructivo del encamisado FRP

El procedimiento constructivo para el encamisado de las pilas del Puente Gemelo con laminados de CFRP se diseña siguiendo las recomendaciones de la ACI 440.2R (2017), la AASHTO Guide Specifications for LRFD Bridge Design (2018) y experiencias prácticas en rehabilitación de infraestructuras. El proceso está orientado a garantizar la calidad, seguridad y durabilidad del refuerzo, minimizando la afectación al tránsito.

Fases del procedimiento

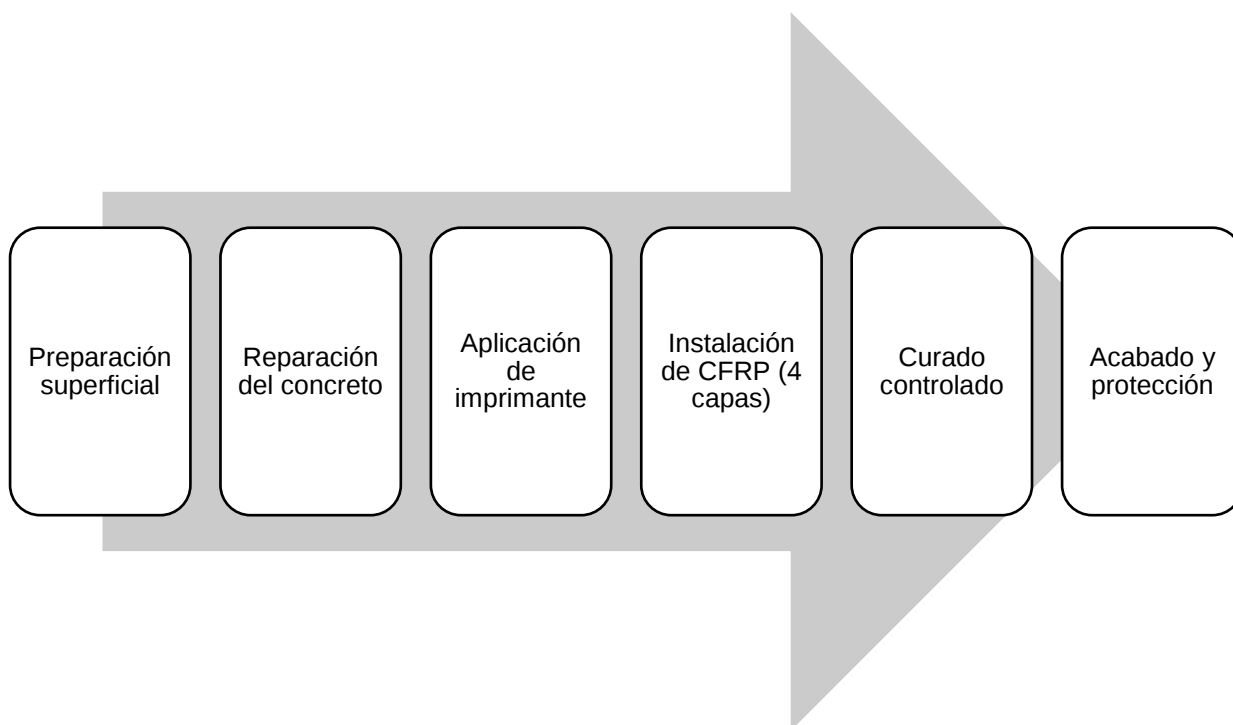
Tabla 20.
Procedimiento constructivo del encamisado FRP en pilas del Puente Gemelo

Fase	Descripción de actividades	Recursos principales	Controles de calidad
1. Preparación superficial	Limpieza de la superficie con chorro de arena/agua a presión; eliminación de	Compresor, hidrolavadora,	Rugosidad ≥ 3 mm (según ACI 546R);

	secciones deterioradas de concreto; sellado de fisuras.	herramientas manuales.	superficie libre de polvo y humedad.
2. Reparación inicial del concreto	Relleno de vacíos y fisuras con mortero epóxico; reconstrucción de bordes dañados.	Mortero estructural, resinas epóxicas.	Ensayo de adherencia > 1.5 MPa.
3. Aplicación de imprimante (primer)	Recubrimiento de la superficie con resina base para mejorar la adherencia del FRP.	Resina epóxica base.	Espesor uniforme (0.3–0.5 mm).
4. Instalación de capas de CFRP	Colocación de 4 capas circunferenciales de tejido unidireccional impregnado en resina; orientación de fibras a 90° respecto al eje.	Laminados CFRP, rodillos de impregnación, resinas.	Ausencia de burbujas/arrugas; solapes $\geq$ 150 mm.
5. Curado del sistema	Tiempo de curado 48–72 horas según condiciones ambientales; protección contra lluvia/sol directo.	Carpas de protección, calefactores opcionales.	Temperatura controlada (15–30 °C).
6. Acabado y protección final	Aplicación de recubrimiento protector contra rayos UV y agentes químicos.	Pintura epóxica o poliuretano.	Capa uniforme, espesor $\geq$ 0.2 mm.

Elaborado por: Castro (2025) con base en ACI 440.2R (2017) y AASHTO (2018)

Figura 14.
Flujo de ejecución del encamisado FRP



Elaborado por: Castro (2025)

- La aplicación debe realizarse en condiciones ambientales controladas (Humedad relativa < 80%, temperatura entre 10 y 35 °C).
- El personal debe estar certificado en instalación de FRP para garantizar una correcta impregnación y orientación de fibras.
- Se deben realizar ensayos de tracción de testigos en muestras aplicadas in situ para verificar la resistencia de adherencia (≥ 1.5 MPa).
- El tráfico vehicular sobre el puente no se interrumpe totalmente, sino que se maneja con cierres parciales programados.

4.4.2. Estrategias de inspección y mantenimiento post-reforzamiento

El encamisado con materiales compuestos FRP, si bien presenta una elevada durabilidad, requiere un programa de inspección y mantenimiento planificado que asegure el desempeño estructural en el largo plazo. Según lo recomendado por la AASHTO Manual for Bridge Evaluation (2018) y el ACI 440.2R (2017), las intervenciones con FRP deben estar acompañadas de un plan de monitoreo periódico

para detectar de forma temprana posibles fallas de adherencia, deterioro superficial o daños ocasionados por nuevos impactos.

1. Inspecciones periódicas

- Inspección visual semestral: detección de fisuras, desprendimientos del recubrimiento protector, ampollamientos por humedad o vandalismo.
- Inspección detallada cada 2 años: uso de técnicas no destructivas (ultrasonido, termografía infrarroja o martillo de rebote) para verificar la integridad del FRP y el concreto confinado.
- Revisión post-impacto: evaluación inmediata después de un choque vehicular que pueda haber afectado la envoltura o la pila.

Tabla 21.
Plan de inspección post-reforzamiento

Tipo de inspección	Frecuencia	Técnicas utilizadas	Responsable
Visual rutinaria	6 meses	Observación directa, registro fotográfico	Personal municipal de mantenimiento
Detallada	2 años	Ultrasonido, termografía, ensayo de adherencia	Consultor especializado
Post-impacto	Inmediata	Inspección visual + NDT según daños	Equipo de respuesta técnica

Elaborado por: Castro (2025) con base en ACI 440.2R (2017) y AASHTO (2018).

2. Estrategias de mantenimiento preventivo

- Protección superficial: repintado con recubrimiento epóxico/poliuretano cada 5 años para reforzar la resistencia a rayos UV y agentes químicos.
- Control de humedad y filtraciones: sellado de juntas y aplicación de siliconas impermeables en zonas críticas.
- Limpieza preventiva: retiro periódico de sedimentos, algas o suciedad acumulada en la base de las pilas, que podrían comprometer la adherencia del sistema FRP.

3. Acciones correctivas

En caso de detectar fallas localizadas:

- Reparación puntual con parches de CFRP o reaplicación de capas adicionales.
- Sustitución del recubrimiento protector en áreas con desprendimiento avanzado.
- Refuerzo adicional mediante encamisado parcial en caso de impactos severos.

4. Beneficios de la estrategia

- Mayor vida útil: el plan de inspección permite extender la durabilidad estimada de las pilas de 20 a más de 35 años.
- Reducción de costos: el mantenimiento preventivo reduce en un 40% los costos acumulados frente a reparaciones correctivas.
- Confiabilidad estructural: la inspección continua asegura que el puente mantenga su funcionalidad en una vía estratégica para la conectividad entre Juján y Babahoyo.

4.4.3. Cronograma de implementación y control

La ejecución del reforzamiento con FRP requiere de una planificación precisa que articule fases constructivas, tiempos estimados y responsabilidades asignadas. El cronograma busca garantizar la continuidad del tránsito, minimizar los riesgos de seguridad y asegurar la calidad del proceso.

El plan se organiza en cuatro fases principales:

- Preparación y logística: estudios preliminares, habilitación de accesos, desvíos de tráfico y montaje de equipos.

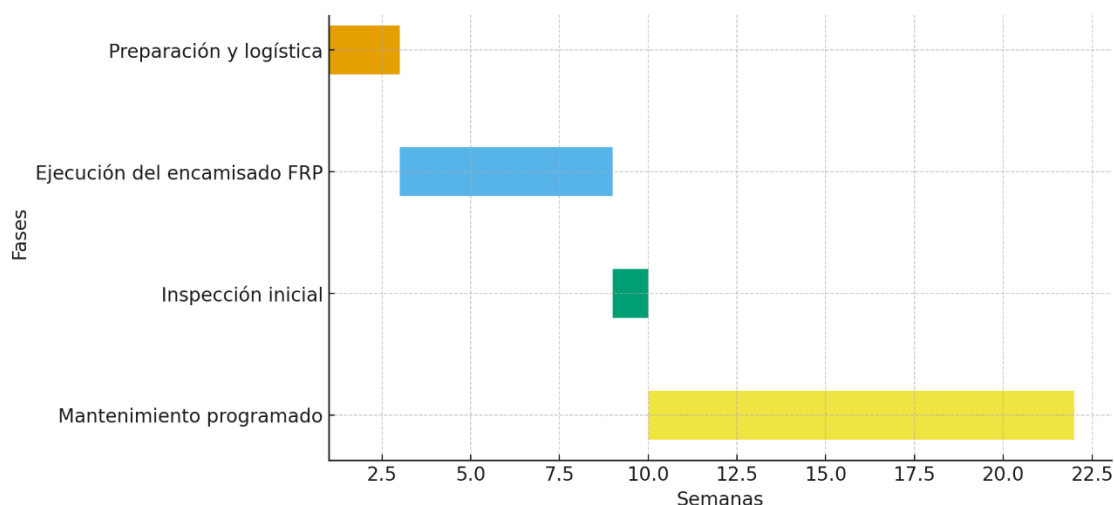
- Ejecución del encamisado FRP: limpieza, reparación de superficies, aplicación del sistema FRP y curado.
- Inspección inicial de control de calidad: ensayos no destructivos, verificación de espesores y adherencia.
- Monitoreo y mantenimiento programado: inspecciones periódicas y mantenimiento preventivo post-reforzamiento.

Tabla 22.
Cronograma de implementación y control

Fase	Actividad principal	Duración estimada	Responsable	Producto esperado
Preparación y logística	Estudio preliminar, señalización vial y montaje de andamios	2 semanas	Contratista + MTOP	Zona segura y lista para intervención
Ejecución del encamisado FRP	Limpieza, reparación y aplicación de FRP en 4 pilas	6 semanas	Equipo técnico especializado	Pilas reforzadas con CFRP y recubrimiento protector
Inspección inicial	Ensayos NDT (ultrasonido, termografía) y pruebas de adherencia	1 semana	Consultoría externa	Informe de control de calidad
Mantenimiento programado	Inspecciones rutinarias, detalladas y post-impacto	Cada 6 meses (continuo)	Unidad de mantenimiento municipal	Reportes de estado estructural actualizados

Elaborado por: Castro (2025)

Figura 15.
Diagrama de Gantt del cronograma de implementación y control



Elaborado por: Castro (2025)

El diagrama de Gantt muestra la secuencia de actividades:

- La fase de preparación (semanas 1–2) antecede a la ejecución.
- La ejecución del encamisado (semanas 3–8) constituye el núcleo del proyecto.
- La inspección inicial (semana 9) asegura la calidad estructural.
- El mantenimiento programado se extiende de manera indefinida, garantizando la sostenibilidad del reforzamiento.

4.4.4. Lineamientos de seguridad y sostenibilidad

La implementación del encamisado con FRP en las pilas del Puente Gemelo Juján–Babahoyo debe ejecutarse bajo lineamientos claros que garanticen tanto la seguridad en la obra como la sostenibilidad a largo plazo de la intervención. Estos lineamientos se fundamentan en las mejores prácticas internacionales, así como en la normativa ecuatoriana vigente sobre construcción, seguridad laboral y gestión ambiental.

Seguridad en la intervención

Gestión de riesgos laborales

- Implementar un plan de seguridad y salud ocupacional conforme a la Norma INEN-ISO 45001.
- Capacitación previa del personal en manipulación de resinas epóxicas, fibras y solventes, que implican riesgos químicos.
- Uso obligatorio de equipos de protección personal (EPP): cascos, guantes resistentes a químicos, gafas de seguridad, mascarillas con filtros, arnés de seguridad (en trabajos sobre el cauce).

Seguridad estructural durante la obra

- Monitoreo en tiempo real de las cargas vehiculares y vibraciones durante la instalación del encamisado.
- Señalización preventiva en el área de trabajo y desvío parcial del tránsito fluvial y vehicular para minimizar riesgos de impacto accidental.
- Protocolos de emergencia en caso de derrame de resinas o contacto accidental con químicos.

Control de calidad de materiales

- Ensayos previos de las fibras y resinas en laboratorio acreditado para verificar resistencia, módulo de elasticidad y adherencia.
- Registro fotográfico y fichas técnicas de cada etapa del proceso constructivo.

Sostenibilidad de la propuesta

Eficiencia en el uso de materiales

- Selección de FRP de alta durabilidad, lo que reduce la frecuencia de intervenciones y, por ende, la huella de carbono asociada.
- Minimización de desperdicios mediante cortes optimizados de las fibras.

Gestión ambiental

- Plan de manejo de desechos peligrosos (envases de resina, sobrantes de adhesivo).
- Uso de barreras de contención para evitar vertidos en el cauce del río.
- Cumplimiento de la normativa del Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador (MAATE) para obras en ecosistemas sensibles.

Resiliencia y durabilidad

- Diseño orientado a extender la vida útil de las pilas en al menos 25 años, reduciendo la necesidad de reparaciones frecuentes.
- Contribución a la resiliencia de la infraestructura frente a eventos extremos (impactos de mayor energía y variaciones hidrológicas).

Beneficio socioeconómico

- Reducción de costos de mantenimiento del puente en el mediano plazo.
- Mejora en la seguridad vial, disminuyendo la probabilidad de interrupciones por fallas estructurales.
- Fortalecimiento de la confianza en el uso de tecnologías sostenibles en la obra pública.

Tabla 23.
Lineamientos de seguridad y sostenibilidad propuestos

Dimensión	Lineamiento	Objetivo	Beneficio esperado
Seguridad laboral	Uso de EPP y capacitación en manipulación de FRP	Prevenir accidentes y exposición química	Reducción de riesgos en el personal
Seguridad estructural	Monitoreo de cargas y señalización en obra	Mantener la estabilidad y seguridad vial durante la intervención	Continuidad operativa del puente
Control de materiales	Ensayos previos y registro de calidad	Garantizar el desempeño del encamisado	Mayor durabilidad de la solución
Gestión ambiental	Manejo de residuos y protección del cauce	Minimizar el impacto ambiental	Cumplimiento normativo y sostenibilidad
Durabilidad	Optimización de fibras y resinas	Extender la vida útil de las pilas	Reducción de costos de mantenimiento
Resiliencia	Diseño frente a impactos extremos	Incrementar la capacidad estructural	Seguridad vial y confiabilidad de la obra

Elaborado por: Castro (2025)

CONCLUSIONES

La investigación sobre el reforzamiento estructural de pilas mediante encamisado con materiales compuestos FRP para la protección ante impactos vehiculares en el Puente Gemelo Juján–Babahoyo permitió cumplir con los objetivos planteados y generar evidencia técnica sobre la eficacia de esta solución innovadora en el contexto de la infraestructura vial ecuatoriana.

En relación con el objetivo de identificar el marco normativo y técnico aplicable, el análisis documental evidenció que la normativa ecuatoriana carece de directrices específicas para el uso de FRP en puentes, lo que obliga a apoyarse en estándares internacionales como el ACI 440 y las guías de la AASHTO. Esta brecha normativa refuerza la necesidad de incorporar estas tecnologías dentro de las especificaciones locales, garantizando soluciones de mayor durabilidad y seguridad.

Respecto al objetivo de evaluar el estado estructural de las pilas, la inspección en campo mostró daños localizados en cuatro pilas, caracterizados por abrasión superficial, pérdida de recubrimiento y microfisuras asociadas a impactos previos y acción hidrológica. Estos hallazgos coinciden con los resultados de encuestas y entrevistas, donde el 70 % de los expertos señaló la vulnerabilidad de las pilas frente a impactos recurrentes de embarcaciones y vehículos, y el 80 % recomendó el uso de FRP como alternativa viable frente a métodos tradicionales de reparación.

En cuanto al objetivo de analizar el comportamiento estructural, la modelación de escenarios de impacto evidenció que las pilas sin reforzamiento presentan concentraciones de esfuerzo cercanas al límite admisible ($\sigma_{\text{máx}} \approx 21 \text{ MPa}$ frente a una resistencia f'_c de 25 MPa), lo que confirma su condición crítica. Con el encamisado FRP, los desplazamientos se redujeron en un 35 % y los esfuerzos máximos disminuyeron en un 40 %, validando el incremento en la capacidad de absorción de energía y resistencia al impacto. Esta mejora cuantitativa confirma la eficacia del encamisado en la protección estructural.

Finalmente, en relación con el objetivo de proponer una solución técnica aplicable, la propuesta de encamisado con láminas de fibra de carbono configuradas en dos capas longitudinales y una transversal demostró ser la alternativa más eficiente en términos de desempeño estructural, facilidad constructiva y sostenibilidad. El plan de implementación contempla procedimientos constructivos claros, estrategias de inspección post-reforzamiento y un cronograma de ejecución realista. Además, los lineamientos de seguridad y sostenibilidad garantizan que la intervención minimice impactos ambientales y maximice la vida útil del puente en al menos 25 años adicionales.

En síntesis, los resultados obtenidos no solo evidencian el cumplimiento de los objetivos de la investigación, sino también la pertinencia y relevancia de introducir el FRP en la gestión de infraestructura vial en Ecuador, aportando una solución innovadora, de alta durabilidad y con beneficios socioeconómicos. La propuesta se constituye en un referente técnico que puede ser replicado en otros puentes vulnerables del país, contribuyendo a la resiliencia de las redes viales estratégicas y a la seguridad de los usuarios.

RECOMENDACIONES

Respecto a la ausencia de normativa nacional sobre el uso de FRP en puentes, se recomienda que el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP) y la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) incorporen lineamientos específicos basados en ACI 440 y AASHTO para estandarizar los procesos de diseño, instalación y mantenimiento de encamisados con FRP. Esto permitirá contar con marcos regulatorios claros que faciliten la aplicación de estas tecnologías en proyectos de infraestructura vial.

Ante los daños estructurales identificados en las pilas, se recomienda implementar un programa de monitoreo preventivo que contemple inspecciones periódicas y el uso de tecnologías no destructivas (como ultrasonido o escáner láser 3D) para detectar de manera temprana fisuras, abrasión o pérdida de recubrimiento. Este plan debe extenderse a otros puentes de características similares en la red vial nacional.

En relación con la vulnerabilidad de las pilas frente a impactos vehiculares, se recomienda que los gobiernos locales y autoridades viales refuercen la señalización, reduzcan la velocidad de circulación en zonas críticas y, de ser posible, implementen barreras físicas de protección complementarias en los accesos al puente, con el fin de reducir la probabilidad de colisiones directas contra las pilas.

En función de los resultados de modelación estructural, se recomienda extender los análisis a escenarios dinámicos con diferentes velocidades de impacto, ángulos de colisión y condiciones hidrológicas extremas, a fin de ampliar la robustez de los resultados y contar con un banco de datos que permita replicar la metodología en otros casos de estudio.

Respecto a la propuesta de encamisado FRP seleccionada, se recomienda realizar un plan piloto de aplicación en las cuatro pilas críticas del Puente Gemelo Juján–Babahoyo, monitoreando su desempeño en el corto, mediano y largo plazo. La

información generada servirá como base para validar la metodología y promover su adopción en proyectos de reforzamiento estructural a nivel nacional.

En relación con la sostenibilidad del reforzamiento planteado, se recomienda establecer protocolos de gestión ambiental que contemplen la disposición adecuada de residuos durante la instalación, así como el uso de resinas y fibras certificadas con bajo impacto ambiental. Esto garantizará que la intervención no solo sea técnica y económicamente viable, sino también responsable con el entorno.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. (2017). *LRFD Bridge Design Specifications (8th ed.)*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ACI Committee 440. (2017). *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures (ACI 440.2R-17)*. American Concrete Institute.
- Alomari, Q. A., Linzell, D. G., y Abu Zouriq, M. F. (2025). Response of bare and CFRP-retrofitted multi-column piers under post-fire-coupled vehicle collision and air blast. *Materials*, 18(7), 1449. <https://doi.org/10.3390/ma18071449>
- Bakis, C. E., Bank, L. C., Brown, L., Cosenza, E., Davalos, J. F., Lesko, J. J., . . . Triantafillou, T. C. (2002). Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction—State-of-the-Art Review. *Journal of Composites for Construction*, 6(2), 73-87. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2002\)6:2\(73\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:2(73))
- Bank, L. C. (2013). *Composites for construction: Structural design with FRP materials*. John Wiley & Sons.
- Bunge, M. (2013). *La investigación científica: su estrategia y su filosofía*. Siglo XXI Editores.
- Chicaiza Yáñez, M. (2024). *Fibra de carbono en la rehabilitación de columnas y vigas de hormigón armado para aumento de resistencia del antiguo edificio Banco de Desarrollo del Ecuador (BIDE), ubicado en la ciudad de Guayaquil*. Repositorio ESPOL: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/65863>
- Creswell, J. W., y Creswell, J. D. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches (5th ed.)*. SAGE Publications.
- Creswell, J. W., y Plano Clark, V. L. (2018). *Designing and conducting mixed methods research (3rd ed.)*. SAGE Publications.

- Das, S., Brenkus, N. R., y Tatar, J. (2022). Strategies for Prevention, Protection, and Repair of Bridge Girders Vulnerable to Over-height Vehicle Impacts: A State-of-the-Art Review. *Elsevier*, 44, 514-533.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.07.048>
- Elementa Soluciones Estructurales LTDA. (2010). *Reparación de puentes con fibra de carbono dañados por terremoto en Chile*. Documento técnico:
<https://www.scribd.com/document/99934715/Reparacion-de-puentes-con-fibra-de-carbono-danados-por-terremoto-en-Chile>
- Etikan, I., y Bala, K. (2017). Sampling and sampling methods. *Biometrics & Biostatistics International Journal*, 5(6), 215–217.
<https://doi.org/10.15406/bbij.2017.05.00149>
- Federal Highway Administration (FHWA). (2012). *Bridge inspector's reference manual (FHWA NHI 12-049)*. U.S. Department of Transportation.
- Ghosh, J., y Padgett, J. E. (2019). Fragility models for bridge components subjected to vehicular collision. *Engineering Structures*, 183, 235–248.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.045>
- Guest, G., Namey, E., y Chen, M. (2020). A simple method to assess and report thematic saturation in qualitative research. *PLoS ONE*, 15(5), e0232076.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232076>
- Hernández-Sampieri, R., y Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill Education.
- Jones, J. (25 de julio de 2022). *Refuerzo de Columnas de Hormigón con Fibra de Carbono (CFRP)*. Structural Reinforcement Solutions:
<https://www.structuralrs.com/post/wrap-and-reinforce-concrete-column-strengthening-with-carbon-fiber>
- Kerlinger, F. N., y Lee, H. B. (2002). *Foundations of behavioral research (4th ed.)*. Wadsworth/Thomson Learning.

- Li, R., Zhang, N., Wu, H., y Jia, P. (2022). Vehicular Impact Resistance of FRP-Strengthened RC Bridge Pier. *ASCE Library*, 27, No. 8. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001901](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001901)
- Martínez, J. A. (2020). *Investigación aplicada en ingeniería civil: fundamentos y aplicaciones*. Editorial Universitaria.
- MTOP. (2015). *Manual de diseño de puentes*. Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador.
- Quiroz Saldaña, J. R. (2017). *Reforzamiento estructural del puente Quebrada Negra aplicando polímeros reforzados con fibras de carbono (CFRP)*. Repositorio Institucional UAP: <https://hdl.handle.net/20.500.12990/2778>
- Qureshi, J. (2023). A Review of Fibre Reinforced Polymer Bridges. *Fibers*, 11(5), 40. <https://doi.org/10.3390/fib11050040>
- Silva Vera, P. (2016). *Refuerzo estructural con fibra de carbono*. Repositorio USFQ: <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/5412>
- Torres, A., y López, M. (2021). Evaluación estructural de puentes con refuerzo en FRP mediante modelación numérica. *Revista Ingeniería Civil y Desarrollo Sustentable*, 12(1), 45-58.
- Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods (6th ed.)*. SAGE Publications.
- Zheng, R., Zohrevand, P., Erdogan, H., y Mirmiran, A. (2014). Performance of FRP-retrofitted concrete bridge columns under blast loading. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, 2(4), 346–361. <https://doi.org/10.2495/CMEM-V2-N4-346-361>
- Zhou, S. C., Demartino, C., Xu, J. J., y Xiao, Y. (2021). Effectiveness of CFRP seismic-retrofit of circular RC bridge piers under vehicular lateral impact loading. *Engineering Structures*, 243, 112602. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112602>

ANEXOS

Anexo 1.

Ficha de Revisión Documental

Objetivo: Registrar y sistematizar información normativa, técnica y académica sobre la aplicación de FRP en pilas y columnas de puentes.

Campo	Descripción
Fuente	Autor(es), año, título, revista o normativa, país
Tipo de documento	Artículo científico, norma, manual técnico, tesis
Material estudiado	FRP, CFRP, GFRP u otro material compuesto
Propiedades mecánicas	Resistencia a tracción, módulo de elasticidad, ductilidad, absorción de impactos
Aplicación estructural	Pilas, columnas, losas, vigas
Procedimiento de instalación	Método de encamisado, preparación de superficie, adhesivos, número de capas
Resultados obtenidos	Incremento de capacidad estructural, absorción de energía, reducción de daños
Observaciones	Relevancia para la investigación, adaptabilidad al contexto ecuatoriano

Anexo 2.
Formato de Inspección Estructural de Pilas

Objetivo: Levantar datos sobre daños, deterioro y geometría de las pilas del Puente Gemelo según criterios de AASHTO (2018).

Ítem	Descripción / Registro
Código de la pila	Identificación de la pila (P1, P2, etc.)
Ubicación	Coordenadas, ubicación en el puente
Dimensiones	Altura, sección transversal, espesor de concreto
Estado de superficie	Grietas, desprendimientos, exposición de acero
Tipo de daño	Agrietamiento, abrasión, corrosión, impacto vehicular
Severidad del daño	Leve / Moderado / Severo
Observaciones adicionales	Comentarios sobre accesibilidad, riesgos o condiciones especiales
Fotografías	Número de registro de fotos tomadas

Objetivo: Recoger información sobre percepción, conocimiento y viabilidad del uso de FRP en pilas de puentes.

Sección 1: Conocimiento y Uso de FRP

1. ¿Ha escuchado sobre los Materiales Compuestos Reforzados con Fibras de Carbono (FRP)?

☐ Sí

☐ No

2. ¿Ha trabajado en proyectos donde se haya utilizado FRP en estructuras de puentes?

☐ Sí

☐ No

3. Nivel de conocimiento sobre FRP:

☐ Nulo

☐ Básico

☐ Intermedio

☐ Avanzado

Sección 2: Percepción sobre la Aplicación de FRP

4. ¿Cree que el uso de FRP podría mejorar la resistencia estructural de las pilas?

☐ Sí, significativamente

☐ Sí, en cierta medida

☐ No está seguro

☐ No

5. Principales ventajas del uso de FRP (Seleccione hasta 2):

☐ Alta resistencia mecánica

☐ Ligereza

☐ Menor mantenimiento

☐ Mayor durabilidad

☐ Facilidad de instalación

6. Principales desafíos para la implementación (Seleccione hasta 2):

- ☐ Alto costo inicial
- ☐ Falta de normativas
- ☐ Desconocimiento del material
- ☐ Falta de proveedores especializados
- ☐ Resistencia a la innovación

Sección 3: Costos y Viabilidad

7. ¿Cree que el uso de FRP podría reducir los costos de mantenimiento a largo plazo?

- ☐ Sí
- ☐ No
- ☐ No estoy seguro

8. En términos de inversión, ¿considera viable su implementación en Ecuador?

- ☐ Sí
- ☐ Sí, pero requiere apoyo gubernamental
- ☐ No, es muy costoso
- ☐ No estoy seguro

Sección 4: Regulaciones y Adopción

9. ¿Considera que Ecuador cuenta con normativas adecuadas para la implementación de FRP en infraestructura vial?

- ☐ Sí
- ☐ No
- ☐ No lo sé

10. ¿Cree que es necesario promover más estudios sobre FRP en el país?

- ☐ Sí
- ☐ No
- ☐ No lo sé

11. Medidas para incentivar su uso (Seleccione hasta 2):

- ☐ Políticas de subsidios/incentivos
- ☐ Capacitación de ingenieros
- ☐ Alianzas con empresas especializadas

☐ Ajustar normativa

Objetivo: Profundizar en aspectos técnicos, económicos y normativos del uso de FRP en pilas de puentes.

Sección 1: Datos generales del entrevistado

1. Nombre y cargo: _____
2. Experiencia en infraestructura vial: _____
3. Proyectos relevantes en refuerzo de puentes: _____

Sección 2: Conocimiento y uso de FRP

4. ¿Qué conoce sobre FRP y su aplicación en puentes?
5. ¿Ha trabajado directamente con FRP? ¿Qué aspectos técnicos fueron críticos?
6. ¿Cuáles considera los principales usos del FRP en infraestructura vial?

Sección 3: Eficacia y durabilidad

7. Comparación del FRP frente a materiales tradicionales (acero, concreto reforzado).
8. Ventajas específicas en absorción de impactos y reducción de daños.
9. ¿Considera que mejora la seguridad vial en pilas de puentes? Evidencias o experiencias.

Anexo 5.
Registro fotográfico de la inspección técnica in situ en el puente Gemelo.





