

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**“ÍNDICES DE CONFIABILIDAD DE LA SUPERESTRUCTURA DEL PUENTE LA
UNIÓN - OTUZCO LA VICTORIA EN EL CENTRO POBLADO DE OTUZCO
DISTRITO BAÑOS DEL INCA - CAJAMARCA”**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

AUTOR:

Bach. ANGULO SOTO SOILA SELENE

ASESOR:

Dr. Ing. MOSQUEIRA MORENO MIGUEL ANGEL

CAJAMARCA – PERÚ

2023

AGRADECIMIENTO

A Dios y a mi Virgen de los Dolores

*Por haber guiado mi camino y haberme
dado la fuerza para lograr todo lo que me proponía.*

A mi Asesor Dr. Ing. Miguel Angel Mosqueira Moreno

*Por haber contribuido en el desarrollo no solo de esta investigación,
sino de mi formación académica en la Universidad.*

A mi familia

A mis tíos Luis, Wilder, Sara, Socorro, Rosita y Genaro.

A mis primos, que son como los hermanos que no tengo.

A mis amigos y compañeros de la Universidad Nacional de Cajamarca

Gracias por todas las experiencias, por su amistad y su confianza.

Luisa, gracias por ser esa amiga sincera e incondicional.

Danmer, gracias por confiar en mí.

DEDICATORIA

A MI MADRE

*A la persona más importante en mi vida.
Haber culminado mi carrera, solo es por ti y para ti,
es un logro de las dos. Gracias por tus consejos,
regañadas, presiones y por ser mi mejor amiga.*

A MI PAPÁ LEONCIO

*Aunque ya no estés con nosotros,
sé que desde el cielo estás contento por tu "mami",
va para ti, por tu apoyo, por tu amor
y por haberme considerado siempre como tu hija.*

CONTENIDO

| | Pág. |
|--|-------------|
| AGRADECIMIENTO | ii |
| DEDICATORIA | iii |
| CONTENIDO | iv |
| ÍNDICE DE TABLAS | viii |
| ÍNDICE DE FIGURAS | xi |
| RESUMEN | xiii |
| ABSTRACT | xiv |
| CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 1 |
| 1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA | 2 |
| 1.2.1. PREGUNTA PRINCIPAL | 2 |
| 1.3. HIPÓTESIS | 3 |
| 1.3.1. HIPÓTESIS GENERAL..... | 3 |
| 1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN | 3 |
| 1.5. ALCANCES O DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN | 4 |
| 1.5.1. ALCANCES | 4 |
| 1.5.2. DELIMITACIÓN..... | 6 |
| 1.6. LIMITACIONES..... | 6 |
| 1.7. OBJETIVOS..... | 7 |
| 1.7.1. OBJETIVO GENERAL | 7 |
| 1.7.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 7 |
| 1.8. DESCRIPCIÓN DE LOS CONTENIDOS DE LOS CAPÍTULOS..... | 8 |
| CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO | 9 |
| 2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS..... | 9 |
| 2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES..... | 9 |
| 2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES..... | 11 |

| | | |
|--|---|-----------|
| 2.1.3. | ANTECEDENTES LOCALES | 12 |
| 2.2. | BASES TEÓRICAS..... | 13 |
| 2.2.1. | DEFINICIÓN DE PUENTE | 13 |
| 2.2.2. | PARTES DE UN PUENTE | 14 |
| 2.2.3. | CLASIFICACIÓN DE PUENTES..... | 14 |
| 2.2.4. | SEGURIDAD ESTRUCTURAL | 16 |
| 2.2.5. | SEGURIDAD ESTRUCTURAL DESDE EL PUNTO DETERMINÍSTICO Y PROBABILÍSTICO | 20 |
| 2.2.6. | ESTADOS LÍMITES | 22 |
| 2.2.7. | MODELO DE RESISTENCIA..... | 23 |
| 2.2.8. | MODELOS DE CARGA..... | 31 |
| 2.2.9. | MÉTODO DE CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL..... | 39 |
| 2.2.10. | MÉTODO FACTOR DE CAPACIDAD | 45 |
| 2.2.11. | NIVELES DE SEGURIDAD ESTRUCTURAL..... | 49 |
| 2.2.12. | EVALUACIÓN CUALITATIVA DE PUENTES..... | 52 |
| 2.3. | DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS..... | 59 |
| CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN | | 61 |
| 3.1. | UBICACIÓN GEOGRÁFICA..... | 61 |
| 3.2. | ÉPOCA DE LA INVESTIGACIÓN..... | 62 |
| 3.3. | TIPO DE INVESTIGACIÓN | 62 |
| 3.4. | NIVEL DE INVESTIGACIÓN | 62 |
| 3.5. | DISEÑO DE INVESTIGACIÓN..... | 63 |
| 3.6. | POBLACIÓN DE ESTUDIO | 63 |
| 3.7. | MUESTRA..... | 63 |
| 3.8. | UNIDAD DE ANÁLISIS | 63 |
| 3.9. | TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS | 63 |
| 3.10. | PROCEDIMIENTO | 65 |

| | |
|--|-----------|
| 3.10.1. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA | 65 |
| 3.10.2. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LA SUPERESTRUCTURA | 66 |
| 3.10.3. GEOMETRÍA DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LA SUPERESTRUCTURA..... | 66 |
| 3.10.4. RESISTENCIA DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LA SUPERESTRUCTURA..... | 67 |
| 3.10.5. SOLICITACIONES DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES..... | 69 |
| 3.10.6. ÍNDICE DE CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL..... | 70 |
| 3.10.7. ÍNDICE DE CAPACIDAD ESTRUCTURAL | 74 |
| 3.10.8. ÍNDICE DE CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL..... | 76 |
| 3.11. RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS | 77 |
| 3.11.1. GEOMETRÍA DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LA SUPERESTRUCTURA..... | 77 |
| 3.11.2. RESISTENCIA DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LA SUPERESTRUCTURA..... | 79 |
| 3.11.3. ESTUDIO DE TRÁFICO | 80 |
| 3.12. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS: | 84 |
| 3.12.1. RESISTENCIA DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES..... | 84 |
| 3.12.2. MODELO Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE SOLICITACIONES..... | 85 |
| 3.12.3. ÍNDICE DE CONFIABILIDAD | 87 |
| 3.12.4. ÍNDICE DE CAPACIDAD DE PUENTES..... | 91 |
| 3.12.5. ÍNDICE DE CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL..... | 93 |
| CAPITULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 98 |
| 4.1. ÍNDICE DE CONFIABILIDAD POR EL MÉTODO DE CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL | 98 |
| 4.2. ÍNDICE DE CONFIABILIDAD POR EL MÉTODO DE CAPACIDAD ESTRUCTURAL | 98 |

| | |
|--|------------|
| 4.3. EVALUACIÓN CUALITATIVA MEDIANTE LA DIRECTIVA N°01-2006-MTC/14 "GUÍA PARA INSPECCIÓN DE PUENTES" | 99 |
| 4.4. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS | 104 |
| CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 105 |
| 5.1. CONCLUSIONES | 105 |
| 5.2. RECOMENDACIONES..... | 105 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 106 |
| ANEXOS..... | 110 |
| ANEXO A. PANEL FOTOGRÁFICO..... | 110 |
| ANEXO B. ESTUDIO DE TRÁFICO | 114 |
| ANEXO C. PLANOS | 118 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|--|------|
| Tabla N°1. Parámetros estadísticos de resistencia | 25 |
| Tabla N°2. Parámetros estadísticos para resistencia a compresión del concreto elaborado en obra. | 30 |
| Tabla N°3. Parámetros estadísticos para el acero de refuerzo pasivo..... | 31 |
| Tabla N°4. Pesos unitarios de materiales | 33 |
| Tabla N°5. Parámetros estadísticos para carga muerta | 34 |
| Tabla N°6. Parámetros estadísticos para carga móvil y de impacto | 35 |
| Tabla N°7. Parámetros estadísticos para carga viva móvil y de impacto para diversas cargas móviles | 35 |
| Tabla N°8. Índices de Confiabilidad y Probabilidad de falla | 42 |
| Tabla N°9. Carga de impacto de carga móvil | 47 |
| Tabla N°10. Factores de condición | 48 |
| Tabla N°11. Factores de sistema | 48 |
| Tabla N°12. Factores de carga y clasificación para evaluación de cargas de diseño..... | 49 |
| Tabla N°13. Niveles de seguridad para diferentes países..... | 50 |
| Tabla N°14. Nivel de desempeño en función a su índice de confiabilidad (β) y probabilidad de falla (P_f) | 51 |
| Tabla N°15. Nivel de seguridad según su índice de capacidad | 51 |
| Tabla N°16. Clasificación según el índice de capacidad (RF)..... | 52 |
| Tabla N°17. Cuadro de condición global del puente..... | 55 |
| Tabla N°18. Mecanismos de Daño..... | 57 |
| Tabla N°19. Coordenadas UTM del puente La Unión – Otuzco La Victoria..... | 61 |
| Tabla N°20. Parámetros estadísticos para cargas estáticas | 70 |
| Tabla N°21. Parámetros estadísticos seleccionados para cargas móviles | 71 |
| Tabla N°22. Parámetros estadísticos de Resistencia Nominal | 73 |

| | |
|--|----|
| Tabla N°23. Parámetros estadísticos de las propiedades mecánicas..... | 73 |
| Tabla N°24. Datos generales del puente La Unión – Otuzco La Victoria..... | 78 |
| Tabla N°25. Resistencia de diseño de los elementos de la superestructura del puente La Unión – Otuzco La Victoria | 79 |
| Tabla N°26. Resistencia de los elementos estructurales obtenidos mediante el ensayo de Esclerometría ASTM C805..... | 80 |
| Tabla N°27. Clasificación y cantidad de vehículos promedio que transitan por el puente La Unión – Otuzco La Victoria. | 81 |
| Tabla N°28. Clasificación y cantidad de vehículos que transitan por el puente La Unión – Otuzco La Victoria. | 82 |
| Tabla N°29. Tabla de pesos y medidas de los vehículos que transitan por el puente La Unión - Otuzco La Victoria | 83 |
| Tabla N°30. Momentos (Mn) y Cortes (Vn) Nominales resistentes..... | 84 |
| Tabla N°31. Valores obtenidos del análisis estructural..... | 86 |
| Tabla N°32. Valores nominales para la Resistencia – Expediente técnico | 87 |
| Tabla N°33. Parámetros estadísticos para la resistencia – desempeño actual | 88 |
| Tabla N°34. Variables de sollicitación (S) – Viga Exterior..... | 88 |
| Tabla N°35. Variables de sollicitación (S) – Losa..... | 89 |
| Tabla N°36. Valores estadísticos de Sollicitación (S)..... | 90 |
| Tabla N°37. Valores estadísticos de Resistencia (R). | 90 |
| Tabla N°38. Valores estadísticos de índices de seguridad (M). | 91 |
| Tabla N°39. Cálculo del índice de capacidad del puente Otuzco (Viga). | 92 |
| Tabla N°40. Cálculo del índice de capacidad del puente Otuzco (losa)..... | 93 |
| Tabla N°41. Índices de seguridad por el método de confiabilidad..... | 94 |
| Tabla N°42. Escala de seguridad en referencia al índice β | 95 |
| Tabla N°43. Índices de Confiabilidad (β) – Evaluación Momento | 95 |
| Tabla N°44. Índices de Confiabilidad (β) – Evaluación Fuerza Cortante..... | 96 |
| Tabla N°45. Índices de seguridad por el método de capacidad estructural. | 96 |

| | |
|---|-----|
| Tabla N°46. Escalas de seguridad en referencia A RF. | 97 |
| Tabla N°47. Índices de Capacidad "RF" - Evaluación Momentos | 97 |
| Tabla N°48. Índices de Capacidad "RF" - Evaluación Cortantes..... | 97 |
| Tabla N°49. Cuadro de condición global del puente - MTC..... | 103 |
| Tabla N°50. Registro de Vehículos – Día 1: 11/06/2022 | 114 |
| Tabla N°51. Registro de Vehículos – Día 2: 12/06/2022 | 115 |
| Tabla N°52. Registro de Vehículos – Día 3: 13/06/2022 | 115 |
| Tabla N°53. Registro de Vehículos – Día 4: 14/06/2022 | 116 |
| Tabla N°54. Registro de Vehículos – Día 5: 15/06/2022 | 116 |
| Tabla N°55. Registro de Vehículos – Día 6: 16/06/2022 | 117 |
| Tabla N°56. Registro de Vehículos – Día 7: 17/06/2022 | 117 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura N°1. Elevación – Puente tipo Viga Losa | 16 |
| Figura N°2. Sección transversal – Puente tipo Viga Losa. | 16 |
| Figura N°3. Exigencias para una Seguridad Estructural..... | 17 |
| Figura N°4. Curva de frecuencia para Cargas y Solicitaciones (S) | 18 |
| Figura N°5. Curva de frecuencia para resistencia (R) | 19 |
| Figura N°6. Curva de frecuencia del Margen Estructural (M) | 20 |
| Figura N°7. Comparación de los métodos determinístico y probabilístico. | 21 |
| Figura N°8. Representación gráfica del estado límite de servicio (Agrietamiento)... | 23 |
| Figura N°9. Representación gráfica de la Viga | 26 |
| Figura N°10. Factor Bias (λ) para cargas vehiculares | 36 |
| Figura N°11. Coeficiente de variación (CV) para cargas vehiculares. | 36 |
| Figura N°12. Combinación de seguridad y fallas..... | 38 |
| Cuando R y S son independientes, $f_{RSr,s} = f_R(r)f_S(s)$, se convierte en:..... | 40 |
| Figura N°13. Espacio de las funciones $f_R()$ y $f_S()$ para el nivel de confiabilidad | 41 |
| Figura N°14. Distribución del Margen de seguridad $M = R-S$ | 43 |
| Figura N°15. Camión de diseño HL-93..... | 46 |
| Figura N°16. Vista satelital del puente La Unión – Otuzco La Victoria. | 61 |
| Figura N°17. Vista del puente La Unión – Otuzco La Victoria..... | 65 |
| Figura N°18. Elevación lateral de un tramo del puente La Unión – Otuzco La Victoria..... | 66 |
| Figura N°19. Sección transversal del puente La Unión – Otuzco La Victoria. | 77 |
| Figura N°20. Vista transversal viga principal | 84 |
| Figura N°21. Vista transversal losa - vereda | 85 |
| Figura N°22. Modelamiento de elementos finitos de la superestructura del puente La Unión – Otuzco La Victoria (losa). | 85 |

| | |
|---|-----|
| Figura N°23. Modelamiento de elementos finitos de la superestructura del puente La Unión – Otuzco La Victoria (vigas exteriores)..... | 86 |
| Figura N°24. Efectos de cargas actuantes en la superestructura del puente. | 87 |
| Figura N°25. Sistema de seguridad del puente – sistema mixto..... | 94 |
| Figura N°26. Losa del puente sin mantenimiento..... | 100 |
| Figura N°27. Descascaramiento del concreto, grietas, falta mantenimiento de drenaje..... | 100 |
| Figura N°28. Presencia de hongos y descascaramiento del concreto en las vigas principales del puente. | 101 |
| Figura N°29. Presencia de grietas en las vigas principales del puente..... | 101 |
| Figura N°30. Presencia de filtraciones, hongos, y acumulación de basura en los estribos y aletas del puente. | 102 |

RESUMEN

En la presente investigación se determinó el índice de confiabilidad de la superestructura del Puente La Unión Otuzco – La Victoria, situado en el distrito de Los Baños del Inca, provincia de Cajamarca, departamento de Cajamarca mediante las metodologías de confiabilidad estructural y capacidad estructural. Esta investigación estuvo limitada a la evaluación de su superestructura, al ser este un puente de tipo viga-losa, se evaluó tan solo su losa y sus vigas principales, considerándose para esto dos escenarios. El primer escenario se desarrolló teniendo en cuenta las consideraciones técnicas del expediente, como las propiedades de la viga y losa (secciones y dimensiones, propiedades del concreto y acero), cargas y vehículo de diseño. Mientras que, para el segundo escenario, el cual evaluará el desempeño actual de la superestructura, se determinó la resistencia del concreto mediante el ensayo de esclerometría ASTM C805, además de realizarse el estudio de tráfico para identificar sus actuales cargas vehiculares, tomándose en cuenta solo el expediente técnico para las propiedades del acero. Además, se realizó la modelación de la superestructura en el Software CSI Bridge, el cual nos calculó los Momentos Flectores y Fuerzas Cortantes para posteriormente desarrollar la parte estadística con la Simulación de Monte Carlo. Finalmente, se determinó el índice de confiabilidad, según la metodología de la confiabilidad estructural arrojándonos un valor de $\beta=2.69$ lo que determina un índice de seguridad promedio, y mediante el método de capacidad estructural un valor de $RF=0.71$, el cual indica un nivel de seguridad regular.

Palabras claves: Solicitud, Resistencia, Seguridad estructural, Índices de confiabilidad, Evaluación de puentes.

ABSTRACT

In the present investigation, the reliability index of the superstructure of the La Unión Otuzco - La Victoria Bridge, located in the district of Los Baños del Inca, province of Cajamarca, department of Cajamarca, will be extended through the methodologies of structural reliability and structural capacity. This investigation was limited to the evaluation of its superstructure, since this is a beam-slab type bridge, only its slab and its main beams were evaluated, considering these two scenarios. The first scenario will be developed taking into account the technical considerations of the file, such as the properties of the beam and slab (sections and dimensions, concrete and steel properties), loads, and design vehicle. While, for the second scenario, which will evaluate the current performance of the superstructure, the resistance of the concrete will be prolonged through the ASTM C805 sclerometry test, in addition to carrying out the traffic study to identify its current vehicular loads, taking into account only the technical file for the properties of steel. In addition, the modeling of the superstructure was carried out in the CSI Bridge Software, which calculated the Bending Moments and Shear Forces to later develop the statistical part with the Monte Carlo Simulation. Finally, the reliability index will be extended, according to the structural reliability methodology, yielding a value of $\beta=2.69$, which determines an average security index, and through the structural capacity method, a value of $RF=071$, which indicates a regular security level.

Keywords: Request, Resistance, Structural safety, Reliability indices, Bridge evaluation.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el Perú, para el MTC, los puentes son considerados como el componente más vulnerable de una carretera y como un elemento principal, el cual influye en la continuidad y seguridad del servicio de transporte, favoreciendo en general un apropiado funcionamiento del Sistema Nacional de Carreteras del país.

Según la evaluación presentada por el MTC (2012), referente al estado situacional de los puentes en el Perú, se tiene que tan sólo el 10 % de los puentes ubicados en las carreteras no concesionadas (1700 aproximadamente), se encuentran en buen estado, el resto son estructuras artesanales o en regular estado pidiendo ser rehabilitadas o reconstruidas.

En nuestra región, encontramos puentes con una larga vida útil al servicio de los cajamarquinos, así como estructuras recientes que se han mejorado o en algunos casos construidas nuevamente para cumplir la demanda del tráfico vehicular y así satisfacer las necesidades de su población.

El Puente La Unión – Otuzco La Victoria, uno de los más importantes en Cajamarca; no solo por su antigüedad, sino por su historia y pertenecer a uno de los centros turísticos más importantes de la región. Tal y como se muestra en el expediente técnico "CONSTRUCCION DEL PUENTE CARROZABLE SOBRE EL RIO CHONTA, CASERIO LA VICTORIA DE OTUZCO, CENTRO POBLADO DE OTUZCO, DISTRITO DE LOS BAÑOS DEL INCA, CAJAMARCA – CAJAMARCA", agenciado por la Municipalidad Distrital de Los Baños del Inca, da como referencia que en el año 2000 se construyó el Puente Peatonal sobre el río Chonta, ubicado en el centro poblado de Otuzco caserío La Victoria de Otuzco, siendo solo para uso peatonal. Ya para el año 2012 se propone el diseño de un puente carrozable tipo viga

losa; basándose en las consideraciones propuestas por el método de la ASSHTO LRFD y la normativa del MTC.

Estando ya al servicio de la población desde el año 2014, resulta necesario realizar una evaluación, ya que se observó una inconsistencia con el vehículo de diseño tipo HL-93 y los vehículos que actualmente transitan por este puente, además de haberse considerado una resistencia uniforme del concreto de 210 kg/cm^2 para los elementos estructurales del puente, y según el Manual de Puentes del MTC (2018) en la Tabla 2.5.4.1-C1 para la clase de concreto tipo A (utilizado en todos los elementos estructurales) la resistencia a compresión requerida es de 4.0 ksi (280 kg/cm^2). Es por esto que se realizó una evaluación cualitativa de la superestructura del puente, basándose en la normativa peruana del MTC, como lo es la Directiva N°01-2006-MTC/14 "Guía para inspección de puentes", además de determinar los índices de confiabilidad según la normativa americana ASSHTO LRFD y la AASHTO MBE: The Manual for Bridge Evaluation las cuáles ayudaron a determinar las sollicitaciones (S) y la resistencia (R) para poder hallar la confiabilidad estructural de los elementos mediante el método probabilístico y determinante, y así concluir con su seguridad estructural.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. PREGUNTA PRINCIPAL

" ¿Cuál es el índice de confiabilidad de la superestructura del Puente La Unión – Otuzco La Victoria ubicado en el Centro Poblado de Otuzco - Distrito Baños del Inca - Cajamarca? "

1.3. HIPÓTESIS

1.3.1. HIPÓTESIS GENERAL

La superestructura del Puente La Unión – Otuzco La Victoria ubicado en el Centro Poblado de Otuzco, distrito Baños del Inca - Cajamarca tiene un alto índice de confiabilidad.

1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El Puente sobre el río Chonta, es una estructura de mucha trascendencia para el Centro Poblado de Otuzco, pues conecta al Caserío La Victoria con los centros poblados de Combayo y Shaullo. Así mismo, contribuye con el crecimiento turístico de la zona, pues como se conoce, este puente en un inicio era un Puente de uso Peatonal Colgante, por cierto, un gran atractivo turístico que solo fue reubicado para que siga siendo lugar de distracción de muchas familias. El Puente La Unión – Otuzco La Victoria, también genera nuevas vías de acceso para las famosas Ventanillas de Otuzco, como es el recorrido desde Puyllucana- Baños del Inca hasta el Centro Poblado de Otuzco, donde en el camino se puede observar paisajes rurales propios de Cajamarca.

Desde la construcción de este puente, no se ha reportado ninguna inspección, mantenimiento o mejoramiento de la estructura según los archivos registrados en la Municipalidad Distrital de Los Baños del Inca. Es entonces que, estando al servicio de la población desde el año 2014 y con variaciones de carga, variaciones de su IMD, y sumado a esto las inclemencias del clima propias de la ciudad de Cajamarca; es determinante realizar una evaluación cualitativa según la Directiva N°01-2006-MTC/14 "Guía para inspección de puentes". Sumado a esto se utilizó la Normativa Internacional de la AASHTO, para determinar el índice de confiabilidad de los elementos de la superestructura.

El presente trabajo de investigación contó con el permiso de la Municipalidad Distrital de los Baños del Inca para realizar los diferentes estudios, además de que facilitó su expediente técnico y demás información propia de la estructura. Como aporte de este estudio, se estará alcanzando a la entidad los resultados para que las áreas encargadas de reparación y/o mantenimiento de estas estructuras puedan tomar cartas en el asunto y desarrollar algún plan para contrarrestar los daños que presente la estructura.

1.5. ALCANCES O DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. ALCANCES

- La presente investigación toma en cuenta la información técnica proporcionada por el Expediente “CONSTRUCCIÓN DEL PUENTE CARROZABLE SOBRE EL RIO CHONTA, CASERIO LA VICTORIA DE OTUZCO, CENTRO POBLADO DE OTUZCO, DISTRITO DE LOS BAÑOS DEL INCA, CAJAMARCA – CAJAMARCA”, información que fue agenciada mediante La Municipalidad Distrital de Los Baños del Inca.
- La determinación del índice de confiabilidad de la superestructura del Puente La Unión – Otuzco La Victoria, se realizó mediante las dos metodologías propuestas por la Norma Americana AASHTO, una de ellas es el método de confiabilidad estructural (Índice β) y la otra por el método de capacidad estructural (Factor Rating FR).
- Se tomó como referencia el Manual de Puentes del MTC (2018), así como la AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, para la determinación de cargas o solicitaciones (S). Para determinar el índice de confiabilidad por las diferentes metodologías se utilizó *The Manual Bridge Evaluation* de la AASHTO, 2013; además de estudios y códigos presentados por Nowak, entre otros.

- Se consideró dos escenarios para la evaluación y determinación del índice de confiabilidad. El primer escenario en función a las consideraciones técnicas de su expediente, como las características de la losa y vigas principales (secciones, dimensiones), las propiedades físicas del concreto y acero, además de considerarse el vehículo de diseño HL-93; mientras que, para el segundo escenario, asignado para la evaluación de su desempeño actual, se consideró la resistencia del concreto obtenida mediante el ensayo de esclerometría ASTM C805; y, para las propiedades del acero se consideró las del expediente técnico, con respecto a las cargas vehiculares, para este escenario se realizó un estudio de tráfico vehicular el cual determinó los vehículos que más transitan por el puente.
- Se realizó el ensayo de esclerometría para los elementos de la superestructura, se tomaron 03 lecturas en una viga principal de cada tramo, ya que estas presentan las mismas características tanto en su diseño como en su sección. Además de tomarse 01 lectura en cada tramo de la losa. Finalmente, se sacó un promedio por elemento estructural para obtener el valor de resistencia del concreto.
- Se realizó el estudio de tráfico vehicular por una semana en los días del 11 de junio al 13 de junio del 2022, obteniendo el IMD y los vehículos que más transitan para este periodo de investigación.
- Se realizó el modelamiento de la superestructura del Puente La Unión – Otuzco La Victoria en el Software computacional CSI Bridge V.23.3.1, el cual contribuyó con el cálculo de los valores de Momentos flectores y fuerzas cortantes.

- Se realizó una evaluación cualitativa del Puente La Unión – Otuzco La Victoria, guiándose de la Directiva N°01-2006-MTC/14 "Guía para inspección de puentes" del MTC, logrando clasificarlo según el cuadro de condición global del puente presentado en la página 26 de esta guía del MTC.

1.5.2. DELIMITACIÓN

Este trabajo de investigación está limitado a la evaluación y estudio de los elementos estructurales que componen la superestructura del Puente La Unión – Otuzco La Victoria, ubicado en el Centro Poblado de Otuzco - Distrito Baños del Inca - Cajamarca, siendo un puente de tipo viga-losa, se evaluará la losa y vigas principales.

1.6. LIMITACIONES

- Se determinó el índice de confiabilidad específicamente de los elementos estructurales que conforman la superestructura del Puente La Unión - Otuzco La Victoria, al ser este un puente tipo viga losa, se evaluará la losa y vigas principales.
- Con respecto a las referencias, bases teóricas o Normativas que fueron usadas para esta investigación, esta fue una de las limitaciones más relevantes, ya que en el Perú no contamos con estudios o normativas sobre la seguridad estructural de puentes, es razón por la que se tomó como base la Normativa Americana de la AASHTO para la determinación del índice de confiabilidad para ambas metodologías.
- De las referencias bibliográficas peruanas, se consideró la Directiva N°01-2006-MTC/14 "Guía para inspección de puentes" del 2006, la misma que brinda pautas para realizar una inspección y determinar si es necesario considerar un mantenimiento y/o rehabilitación de la estructura. Esta Guía se tomó como

referencia para la realización del estudio cualitativo de la estructura del puente y determinar así su condición actual, esta clasificación se realizó mediante el cuadro de condición global del puente presentado en la página 26 de la guía mencionada anteriormente.

1.7. OBJETIVOS

1.7.1. OBJETIVO GENERAL

- Determinar el índice de confiabilidad de la superestructura del Puente La Unión – Otuzco La Victoria, ubicado en el Centro Poblado de Otuzco - Distrito Baños del Inca - Cajamarca.

1.7.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el índice de confiabilidad de la superestructura del Puente La Unión – Otuzco La Victoria mediante el Método probabilístico de la Confiabilidad estructural.
- Determinar el índice de confiabilidad de la superestructura del Puente La Unión – Otuzco La Victoria mediante el Método determinístico de la Capacidad estructural.
- Identificar la condición en la que se encuentra el Puente La Unión – Otuzco La Victoria mediante LA DIRECTIVA N°01-2006-MTC/14 "GUÍA PARA INSPECCIÓN DE PUENTES"

1.8. DESCRIPCIÓN DE LOS CONTENIDOS DE LOS CAPÍTULOS

- **CAPITULO I: INTRODUCCIÓN.** Se describe el contexto, planteamiento y formulación del problema, así como de la hipótesis. Justificación de la investigación. Alcances, delimitaciones y limitaciones de la Investigación y los objetivos planteados para el estudio.
- **CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.** Hace mención a los antecedentes teóricos tanto internaciones, nacionales y locales. Bases teóricas. Definición de términos básicos que se ha utilizado como base para el desarrollo de esta investigación.
- **CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS.** Hace mención a las herramientas, instrumentos y/o materiales que han sido necesarios para desarrollar las diferentes actividades programadas. Metodología utilizada para evaluar la estructura, su desarrollo y su formación sintética.
- **CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.** Hace referencia al procesamiento e interpretación de los resultados e información obtenida durante la investigación.
- **CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.** Como capítulo final expone las conclusiones y recomendaciones que se ha podido llegar después de todo un proceso de investigación.
- **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**
- **ANEXOS**

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS

2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

- Para **Vanegas S. y Chio G. (2014)**, en el desarrollo de su estudio: *"ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE CONFIABILIDAD B DE LAS VIGAS DE UN PUENTE USANDO CONTEOS DE TRÁFICOS REAL (TPDS) MEDIANTE SIMULACIÓN"*, realizada en Bucaramanga, Colombia; llegan a calcular los índices de confiabilidad para las vigas de un puente usando la función de estado límite, la estructura del puente está formada por un tablero de viga y losa de 30 m de longitud; donde la viga interior presenta un índice de confiabilidad $\beta=3.5$, estando dentro de los márgenes internacionales; mientras que, la viga exterior tiene un índice de confiabilidad $\beta=2.89$, siendo una viga con baja seguridad. Esta estructura se evalúa mediante los momentos resistentes considerando las propiedades de los materiales, como es la resistencia (R) y las cargas o solicitaciones (S) las cuáles están sometidas a distribución normal, además de realizar la simulación de Monte Carlo para estimar los momentos solicitantes en donde el tráfico de los distintos tipos de carros se distribuyó aleatoriamente en el puente.
- **Picado F. y Ortiz G. (2017)**, en su proyecto de investigación titulado: *"DESARROLLO DE UN MODELO DE CONFIABILIDAD PARA EL ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE PUENTES. UN CASO DE ESTUDIO EN COSTA RICA"*, desarrollaron un modelo de confiabilidad para el análisis del desempeño del puente ubicado sobre el río Purires, en Costa Rica. Y así poder evaluar su rendimiento estructural y determinar parámetros los cuáles nos indiquen cuándo es necesario su mantenimiento, rehabilitación o reemplazo

antes de su colapso o inhabilitación. Para esto fue necesario la realización y evaluación mediante tres pruebas estáticas de carga en las que se utilizó pruebas estadísticas de bondad de ajuste; además de, simulaciones de Monte Carlo para obtener el índice de confiabilidad basado en la probabilidad de supervivencia y la probabilidad de falla para cada condición de su carga estática empleada, obteniendo un valor de $\beta=1.6677$ (índice de confiabilidad bajo) el cuál no cumple con los requerimientos de ningún código internacional para el análisis estructural de puentes, y con respecto a la probabilidad de falla se obtuvo un valor de $P_f = 0.047$, el cuál si se interviene a tiempo puede evitar fallas.

- **Cabrera C. y Beltrán N. (2019)**, en su tesis de pregrado *"ESTUDIO DE PATOLOGÍAS ESTRUCTURALES DE LOS PUENTES VEHICULARES EN LA CALLE 13 AVENIDA AMÉRICAS CON CARRERA 50 – LOCALIDAD DE PUENTE ARANDA EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ"*; desarrolla una inspección visual en los 04 tramos planteados de La intersección de Puente Aranda que es uno de los conectores viales más importantes de Bogotá, considerando que tiene 37 años de uso, teniendo como principal objetivo determinar un diagnóstico y tratamiento de las patologías existentes en los puentes, clasificándolas por el tipo de daño, por su lesión y nivel de gravedad. Llegando a la conclusión; que, en los 04 tramos contemplan alteraciones generadas por agentes externos y afectaciones contraídas en el proceso de construcción, además de otros agentes que vulneran la estructura disminuyendo su vida útil. Recomendando realizar un estudio de vulnerabilidad en las partes críticas y un mantenimiento adecuado.

2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES

- **Aylas M. R., (2019)**, en su tesis titulada *"EVALUACIÓN DEL PUENTE LUCAS CHACANA MEDIANTE MÉTODOS CONVENCIONALES – REGIÓN JUNÍN EN 2019"*, realizada en Lima; la cual está enfocada en la evaluación del puente Lucas Chacana, debido al crecimiento en los últimos años de la actividad minera y ganadera en la zona, y ante un posible incremento del IMD y de sobrecarga es que se realiza una investigación a nivel explicativo de diseño no experimental. En una primera instancia realiza la evaluación según el método LRFR, obteniendo el factor resistente $RF=2.22$, lo cual indica que esta estructura no requiere reforzamiento, rehabilitación y/o mantenimiento. Y, mediante las fichas de inspección del SCAP "Sistema Computarizado de Administración de Puentes" del MTC, se obtiene que el puente se encuentra en estado regular.
- **Umpire J., (2015)** en su tesis titulada *"EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL PUENTE NOCHOZ EN EL TRAMO II - VILLA RICA - PUERTO BERMUDEZ, OXAPAMPA"* realizada en la Universidad Nacional de Ingenierías, Lima; esta se enfoca en la evaluación estructural del puente Nochoz, ubicado en el departamento de Cerro de Pasco, el cuál fue diseñado en los años 80 según norma Francesa con una sobrecarga vehicular C-30, para la cual en la actualidad se realizaría su evaluación basado en la metodología AASHTO – LRFD y teniendo como guía "Manual for Bridge Evaluation" utilizando una sobrecarga vehicular actual HL-93 propia de esta normativa americana.

2.1.3. ANTECEDENTES LOCALES

- A nivel local tenemos el trabajo de investigación de **Silva J. (2018)**, en su tesis titulada *“ÍNDICES DE SEGURIDAD ESTRUCTURAL EN PUENTES DE LA CARRETERA LONGITUDINAL DE LA SIERRA PROVINCIA DE CHOTA”*; en donde para evaluar la funcionalidad y la operación de estos puentes emplea la “Guía para inspección de puentes” (2006) del MTC, la cual es complementada con la metodología propuesta por la Normativa Americana AASHTO 2013. Empleándose la metodología de confiabilidad estructural, los puentes Potrero, Chotano, Retama y Cullacmayo, presentan un gran nivel de seguridad estructural, en cambio los puentes Trancamayo, El Tayal y Santa Isolina, tiene un grado de seguridad bueno. Y para la metodología de capacidad estructural, la mayoría de puentes tienen alto grado de seguridad; en cambio, para el puente Potrero su grado de seguridad es regular.
- **Becerra L. (2021)**, en su tesis de pregrado *“ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE CONFIABILIDAD (B) DE LAS VIGAS DE LOS PUENTES VENECIA, LOS SHILCOS Y SHUDAL-CAJAMARCA, USANDO CONTEOS DE TRÁFICO REAL MEDIANTE SIMULACIÓN”*, realizó el estudio de la superestructura de los puentes Venecia, Los Shilcos y Shudal de Cajamarca, donde busca determinar el nivel de confiabilidad β , mediante el estudio de tráfico y Simulación de Monte Carlo, aplicando la metodología de la confiabilidad estructural. Determinando que los índices de confiabilidad son mayores a los sugeridos en el diseño $\beta=3.5$ y sobrepasan el $\beta=2.5$ indicado por la normativa AASHTO; mientras que la clasificación según Army Corps of Engineers se obtiene que el puente Venecia tiene un nivel de confiabilidad Alto, los puentes

Shudal y Los Shilcos presentan un nivel de confiabilidad entre bueno y arriba del promedio.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. DEFINICIÓN DE PUENTE

La AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, AASHTO (2020, p 1-2) define a puente como cualquier estructura que tiene una abertura no menor a 20.0 ft que forme parte de una carretera principal o que se encuentre sobre o debajo de una carretera.

Según el MTC, Ministerio de Transportes y Comunicaciones (Manual de puentes, 2018), un puente es una estructura para atravesar un accidente o un obstáculo natural o artificial, cuya luz libre es mayor o igual a 6.00 m (20 ft) y forma parte o constituyen un tramo de una carretera o está localizado sobre o por debajo de ella.

Para Rodríguez A. (2022), un puente es una obra que se construye para salvar un obstáculo dando así continuidad a una vía. Suele sustentar un camino, una carretera o una vía férrea, pero también puede transportar tuberías y líneas de distribución de energía. Los puentes que soportan un canal o conductos de agua se llaman acueductos. Aquellos construidos sobre terreno seco o en un valle, viaductos. Los que cruzan autopistas y vas de tren se llaman pasos elevados.

Finalmente, tomando como base las anteriores definiciones presentadas; podemos definir a puente como una estructura con una luz libre no menor a 6.00 m (20.00 ft), el cual permite la continuidad de una carretera, vía o camino al presentarse algún accidente geográfico ya sea natural o artificial; logrando así una mejor comunicación y transportación entre pueblos.

2.2.2. PARTES DE UN PUENTE

Para Rodríguez A. (2022), un puente consta fundamentalmente de dos partes:

- a) **LA SUPERESTRUCTURA:** tablero que soporta directamente las cargas; vigas, armaduras, cables, bóvedas, arcos, quienes transmiten las cargas del tablero a los apoyos.
- b) **LA SUBESTRUCTURA:** pilares (apoyos centrales); estribos (apoyos extremos) que soportan directamente la superestructura; y cimientos, encargados de transmitir al terreno los esfuerzos.

2.2.3. CLASIFICACIÓN DE PUENTES

Según el Manual de Puentes del MTC, aprobado por R.D. N°19-2018-MTC/14, los puentes se clasifican de diferentes maneras, tal y como se aprecia a continuación:

a) Según la Naturaleza de la Vía soportada:

Se distinguen puentes para carretera, para ferrocarril, para trenes eléctricos de pasajeros, para acueductos, puentes para peatones y los puentes para aviones que existen en los aeropuertos; también existen puentes de uso múltiple.

b) Según el material:

Existen puentes de piedra, madera, sogas, hierro, acero, concreto armado, concreto preesforzado, y últimamente de materiales compuestos (fibras de vidrio, fibras de carbón, etc.). La clasificación se hace considerando el material constitutivo de los elementos portantes principales.

c) Según el Sistema Estructural Principal:

- **Los Puentes Tipo Viga:** pueden ser de tramos simplemente apoyados, tramos isostáticos tipo gerber o cantiléver, tramos hiperestáticos o continuos. En los puentes tipo viga, el elemento portante principal está sometido fundamentalmente a esfuerzos de flexión y cortante. El puente losa se clasifican dentro de los puentes tipo viga, a

pesar que el comportamiento de una losa es diferente al de una viga o conjunto de vigas.

- **Los Puentes en Arco:** pueden ser de muy diversas formas, de tablero superior, de tablero intermedio y de tablero inferior, de tímpano ligero o de tímpano relleno o tipo bóveda. Los puentes pórtico pueden ser considerados un caso particular de los puentes tipo arco, existen con columnas verticales y con columnas inclinadas.

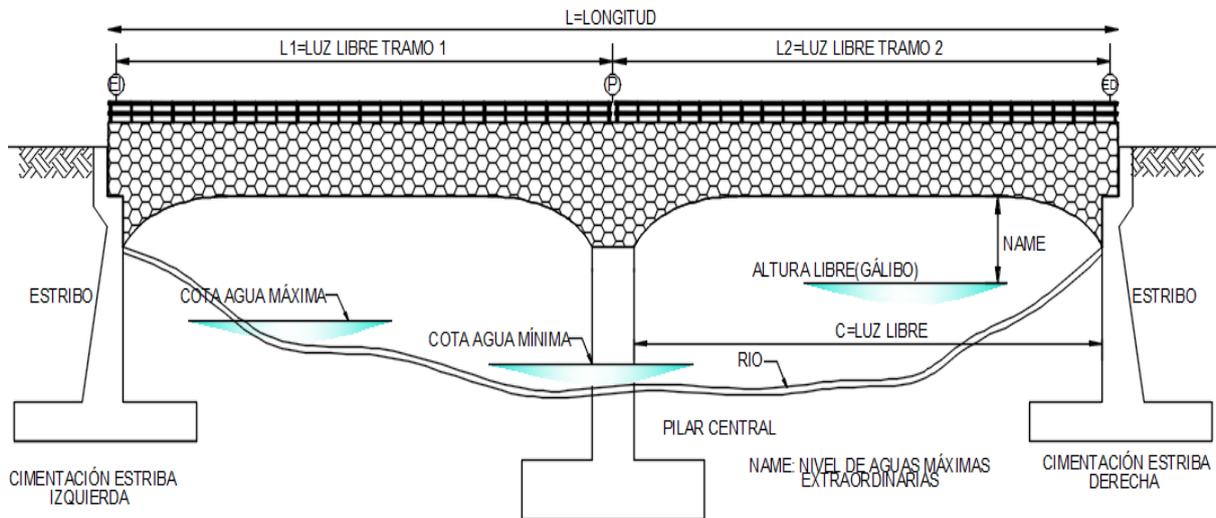
- **Los Puentes Suspendidos:** pueden ser colgantes, atirantados o una combinación de ambos sistemas.

Otros criterios de clasificación para puentes:

- d) Según la forma de la geometría en planta**
- e) Según su posición respecto a la vía considerada**
- f) Según el Tiempo de Vida Previsto**
- g) Según la demanda de tránsito y clase de la carretera**
- h) Clasificación de Acuerdo a la Importancia Operativa**
- i) Clasificación para Fines del Diseño Sísmico**
- j) Según el sistema de construcción**

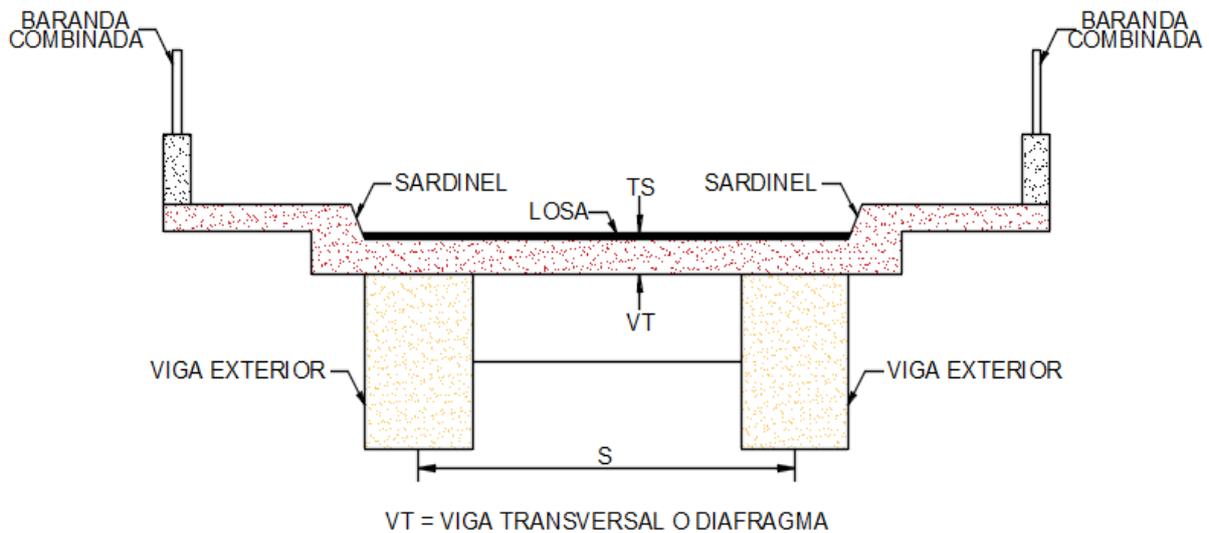
Para una mayor referencia, se recomienda revisar el Manual de Puentes del MTC, aprobado por R.D. N°19-2018-MTC/14.

Figura N°1. Elevación – Puente tipo Viga Losa



Fuente: Adaptación del Puente La Unión – Otuzco La Victoria

Figura N°2. Sección transversal – Puente tipo Viga Losa.

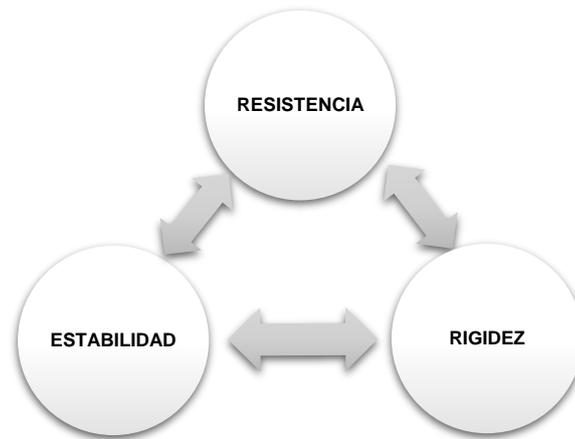


Fuente: Adaptación del Puente La Unión – Otuzco La Victoria

2.2.4. SEGURIDAD ESTRUCTURAL

Según el art. 10 del Código Técnico de la edificación (CTE), parte I: "El objetivo del requisito básico de "Seguridad estructural" consiste en asegurar que el edificio tiene un comportamiento estructural adecuado frente a las acciones e influencias previsibles a las que pueda estar sometido durante su construcción y uso previsto".

Figura N°3. Exigencias para una Seguridad Estructural



Fuente: Elaboración propia

En la investigación realizada por la Universidad de Sevilla en el 2016, hace referencia a seguridad estructural como un comportamiento adecuado a que cumpla las exigencias de resistencia, estabilidad y rigidez.

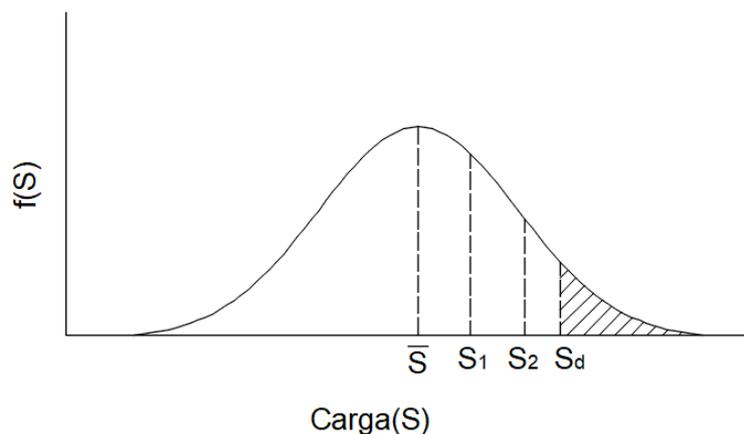
- **Resistencia:** La estructura debe resistir las acciones a las que puede estar sometida a lo largo de su vida útil. En otras palabras, debe de soportar las tensiones a las que se ve sometida sin romperse. La resistencia depende de las propiedades mecánicas de los materiales empleados (Resistencia, módulo de elasticidad, etc), del tamaño, forma y tipo de la sección de los elementos que conforman la estructura. (Universidad de Sevilla, 2016)
- **Estabilidad (Equilibrio):** La estructura debe permanecer en equilibrio estable, bajo las acciones a las que puede estar sometida a lo largo de su vida útil. La estructura debe mantenerse estable en su posición original sin desmoronarse o caerse al verse sometida a esfuerzos. La estabilidad está relacionada claramente con el centro de gravedad. (Universidad de Sevilla, 2016)
- **Rigidez:** La estructura debe permanecer rígida bajo las acciones a las que puede estar sometida a lo largo de su vida útil. En este contexto, una estructura es suficientemente rígida si las deformaciones o desplazamientos que sufre son

tan pequeñas que no afectan al uso (servicio) del edificio. La rigidez depende del módulo de Elasticidad, forma de la sección, además de considerarse la Inercia y la longitud del elemento. (Universidad de Sevilla, 2016)

2.2.4.1. Margen de seguridad (M)

- **Variabilidad de Cargas o Solicitaciones (S):** Para Nilson A., (2001), la carga máxima que va a ocurrir durante la vida de una estructura es incierta, por lo que se considera una variable aleatoria. Un modelo de probabilidad para la carga máxima puede deducirse a partir de una función de densidad probabilística para cargas, tal y como se presenta a continuación:

Figura N°4. Curva de frecuencia para Cargas y Solicitaciones (S)

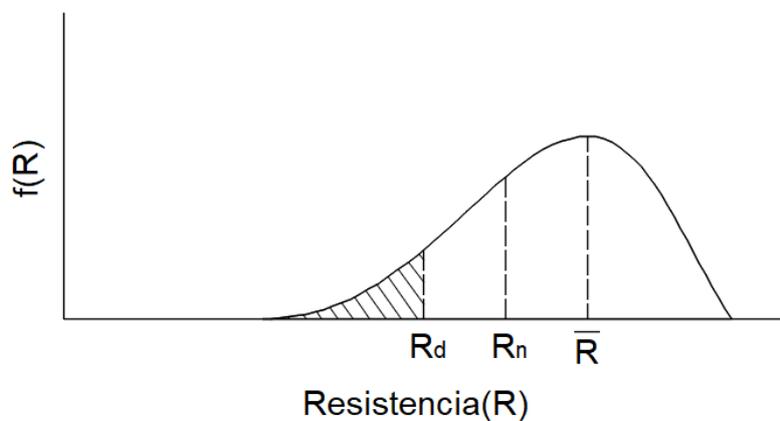


Fuente: Adaptado de Nilson, 2001

En la curva de frecuencia para las cargas y solicitaciones (S), el área bajo la curva entre dos abscisas, tales como las cargas S_1 y S_2 , representa la probabilidad de ocurrencias de cargas S. Para diseño se selecciona una carga conservadora S_d , mientras que la carga media \bar{S} es mucho más representativa de las condiciones de carga promedio sobre la estructura que la carga de diseño especificada S_d . (Nilson A., 2001)

- **Resistencia (R):** Para Nilsson A. (2001), la resistencia de una estructura está dada por la resistencia de los materiales que la conforman, pero muchas veces estas no se conocen de manera precisa; por lo que, también es considerada una variable aleatoria. Aún más la resistencia de la estructura depende también del cuidado que se tenga en la construcción, lo cual a su vez refleja la calidad de la supervisión y de la inspección.

Figura N°5. Curva de frecuencia para resistencia (R)



Fuente: Adaptado de Nilsson, 2001

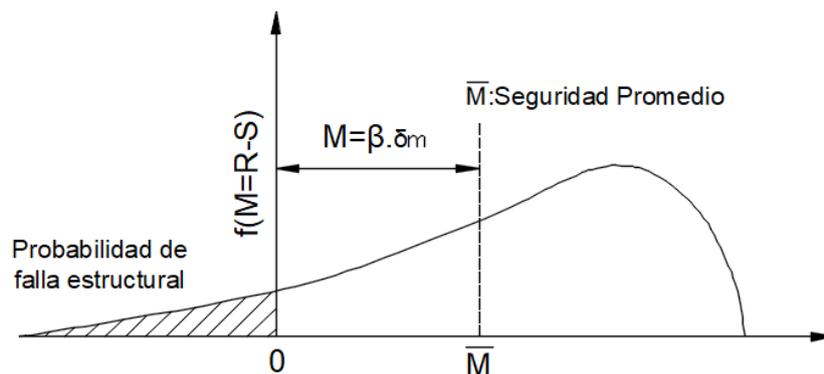
En la curva de frecuencia para la Resistencia (R), el área bajo la curva entre dos abscisas, tal como las cargas R_n , representa la probabilidad de ocurrencias de Resistencia R. Para diseño se selecciona un valor de Resistencia conservadora R_d , mientras que la resistencia media \bar{R} es mucho más representativa de las condiciones de resistencia promedio sobre la estructura que la resistencia de diseño especificada R_d . (Nilsson A., 2001)

Teniendo los conceptos de cargas o solicitaciones (S) y Resistencia (R), se puede definir que una estructura dada tiene Margen de seguridad (M) si:

$$M = R - S > 0 \quad (1)$$

Es decir, si la resistencia (R) de la estructura es mayor que las cargas y solicitaciones (S) que actúan sobre ella, considerando que R y S son variables aleatorias, el Margen de Seguridad (M), también es una variable aleatoria, ocurriendo la falla cuando M es menor que cero. (Nilson A., 2001)

Figura N°6. Curva de frecuencia del Margen Estructural (M)



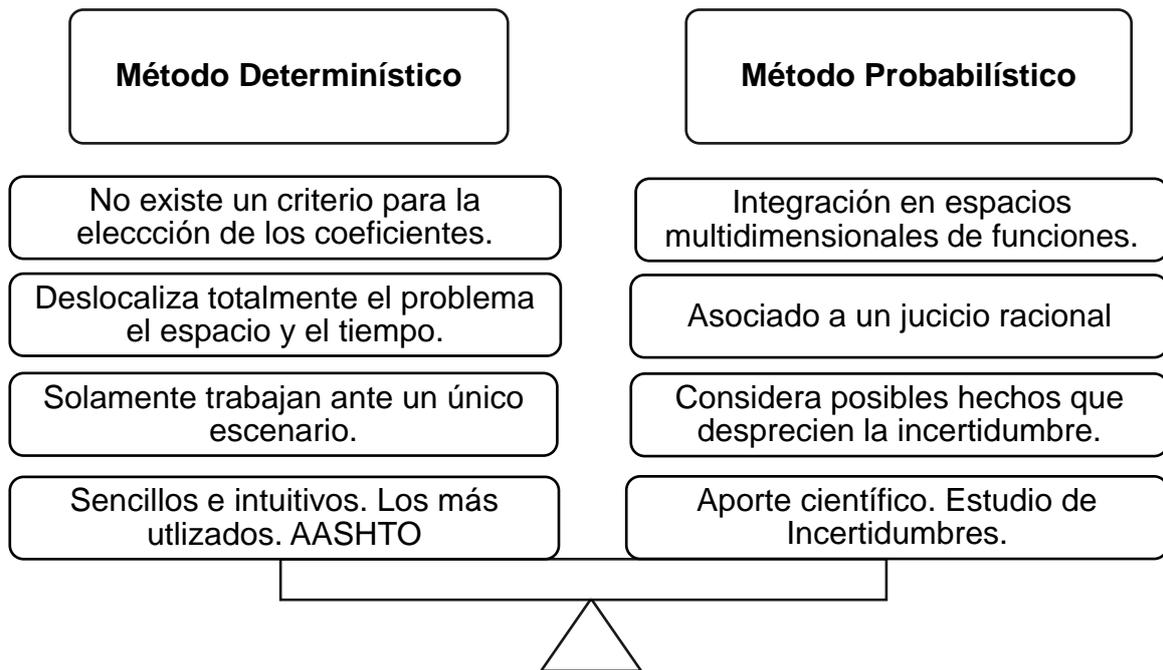
Fuente: Adaptado de Nilson, 2001

En la curva de frecuencia del Margen de Seguridad se puede observar que la falla ocurre cuando M es menor que cero; la probabilidad de falla está representada entonces por el área sombreada de la figura N°6. (Nilson A., 2001)

2.2.5. SEGURIDAD ESTRUCTURAL DESDE EL PUNTO DETERMINÍSTICO Y PROBABILÍSTICO

Carrasco E., (2005), en su investigación para la UPC, determina que no es posible hallar la seguridad estructural con el método determinístico ya que necesita de un estudio riguroso ante los problemas habituales de los puentes existentes, es por lo que es necesario la utilización de métodos probabilísticos con los requisitos o exigencias que se supone. A continuación, se presenta un cuadro comparativo de estos dos métodos.

Figura N°7. Comparación de los métodos determinístico y probabilístico.



Fuente: ICEET, 1992

Para Carrasco E., (2005); una simplificación habitual y perfectamente válida en muchos casos es la de considerar que al estado límite le corresponde la diferencia entre Resistencia y Solicitación ($R - S = 0$) y que R y S son variables aleatorias independientes. Como ya se refirió en el ítem anterior R y S dependen de multitud de variables aleatorias básicas. A continuación, se enumeran las variables básicas asociadas a la resistencia (R) y a las cargas y solicitaciones (S) de un puente existente:

- **Asociadas a Resistencia (R):** Tipo de sección, canto de la sección, espesores, área de acero de armar, área de acero pretensado, recubrimientos, resistencia a compresión y a tracción del hormigón, límites elásticos de los aceros de armar y pretensado, proceso constructivo, etc.
- **Asociadas a Cargas y Solicitaciones (S):** Esquema estructural, cargas exteriores, peso propio, cargas muertas, etc.

Una variable aleatoria queda satisfactoriamente caracterizada con gran número de datos disponibles conocida su media muestral, desviación estándar de la muestra y, por último, la función densidad de probabilidad teórica que más se ajusta a esta. (Normal, LogNormal, etc.) (Carrasco E., 2005)

Aunque las variables básicas no puedan desprenderse del carácter de variable aleatoria, les corresponde un valor nominal o característico de carácter determinista que proviene de los datos de proyecto, resultado del diseño mediante las correspondientes normativas. Dichos valores nominales pueden extraerse, por ejemplo, directamente de los planos de proyecto: dimensiones de la sección, cantos útiles, áreas de acero, resistencias características de los materiales, etc. (Carrasco E., 2005)

2.2.6. ESTADOS LÍMITES

a) Estado límite de Servicio: El estado límite de servicio será tomado en cuenta como una restricción sobre los esfuerzos, deformaciones y ancho de grietas bajo condiciones regulares de servicio. El estado límite de servicio proporciona ciertos requisitos basados en la experiencia que no siempre se pueden derivar exclusivamente a partir de consideraciones estadísticas o de resistencia. (MTC, 2018)

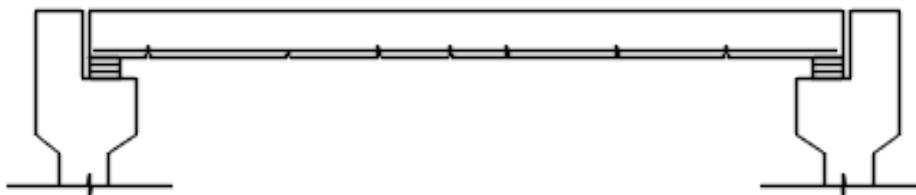
b) Estado límite de fatiga y fractura: El estado límite de fatiga será tomado en cuenta como un juego de restricciones en el rango de esfuerzos causados por un solo camión de diseño que ocurre en el número esperado de ciclos correspondientes a ese rango de esfuerzos. El estado límite de fractura será tomado en cuenta como un conjunto de requisitos de tenacidad del material. El estado límite de fatiga intenta limitar el crecimiento de grietas bajo cargas

repetitivas para prevenir la fractura durante la vida de diseño de puentes. (MTC, 2018)

c) Estado límite de resistencia: El estado límite de resistencia debe ser considerado para asegurar la resistencia y estabilidad. Ambas, local y global son dadas para resistir las combinaciones de cargas especificadas estadísticamente que se espera que un puente experimente durante su vida de diseño. Bajo el estado límite de resistencia se pueden producir tensiones muy elevadas y daños estructurales, pero se espera que la integridad estructural global se mantenga. (MTC, 2018)

d) Estado límite de evento extremo: El estado límite de evento extremo debe ser considerado para asegurar la supervivencia estructural de un puente durante un sismo importante o durante inundaciones o cuando es colisionado por un buque, vehículos o flujos de hielo, posiblemente bajo condiciones severas de socavación. O período de retorno que puede ser significativamente mayor que la vida útil del diseño del puente. (MTC, 2018)

Figura N°8. Representación gráfica del estado límite de servicio (Agrietamiento)



Fuente: Silva J., 2018

2.2.7. MODELO DE RESISTENCIA

Basándose en los estudios de Nowak A. y Collins K. (2000), los cuales son tomados como fundamentos de la Norma AASHTO LRFD, se puede decir que la capacidad de una estructura, en este caso de un puente depende principalmente de

la resistencia de sus componente y conexiones. La resistencia (R), normalmente es una función de la resistencia del material, la geometría de la sección y las dimensiones. Teniendo la siguiente ecuación:

$$R = MFPR_n \quad (2)$$

Donde:

R_n= resistencia nominal, es el valor de resistencia especificada por la AASHTO (ítem 2.2.7.2.).

M= es un parámetro que refleja la variación en la resistencia del material. Definiéndose como la relación entre las propiedades reales y nominales de los materiales, como la resistencia a la compresión del concreto o el límite elástico del acero.

F= es una variable que refleja incertidumbres en la fabricación. Definiéndose como la relación entre las propiedades reales y nominales de la sección transversal, tal como las dimensiones, módulo plástico, módulo de sección y momento de inercia.

P= es un factor de análisis o factor profesional. Definiéndose como la relación entre la capacidad de prueba (real in situ) y la capacidad prevista (según el modelo utilizado en el diseño).

Los parámetros para la resistencia (R) son calculados de la siguiente manera:

Las estimaciones de λ_R (factor bias de la resistencia), V_R (varianza de la resistencia), esta dada en función de los estadísticos de los factores M, F y P.

$$\lambda_R = (\lambda_M)(\lambda_F)(\lambda_P) \quad (3)$$

Donde λ es el factor bias para cada parámetro.

$$V_R = (V_M^2 + V_F^2 + V_P^2)^{1/2} \quad (4)$$

Donde V es el coeficiente de variación para cada parámetro.

2.2.7.1. Parámetros estadísticos de Resistencia a Nivel de Diseño (Expediente técnico)

Tomando como referencia el libro estadounidense *CALIBRATION OF LRFD BRIDGE DESIGN CODE* de Nowak A, 1999; quien realizó los estudios para vigas de concreto armado y preesfrozado, además de secciones compuestas y no compuestas, presenta una tabla de parámetros estadísticos de resistencia, para los siguientes factores F, M y R.

Tabla N°1. Parámetros estadísticos de resistencia

| TIPO DE ESTRUCTURA | FM | | P | | R | |
|-------------------------------------|-----------|-------|-----------|------|-----------|-------|
| | λ | V | λ | V | λ | V |
| Vigas de acero no compuestas | | | | | | |
| Momento | 1.095 | 0.075 | 1.02 | 0.06 | 1.12 | 0.10 |
| Cortante | 1.12 | 0.08 | 1.02 | 0.07 | 1.14 | 1.105 |
| Vigas de acero compuestas | | | | | | |
| Momento | 1.07 | 0.08 | 1.05 | 0.06 | 1.12 | 0.10 |
| Cortante | 1.12 | 0.08 | 1.02 | 0.07 | 1.14 | 0.105 |
| Concreto reforzado | | | | | | |
| Momento | 1.12 | 0.12 | 1.02 | 0.06 | 1.14 | 0.13 |
| Cortante | 1.13 | 0.12 | 1.075 | 0.10 | 1.20 | 0.155 |
| Hormigón pretensado | | | | | | |
| Momento | 1.04 | 0.045 | 1.01 | 0.06 | 1.05 | 0.075 |
| Cortante | 1.07 | 0.10 | 1.075 | 0.10 | 1.15 | 0.14 |

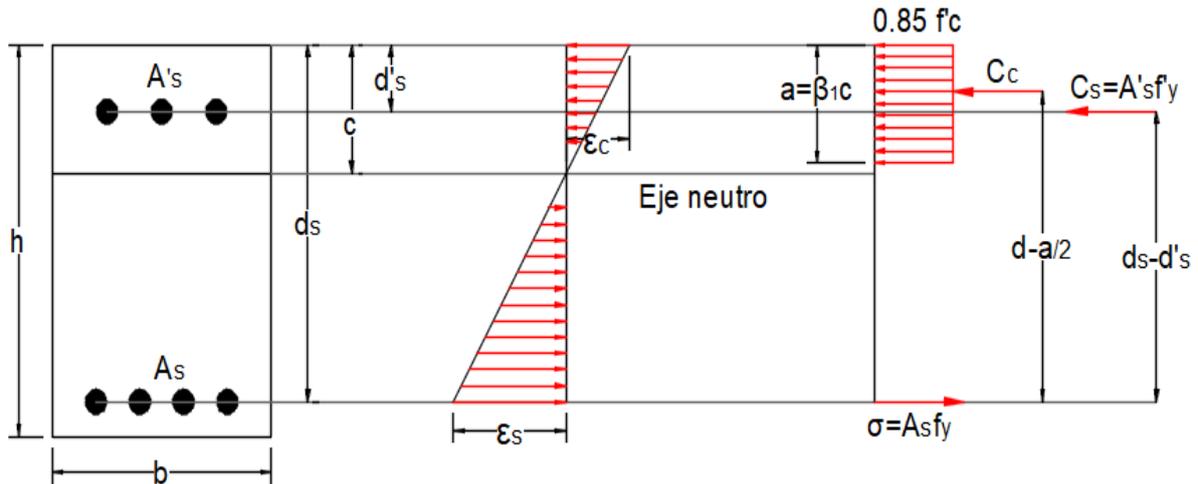
Fuente: Adaptación de Tabla 3. *Statistical Parameters of Resistance*. (Nowak A., 1999)

2.2.7.2. Parámetros estadísticos a nivel de evaluación

a) Definición de Modelos para Estado Límite de Resistencia

a.1. Resistencia a la flexión: de acuerdo al Código AASHTO LRFD-2020

Figura N°9. Representación gráfica de la Viga



Fuente: Elaboración propia

➤ Resistencia nominal a la flexión M_n :

$$M_n = A_{ps}f_{ps} \left(d_p - \frac{a}{2} \right) + A_s f_y \left(d_s - \frac{a}{2} \right) - A'_s f'_y \left(d'_s - \frac{a}{2} \right) + 0.85 f'_c (b - b_w) \beta_l h_f \left(\frac{a}{2} - \frac{h_f}{2} \right) \quad (5)$$

Distancia C entre el eje neutro y la cara comprimida

- Para comportamiento de sección rectangular:

$$c = \frac{A_{ps}f_{pu} + A_s f_y - A'_s f'_y}{0.85 f'_c \beta_l b + \frac{k A_{ps} f_{pu}}{d_p}} \quad (6)$$

$$\text{Siendo } k = 2 \left(1.04 - \frac{f_{py}}{f_{pu}} \right) \quad (7)$$

Donde:

- A_{ps} = área de acero pretensado.

- A_s = área de la armadura de tracción no pretensada.
- $A's$ = área de la armadura de compresión.
- $a = c \beta_l$; altura del diagrama de tensiones equivalente.
- b = ancho de la cara comprimida del elemento.
- b_w = ancho del alma o diámetro de una sección circular.
- c = distancia entre el eje neutro y la cara comprimida.
- d_p = distancia de la fibra extrema comprimida y el baricentro de los tendones de pretensado.
- d_s = distancia de la fibra extrema comprimida y el baricentro de la armadura de tracción de pretensado.
- d_s' = distancia de la fibra extrema comprimida y el baricentro de la armadura de compresión.
- f_{ps} = tensión media en el acero de pretensado a la resistencia nominal a la flexión.
- f_{pu} = resistencia a la tracción específica del acero de pretensado.
- f_{py} = tensión de fluencia del acero de pretensado.
- f_y = tensión de fluencia especificada de las barras de armadura.
- $f'y$ = tensión de fluencia especificada de la armadura de compresión.
- $f'c$ = resistencia a la compresión especificada del hormigón a 28 días.
- h_f = altura del ala comprimida de un elemento sección T o doble T.
- β_l = factor para el diagrama de tensiones. (AASHTO LRFD, 2020)

a.2. Resistencia a Fuerza cortante para concreto reforzado: de acuerdo al código AASHTO LRFD-2020.

➤ **Resistencia al Corte Mayorada V_r**

Se toma como:

$$V_r = \phi V_n \quad (8)$$

➤ **Resistencia Nominal al Corte V_n**

Se deberá determinar como el menor valor entre:

$$V_n = V_c + V_s + V_p \quad (9)$$

$$V_n = 0.25f'_c b_v d_v + V_p \quad (10)$$

La resistencia nominal del concreto al corte se toma:

$$V_c = 0.265\beta\lambda\sqrt{f'_c} b_v d_v \quad (11)$$

La resistencia nominal del acero al corte es:

$$V_s = \frac{A_v f_y d_v (\cot\theta + \cot\alpha) \text{sen}\alpha}{s} \lambda_{duct} \quad (12)$$

Proceso simplificado para la determinación de β y θ en secciones no preesforzadas:

Es posible utilizar de $\beta=2$ y $\theta=45^\circ$ para los siguientes casos:

- En cimentaciones donde la distancia desde el punto de corte cero a la cara de la columna, pilar o muro es menor que $3d_v$ con o sin refuerzo transversal.
- Secciones no presforzadas no sujetas a tracción axial y con la cantidad la mínima de refuerzo, o cuando tienen un peralte total menor de 0.40m.

En tal razón, si además $\lambda=1$, las ecuaciones dadas anteriormente se convierten en:

$$V_c = 0.53\sqrt{f'_c} b_v d_v \quad (13)$$

$$V_s = \frac{A_v f_y d_v}{s}, \text{ con } \alpha = 90^\circ \quad (14)$$

Con lo que la resistencia nominal al corte de un elemento de concreto armado con refuerzo transversal mínimo se puede tomar como:

$$V_c = \phi 0.53\sqrt{f'_c} b_v d_v \quad (15)$$

Siendo:

- b_v = ancho del alma efectivo tomado como el mínimo ancho del alma dentro de la altura d_v (cm).
- d_v = altura de corte efectiva (cm).
- S = separación de los estribos (cm).
- $\phi = 0.90$ (factor de resistencia por corte)
- A_v = área de la armadura de corte en una distancia s (cm)
- V_c = cortante resistente nominal del concreto (kg)
- V_s = cortante resistente nominal del acero (kg)
- V_p = componente de la fuerza de pretensado efectiva en la dirección del corte aplicado; positiva si se opone al corte aplicado (kg). (AASHTO LRFD, 2020)

b) Parámetros estadísticos de la resistencia nominal

b.1. Parámetros estadísticos para resistencia a compresión del concreto

En la investigación de tesis de Silva J.,2018, este hizo una recopilación de resultados de investigaciones de varios países para los modelos de resistencia a compresión del concreto. Concluyendo que estos se ajustan a una distribución normal, existe una variación en los valores de media y desviación estándar. A continuación, se presenta la tabla resumen para concreto elaborada in obra.

Tabla N°2. Parámetros estadísticos para resistencia a compresión del concreto elaborado en obra.

| Lugar de investigación | Valor Nominal $f'c$ (MPa) | Factor Bias λ | Desviación estándar σ_s (MPa) | Coefficiente de variación V(%) |
|--|---------------------------|-----------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| US, Canadá y Europa (Mirza et 1979) | $f'c < 27$ | - | - | 10 – 20 |
| | $f'c \geq 27$ | - | 2.7 – 5.4 | - |
| Suencia (Thelandersson 1993) | $f'c=35$ | 1.24 | - | 8.5 |
| Alemania (Sobrino 1993) | $25 \leq f'c \leq 45$ | - | - | 9 – 20 |
| España (Sobrino 1993) | $25 \leq f'c \leq 40$ | 1.09-1.39 | 2.6 – 4.2 | 6 – 11 |
| Canadá (Bartlett y McGregor 1998) | $f'c=55$ | 1.25 | - | 10 |
| Portugal (Henriques 1998) | $20 \leq f'c \leq 35$ | 1.23 – 1.55 | 3.9 – 6.6 | 9 – 17 |
| Estados Unidos (Nowak y Szerszen 2003) | $21 \leq f'c \leq 41$ | 1.12 – 1.35 | | 4 - 15 |
| | $48 \leq f'c \leq 83$ | 1.04 – 1.19 | 1.5 – 4.9 | 9 – 12 |
| Perú (Coronel 2003) | $21 \leq f'c \leq 35$ | 1.24 | 5.4 – 9.0 | 19.8 |
| Colombia (Venegas 2014) | $21 \leq f'c \leq 35$ | 1.27 | 3.5 | 16.67 |
| México (Téllez, G 2005) | $f'c = 20$ | 1.15 | 3.85 | 16.7 |
| | $f'c = 25$ | 1.072 | 4.46 | 16.6 |
| | $f'c = 30$ | 1.07 | 41.3 | 12.9 |

Fuente: Silva J., 2018

b.2. Parámetros estadísticos para acero de refuerzo

Silva J., 2018 en su tesis de investigación, presenta un cuadro con parámetros a considerar para el acero de refuerzo. Tal y como se muestra a continuación:

Tabla N°3. Parámetros estadísticos para el acero de refuerzo pasivo.

| Propiedad | Grado | Factor Bias λ | Coef. Variación Cv (%) |
|---------------------------------------|--------------|---|-----------------------------------|
| Estados Unidos (Nowak y Collins 2000) | 40 | 1.11 | 11.6 |
| | 60 | 1.11 | 9.8 |
| Perú (Coronel 2003) | 60 | 1.12 | 11.2 |
| Colombia (Venegas 2014) | 60 | 1.11 | 10.7 |
| México (Téllez, G 2005) | 60 | 1.10 | 3.7 |

Fuente: Silva J.,2018

2.2.8. MODELOS DE CARGA

Tomando como referencia a Nowak A. y Collins K. (2000), ya que sus investigaciones son bases para la metodología AASHTO LRFD, los mismos que consideran como variable aleatoria a las cargas o solicitaciones (S), encontrándose este modelo en función del valor nominal de la carga (A), en función al modo en la que actúa la carga (B), como por ejemplo una carga distribuida o una carga concentrada; y la consideración de las diferentes aproximaciones o idealizaciones utilizadas en el modelamiento estructural (C), obteniendo la siguiente ecuación:

$$S = A * B * C \quad (16)$$

Para complementar el análisis de carga, es necesario relacionar la variabilidad de los parámetros estadísticos (factor media, factor bias y el coeficiente de variación) con las tres funciones con las que depende este análisis, proponiendo Nowak A. y Collins K (2000), las siguientes relaciones:

$$\mu_s = \mu_A * \mu_B * \mu_C \quad (17)$$

$$V_s = \sqrt{V_A^2 + V_B^2 + V_C^2} \quad (18)$$

$$\lambda_s = \lambda_A * \lambda_B * \lambda_C \quad (19)$$

Donde:

- $\mu_s, \mu_A, \mu_B, \mu_C$ = medias entre las cargas y factores intervinientes.
- $\lambda_s, \lambda_A, \lambda_B, \lambda_C$ = factores bias (relación entre la media y el valor nominal)
- V_s, V_A, V_B, V_C = coeficientes de variación.

2.2.8.1. Cargas muertas (D)

Nowak A. y Collins K. (2000), consideran a la carga muerta como la carga de gravedad debida al peso propio de los elementos estructurales y no estructurales que conforman la estructura, permaneciendo constante a lo largo de la vida útil de la estructura.

Nowak A. (1999), considera conveniente clasificar las cargas que facilite determinar sus grados de variación y análisis del modelo: presentando los siguientes:

- D_1 : peso de elementos de fábrica (acero, hormigón prefabricado).
- D_2 : peso del hormigón colocado in situ.
- D_3 : peso de la superficie de rodadura (asfalto).
- D_4 : peso de los otros elementos (baranda, luminarias, etc).

a) Valores predeterminados para la carga muerta

A continuación, en la Tabla N°4. Pesos unitarios de materiales, presentamos los valores de los pesos unitarios de los diferentes materiales, utilizando como referencia a la AASHTO, 2020 y al Manual de Puentes, 2018.

Tabla N°4. Pesos unitarios de materiales

| Material | Peso Unitario (Kg/m³) |
|---|--|
| Acero | 7850 |
| Agua fresca | 1000 |
| Agua salada | 1020 |
| Albañilería de piedra | 2700 |
| Aleaciones de aluminio | 2800 |
| Arcilla blanda | 1600 |
| Arena, limo o grava no compactados | 1600 |
| Arena, limo o arcilla compactados | 1900 |
| Concreto simple | |
| Liviano | 1760 |
| De arena liviana | 1920 |
| Peso normal con $f'c \leq 350 \text{ kg/cm}^2$ | 2320 |
| Peso normal con $350 < f'c \leq 1050 \text{ kg/cm}^2$ | $2240 + 0.23f'c$ |
| Concreto armado (C3.5.1 AASHTO) | Peso concreto simple + 80 kg/m^3 |
| Grava, Macadam o balasto compactados | 2240 |
| Hierro fundido | 7200 |
| Madera dura | 960 |
| Madera blanda | 800 |
| Relleno de ceniza | 960 |
| Superficie de rodamiento bituminosas | 2240 |
| Material | |
| Rieles de tránsito, durmientes y fijadores de vía | 300 |

Fuente: Tabla 3.5.1-1, AASHTO 2020. Tabla 2.4.2.1-1. Pesos específicos,

MTC,2018.

b) Parámetros estadísticos para carga muerta

Estas variables son consideradas como aleatorias normales, según lo planteado por Nowak A., 1999, en su libro "CALIBRATION OF LRFD BRIDGE DESIGN CODE", presentando los siguientes parámetros estadísticos:

Tabla N°5. Parámetros estadísticos para carga muerta

| Componente | Factor Bias | Coefficiente de variación |
|-------------------------------|--------------------|----------------------------------|
| D1: elementos de fábrica | 1.03 | 0.08 |
| D2: concreto colocado in situ | 1.05 | 0.10 |
| D3: Superficie de rodadura | 1 | 0.25 |
| D4: otros elementos | 1.03 – 1.05 | 0.08 – 0.10 |

Fuente: Adaptado de Nowak A, 1999, p10.

2.2.8.2. Carga viva estática

a) Parámetros estadísticos

Según la National Cooperative Highway Research Program, report 489, (2003), en la Tabla 2.3. Datos de entrada para variables aleatorias de carga muerta y viva, los parámetros estadísticos para carga viva (Live load modeling, factor λ_{LL}) son:

- **Distribución:** Log Normal
- **Factor Bias (λ):** 1.0
- **Coefficiente de Variación (V):** 18%

b) Valores predeterminados para la carga viva estática:

Para el Manual de Puentes, (2018); considera que se deberá aplicar una carga peatonal de 0.075 ksf o un Valor Nominal de 367 Kg/m².

2.2.8.3. Cargas vivas móviles y cargas de impacto

a) Parámetros estadísticos

Según el reporte 489 de *National Cooperative Highway Research Program* (2003, p29), en la Tabla 2.3. Datos de entrada para variables aleatorias de carga muerta y viva, presenta parámetros estadísticos calibrados para la norma AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, los mismos que son presentados a continuación:

Tabla N°6. Parámetros estadísticos para carga móvil y de impacto

| Tipo | λ | C.V | Distribución | Fuente |
|--|-----------|-----|--------------|-----------------------------|
| Modelo carga viva | 1.20 | 18% | Lognormal | Nowak (1999) y Moses (2001) |
| Amplificación dinámica para un carril | 1.13 | 10% | Normal | Nowak (1993) |
| Amplificación dinámica para dos carriles | 1.09 | 6% | Normal | Nowak (1993) |

Fuente: National Cooperative Highway Research Program 2003, p 29.

En el artículo de Nowak A., (1993) titulado Reliability – based evaluation of existing bridges, considera los vehículos de configuración de ejes y carga diversas, proponiendo tres periodos de evaluación tal como se muestra en la Tabla N°7.

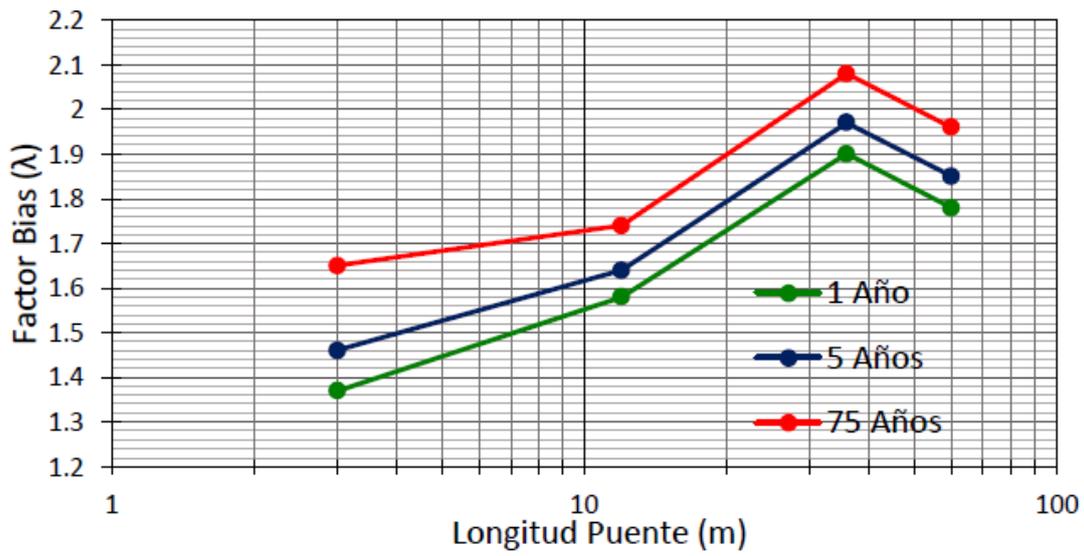
Tabla N°7. Parámetros estadísticos para carga viva móvil y de impacto para diversas cargas móviles

| Longitud puente | Periodo de evaluación | | | | | |
|-----------------|-----------------------|-------|-----------|-------|-----------|------|
| | 1 año | | 5 años | | 75 años | |
| | λ | C.V | λ | C.V | λ | C.V |
| 3 m | 1.37 | 0.15 | 1.46 | 0.15 | 1.65 | 0.14 |
| 12 m | 1.58 | 0.13 | 1.64 | 0.12 | 1.74 | 0.11 |
| 36 m | 1.9 | 0.135 | 1.97 | 0.12 | 2.08 | 0.11 |
| 60 m | 1.78 | 0.14 | 1.85 | 0.125 | 1.96 | 0.11 |

Fuente: Adaptado de Nowak A. 1993, p277.

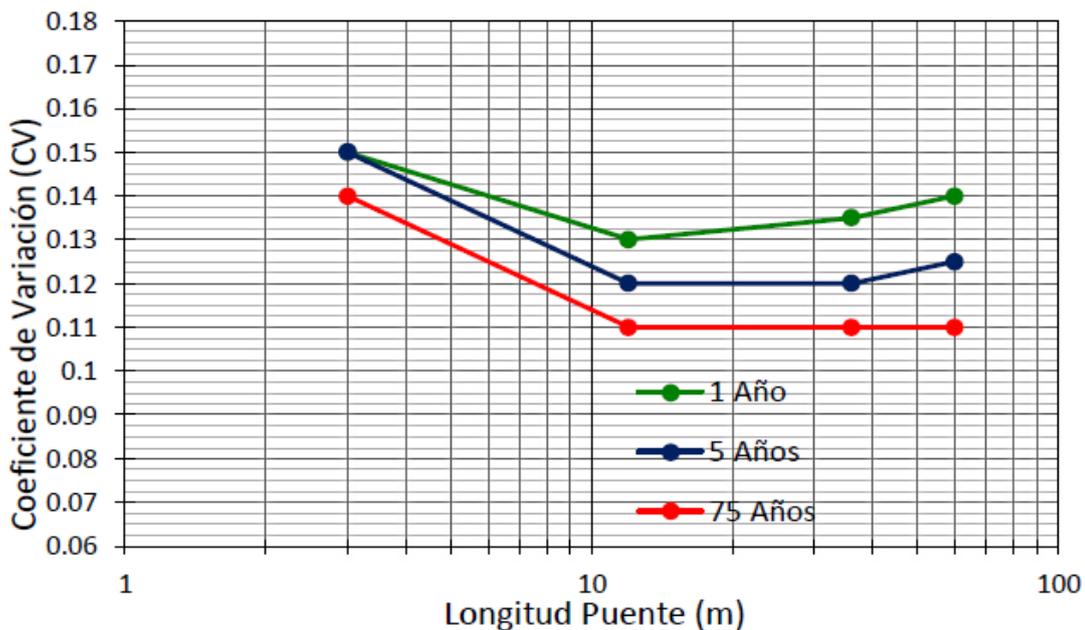
Además Silva J.,2018 en su estudio de investigación presenta gráficas del periodo vs factor bias λ y el coeficiente de variación (CV), (Figura N°10 y Figura N°11) para la obtención de valores intermedios por medio de interpolación, para una evaluación de la carga móvil con técnicas de confiabilidad.

Figura N°10.Factor Bias (λ) para cargas vehiculares



Fuente: Silva J., 2018

Figura N°11.Coeficiente de variación (CV) para cargas vehiculares.



Fuente: Silva J., 2018

b) Vehículos autorizados en carreteras peruanas

Son todos los vehículos autorizados por el Reglamento Nacional de vehículos (2003, p 78-84), aprobado mediante D.S. N°508-2003-MTC, detallándose en su Anexo IV: Pesos y medidas, en la que presenta la configuración vehicular, dimensiones de este, peso máximo y bruto en Tn.

2.2.8.4. Determinación probabilística de factores de seguridad

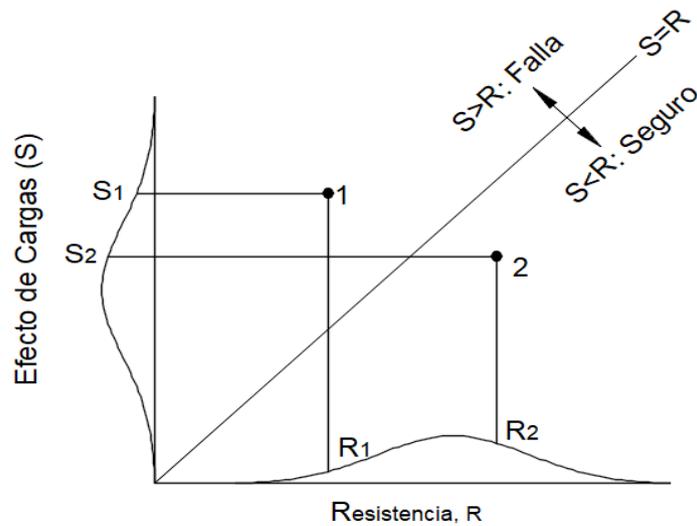
Para determinar la seguridad estructural de una estructura en general el requisito indispensable sería que la resistencia (R) sea mayor o igual que el efecto de la carga (S):

$$R \geq S \quad (20)$$

De lo contrario, fallaría ($R < S$). Este concepto se representa en la figura N°8 para los momentos de flexión, donde lo que se espera que experimente la estructura durante su vida útil se traza en el eje vertical y la resistencia R se traza en el eje horizontal. Por consistencia, es conveniente expresar tanto la resistencia como los efectos de la carga en términos de una cantidad como el momento de flexión. La línea de 45° en la Figura N°11 corresponde a $S = R$; es decir, el efecto de la carga es igual a la resistencia. Por lo que, las combinaciones que caen por debajo de la línea de 45° representan la condición $S < R$ (punto 2), es decir representa una condición segura; mientras que para las combinaciones que están sobre esta línea de 45° representa la condición $S > R$ (punto 1), representando falla en la estructura.

Finalmente, se puede definir a estado límite como el límite entre el deseado y las actuaciones no deseadas de una estructura. Por ejemplo, las actuaciones deseadas y no deseadas se pueden explicar en el contexto de una viga que tiene resistencia (capacidad de flexión) R, y el efecto de carga (demanda de momento) S. (Taly, 2014)

Figura N°12. Combinación de seguridad y fallas



Fuente: Taly,2014

En consecuencia, una función de estado límite o función de rendimiento se puede definir como:

$$M(R, S) = R - S \quad (21)$$

Teniendo las siguientes consideraciones:

- $M = 0$... límite entre el desempeño deseado y el no deseado (22)

- $M \geq 0$... desempeño deseado (23)

- $R - S \geq 0$... estructura segura (24)

- $M < 0$... desempeño no deseado (25)

- $R - S < 0$... estructura no es segura (26)

(Taly,2014)

2.2.8.5. Método determinista para la seguridad

Según Taly,2014, expone en su libro "HIGHWAY BRIDGE SUPERSTRUCTURE ENGINEERING", el cociente de la resistencia entre la sollicitación (R/S) como un índice para determinar la seguridad de la estructura del puente. Teniendo las siguientes consideraciones:

- a) $R \geq S \rightarrow R/S \geq 1.00 \rightarrow$ Estructura segura
- b) $R < S \rightarrow R/S < 1.00 \rightarrow$ Estructura Insegura

Silva J., (2018), en su investigación; hace referencia a Hindié F., (1999), el cuál parte de la relación R/S, expresión que es denominada Factor de Capacidad estructural de carga viva.

$$F = \frac{U * R - \sum \alpha_D * D}{\alpha_L * D} \quad (27)$$

Donde:

- U : Factor de Resistencia.
- R : Resistencia.
- α_D : Factor de carga muerta.
- D : Cargas muertas.
- α_L : Factor de cargas vivas.
- L : Cargas vivas.

Definiendo los resultados en las siguientes expresiones:

- a) $F \geq 1.00 \rightarrow$ Estructura en un estado seguro.
- b) $F < 1.00 \rightarrow$ Estructura en un estado de falla.

Este método es utilizado en los diferentes códigos normativos de muchos países, considerándose con mayor notoriedad en el Manual Bridge Evaluation (2013) de la Normativa AASHTO. (Silva J., 2018)

2.2.9. MÉTODO DE CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL

2.2.9.1. Análisis de confiabilidad

Para Melcher R.y Beck A., 2018 el análisis de confiabilidad esta dado en función de las $f_R()$ y $f_S()$ ya sea de manera determinista o con componentes aleatorios, expresándose en las mismas unidades para su análisis. Se considerará que la estructura presenta falla si su resistencia R es menor que el esfuerzo

resultante S que actúa sobre él. La probabilidad de falla P_f del elemento estructural se puede establecer de la siguiente manera:

$$P_f = P(R \leq S) \quad (28.a)$$

$$P_f = P(R - S \leq 0) \quad (28.b)$$

$$P_f = P\left(\frac{R}{S} \leq 1\right) \quad (28.c)$$

$$P_f = P(\ln R - \ln S \leq 1) \quad (28.d)$$

En resumen:

$$P_f = P(M(R, S) \leq 0) \quad (28.e)$$

Donde M () es la función en estado límite y la probabilidad de falla.

Finalmente Melchers R. y Beck A., 2018, expresa que para cualquier elemento infinitesimal ($\Delta r + \Delta s$); es entonces que se puede representar la probabilidad de R y S ($r + \Delta r, s + \Delta s$), donde Δr y Δs se aproximan a cero. En la figura N°13, las ecuaciones (28) están representadas por el dominio de falla sombreado D, por lo que la probabilidad de falla puede escribirse como:

$$P_f = P(R - S \leq 0) = \int_D \int f_{RS}(r, s) dr ds \quad (29)$$

Cuando R y S son independientes, $f_{RS}(r, s) = f_R(r)f_S(s)$, se convierte en:

$$P_f = P(R - S \leq 0) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{S \geq R} f_R(r)f_S(s) dr ds \quad (30)$$

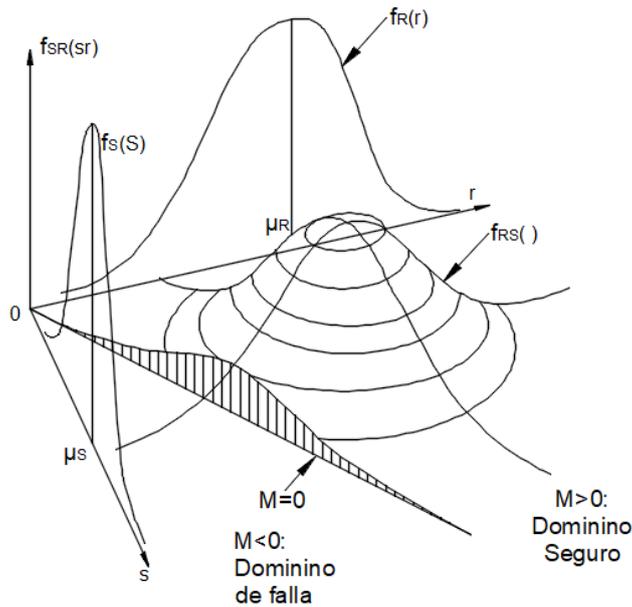
Teniendo en cuenta que para cualquier variable aleatoria X, la función de distribución acumulativa se da por:

$$F_x(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f_x(y) dy \quad (31)$$

Siempre que $x \geq y$, se sigue que para el caso cuando R y S son independientes, se puede escribir en la forma integral simple:

$$P_f = P(R - S \leq 0) = \int_{-\infty}^{\infty} f_R(x)f_S(x)dx \quad (32)$$

Figura N°13. Espacio de las funciones $f_R()$ y $f_S()$ para el nivel de confiabilidad



Fuente: Melchers R. y Beck A., 2018

2.2.9.2. Confiabilidad para variables aleatorias normales

Melchers R. y Beck A., 2018, en su libro "Structural Reliability Analysis and Prediction" indica que la seguridad estructural M, $M = R - S$, entonces tiene una media μ_R y μ_S y una varianza σ_R^2 y σ_S^2 , por lo que se tiene:

$$\text{Para la media: } \mu_M = \mu_R - \mu_S \quad (33)$$

$$\text{Para la desviación estándar: } \sigma_M = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (34)$$

Teniendo la ecuación general:

$$P_f = P(R - S \leq 0) \quad (29.b)$$

$$P_f = P(R - S \leq 0) = P(Z \leq 0) = \Phi\left(\frac{0 - \mu_M}{\sigma_M}\right) \quad (35)$$

Donde Φ es la función de distribución normal estándar

$$P_f = \Phi\left(\frac{-(\mu_R - \mu_S)}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}\right) = \Phi(-\beta) \quad (36)$$

Donde β es denominado índice de confiabilidad:

$$\beta = -\frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} = \frac{\mu_M}{\sigma_M} \quad (37)$$

Tabla N°8. Índices de Confiabilidad y Probabilidad de falla

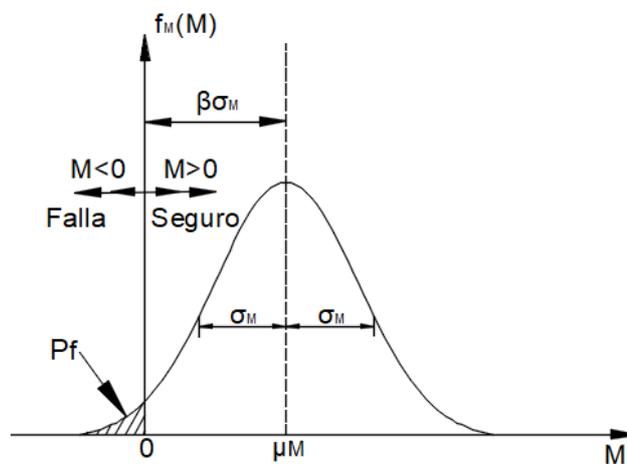
| Beta (β) | Prob fallo P_f | Beta (β) | Prob fallo P_f |
|--|--|--|--|
| 0 | 0.5000002 | 2.6 | 0.0046612 |
| 0.2 | 0.4207402 | 2.8 | 0.0025552 |
| 0.4 | 0.3445782 | 3 | 0.00135 |
| 0.6 | 0.274253 | 3.2 | 0.0006872 |
| 0.8 | 0.2118553 | 3.4 | 0.000337 |
| 1 | 0.1586552 | 3.6 | 0.0001592 |
| 1.2 | 0.1150697 | 3.8 | 7.237E-05 |
| 1.4 | 0.0807567 | 4 | 3.169E-05 |
| 1.6 | 0.0547993 | 4.2 | 1.335E-05 |
| 1.8 | 0.0359303 | 4.4 | 5.42E-06 |
| 2 | 0.0227501 | 4.6 | 2.11E-06 |
| 2.2 | 0.0139034 | 4.8 | 7.9E-07 |
| 2.4 | 0.0081975 | 5 | 2.9E-07 |

Fuente: ICEET, 1992

La varianza aleatoria del Margen de Seguridad (M), $M=R-S$ se muestra en la Figura N°14, en la que se muestra la región de falla $M \leq 0$ (área sombreada).

De la Figura N°14 podemos interpretar: que si las desviaciones estándar σ_R o σ_S o ambas se incrementan, la probabilidad de fallo P_f , aumentará. De manera similar, si la diferencia entre la media del efecto de la carga y la media del efecto de la resistencia, la probabilidad de fallo P_f , aumentará.

Figura N°14. Distribución del Margen de seguridad $M = R-S$



Fuente: Melchers R. y Beck A., 2018

2.2.9.3. Simulación de Montecarlo

La simulación de Montecarlo presenta tiempos aleatorios de falla/reparación de cada falla/reparación de sus componentes de los cuales se generan distribuciones. Estos tiempos de falla/reparación luego se combinan de acuerdo con la forma en que los componentes están dispuestos en términos de confiabilidad dentro del sistema. Los resultados globales se analizan con el fin de determinar el comportamiento de todo el sistema. Lo que da una buena comprensión del comportamiento del sistema es el requisito previo para el sistema lógica de éxito/fracaso. Donde se supone que los valores de confiabilidad para los componentes vienen utilizando técnicas estándar (o aceleradas) de análisis de datos

de vida, de modo que se conoce la función de confiabilidad para cada componente.

(Kumar A., Ajit S. y Rao D, 2016)

Según Silva J.,2018, en su investigación indica que la simulación de Montecarlo es un método basado en generar un conjunto de resultados numéricos (n), de una base de información (N). Usando estos resultados para establecer la distribución o importancia de los parámetros estadísticos de la estructura. A continuación, se presenta los pasos para la realización de esta simulación:

1. Definir las funciones de probabilidad de entrada:

$$M(X_1, X_2, \dots, X_n) \text{ y } M = X_1 + X_2 + \dots + X_n \quad (38)$$

2. Generar valores aleatorios de las variables que se ajusten a la función de distribución probabilística
3. Aleatoriamente generar el valor de la función:

$$M = X_1 + X_2 + \dots + X_n \quad (39)$$

4. Guardar el valor generado.
5. Repetir los pasos anteriores (1-4) hasta tener los suficientes valores generados.
6. Graficar los valores en grafico que estime la probabilidad de falla.
7. Calcular la probabilidad de falla si se tiene un número representativo de resultados.

$$P_f(M) = \frac{\text{número de tiempos } M < 0}{\text{total de números generados de la simulación}} \quad (40)$$

Para evaluar la confiabilidad estructural Nowak A. y Collins K,2000, plantean dos sistemas, un Sistema en serie refiriéndose al eslabón o elemento más débil de un sistema estructural (ejemplo: puente tipo armadura); y un sistema en paralelo, haciendo referencia a sistemas que no se encuentran interconectados sus elementos uno después del otro (ejemplo: puente Viga-Losa).

2.2.10. MÉTODO FACTOR DE CAPACIDAD

2.2.10.1. Factor Rating:

Teniendo como base "THE MANUAL FOR BRIDGE EVALUATION" de la AASHTO, 2013, consideran como el camión de diseño el HL-93, utilizado también para el diseño del método LRFD. Estos modelos abarcan las cargas de diseño, cargas legales y cargas permitidas. Siendo la función final RF, capacidad de carga (Load Rating):

$$RF = \frac{C - (\gamma_{DC})(DC) - (\gamma_{DW})(DW) \pm (\gamma_P)(P)}{(\gamma_{LL})(LL + IM)} \quad (41)$$

Para los estados límites de Resistencia:

$$C = \varphi_C \varphi_S \varphi Rn \quad (42)$$

Considerando que:

$$\varphi_C \varphi_S \geq 0.85 \quad (43)$$

Donde:

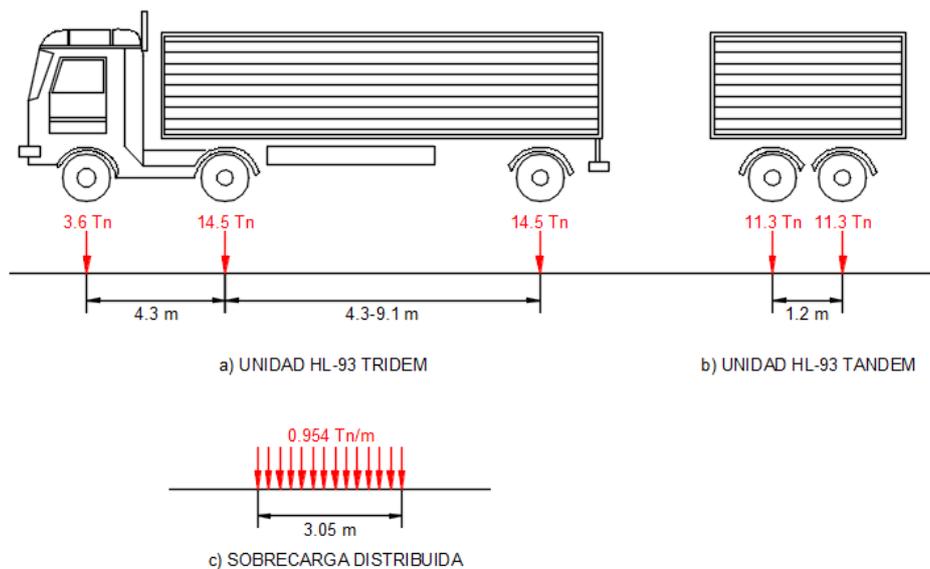
- RF : Factor de Clasificación (Rating Factor)
- C : Capacidad
- Rn : Resistencia nominal del miembro
- DC : Efecto de la carga muerta de los componentes estructurales
- DW : Efecto de la carga muerta de la superficie de rodadura y otros componentes
- P : Efecto Cargas permanentes de otras cargas muertas (preesfuerzo)
- LL : Efecto de la carga viva
- IM : Carga dinámica permisible
- γ_{DC} : Factor de Carga de componentes estructurales
- γ_{DW} : Factor de Carga de superficie y otros componentes

- γ_P : Factor de Carga para cargas permanentes = 1.00
- γ_{LL} : Factor de Evaluación de Carga viva:
- ϕ_C : Factor de condición
- ϕ_S : Factor de sistema
- ϕ : factor de resistencia LRFD

2.2.10.2. Cargas para evaluación

- a) **Carga muerta DC y DW:** Valor nominales presentados en la Tabla N°4: Pesos de materiales extraídos del manual de diseño de puentes de la AASHTO, 2020 y el Manual de Puentes del MTC,2018.
- b) **Otras Cargas permanentes P:** Corresponden a cargas permanentes secundarias como la de preesforzado.
- c) **Carga Viva LL:** de acuerdo a la sección 2.2.10.1. Factor Rating, tenemos las siguientes cargas a considerar:
- **Carga de diseño:** Camión HL-93 de Diseño de puentes LRFD

Figura N°15. Camión de diseño HL-93



Fuente: Adaptado de MBE, AASHTO-2013.

d) Carga de impacto:

Tabla N°9. Carga de impacto de carga móvil

| Componente | Porcentaje |
|--|-------------------|
| Elementos de unión en el tablero (todos los estado límite) | 75% |
| Para otros elementos: | |
| a) Estado límite de fatiga y fractura | 15% |
| b) Otros estados límites | 33% |

Fuente: AASHTO, 2020

e) Carga Peatonal PL: carga que no es necesaria adjuntar a la carga vehicular.

Para el Manual de Puentes, MTC 2018; considera que se deberá aplicar una carga peatonal de 0.075 ksf o un Valor Nominal de 367 Kg/m².

2.2.10.3. Estados límites de carga:

A continuación, se presenta factores de carga para los estados de resistencia, servicio y fatiga, como se puede observar en la Tabla N°12. Factores de carga y clasificación para evaluación de cargas de diseño, página 68.

a) Factor de condición (ϕ_c): Para el MBE, AASHTO 2013 , este factor provee una reducción para contar con el incremento de la incertidumbre en la resistencia de los miembros deteriorados. (Tabla N°10)

b) Factor de sistema (ϕ_s): Para el MBE, AASHTO 2013 , este factor presenta aplicaciones múltiples de la resistencia nominal que refleja el nivel de redundancia del sistema completo de la superestructura, estos factores corresponden a la AASHTO LRFD de especificaciones de Diseño. (Tabla N°11)

Tabla N°10. Factores de condición

| Condición estructural de miembros | φ_c |
|--|-------------|
| Buena o Satisfactoria | 1.00 |
| Regular | 0.95 |
| Pobre | 0.85 |

Fuente: MBE, AASHTO – 2013

Tabla N°11. Factores de sistema

| Tipo de superestructura | φ_s |
|--|-------------|
| Miembros soldados en puentes de dos vigas/ celosía/ arco | 0.85 |
| Miembros soldados en puentes de dos vigas/ celosía/ arco | 0.90 |
| Nudos múltiples en miembros de puentes de celosía | 0.90 |
| Puentes de tres vigas con espaciamiento 6 ft (1.80 m) | 0.85 |
| Puentes de cuatro vigas con espaciamiento <4 ft (1.20 m) | 0.95 |
| Todas las otras vigas y losas de puentes | 1.00 |
| Vigas de piso con espaciamiento >12 ft y viguetas no continuas | 0.85 |
| Subsistemas de largueros redundantes entre vigas de piso | 1.00 |

Fuente: MBE, AASHTO – 2013

c) Factores de reducción de resistencia (φ): Para la AASHTO LRFD, 2020, los factores de reducción de resistencia tienen los siguientes criterios:

- Para tracción controlada para secciones concreto armado: 0.90
- Para tracción controlada para secciones concreto preesforzado: 1.00
- Para corte y torsión:
- Para concreto de densidad normal: 0.90
- Para concreto de densidad baja: 0.80 (AASHTO LRFD, 2020)

Tabla N°12. Factores de carga y clasificación para evaluación de cargas de diseño

| Tipo de puente | Estado Límite | Carga Muerta | Carga Muerta | Carga de diseño | |
|--------------------------|----------------|---------------|---------------|-----------------|---------------|
| | | γ_{DC} | γ_{DW} | Inventario | Operación |
| | | | | γ_{LL} | γ_{LL} |
| Acero | Resistencia I | 1.25 | 1.50 | 1.75 | 1.35 |
| | Resistencia II | 1.25 | 1.50 | - | - |
| | Servicio II | 1.00 | 1.00 | 1.30 | 1 |
| | Fatiga | 0.00 | 0.00 | 0.75 | - |
| Concreto armado | Resistencia I | 1.25 | 1.50 | 1.75 | 1.35 |
| | Resistencia II | 1.25 | 1.50 | - | - |
| | Servicio I | 1.00 | 1.00 | - | - |
| Concreto pre - esforzado | Resistencia I | 1.25 | 1.50 | 1.75 | 1.35 |
| | Resistencia II | 1.25 | 1.50 | - | - |
| | Servicio III | 1.00 | 1.00 | 0.80 | - |
| | Servicio I | 1.00 | 1.00 | - | - |
| Madera | Resistencia I | 1.25 | 1.50 | 1.75 | 1.35 |
| | Resistencia II | 1.25 | 1.50 | - | - |

Fuente: MBE, AASHTO – 2013

2.2.11. NIVELES DE SEGURIDAD ESTRUCTURAL

Zlatko Šavor y Marta Šavor (2014, p 560), plantean que los niveles de seguridad dependen del método de evaluación (método probabilístico y determinístico), los mismos que explican el comportamiento de la estructura en forma numérica, indicando así su desempeño actual.

2.2.11.1. Niveles de Seguridad para Evaluación probabilística

En su libro "BRIDGE DESIGN & EVALUATION, LRFD AND LRFR", Gongkang Fu considera que para este tipo de evaluación se debe verificar que el índice de confiabilidad estructural de un puente sea mayor al índice del nivel objetivo (índice de confiabilidad de diseño o con el de la evaluación).

$$\beta_{objetivo} < \beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (44)$$

Zlatko Šavor y Marta Šavor, 2014, en su investigación presentan índices de confiabilidad mínimos para determinar la seguridad estructural. Estos índices son utilizados en países de alto desarrollo en infraestructura vial.

Tabla N°13. Niveles de seguridad para diferentes países

| Código referencia | Índice de confiabilidad β | | Periodo de referencia | |
|----------------------|---------------------------------|-----------|-----------------------|-----------|
| | Nuevo | Existente | Nuevo | Existente |
| CANADA / CSA - S6-06 | 3.75 | 2.50 | 100 | 5 |
| LRFD USA | 3.50 | 2.50 | 75 | 5 |
| EUROCODIGO | 4.70 | 4.50 | 100 | 50 |
| ALEMÁN NEN 8700 | 4.30 | 3.30 | 100 | 15 |
| AUSTRIA ONR 24008 | 4.30 | 4.30 | 100 | - |
| SUIZA SIA 269 | 4.30 | 4.30 | 100 | - |

Fuente: Zlatko Šavor y Marta Šavor, 2014

US Army Corps of Engineers, (1997, p 8), en su investigación para los elementos estructurales que son componentes de la estructura de un puente; relaciona índices de confiabilidad (β) versus los niveles de desempeño, tal como se muestra a continuación:

Tabla N°14. Nivel de desempeño en función a su índice de confiabilidad (β) y probabilidad de falla (P_f)

| Índice de confiabilidad (β) | Probabilidad de falla (P_f) | Nivel de desempeño |
|---|---|---------------------------|
| 0.0 | 0.50 | Falla |
| 1.0 | 0.16 | Peligroso |
| 1.5 | 0.07 | Insatisfactorio |
| 2.0 | 0.023 | Pobre |
| 2.5 | 0.006 | Bajo el promedio |
| 3.0 | 0.001 | Arriba el promedio |
| 4.0 | 0.00003 | Bueno |
| 5.0 a más | 0.0000003 | Alto |

Fuente: Adaptado de US Army Corps of Engineers 1997, p 11).

2.2.11.2. Niveles de seguridad para Evaluación Determinista

El MEB de la AASHTO (2013), indica que los índices de clasificación de carga (RF) deben superar la unidad para asegurar una completa seguridad estructural, tal y como se presenta en la Tabla N°15 para sus tres niveles de evaluación.

Tabla N°15. Nivel de seguridad según su índice de capacidad

| Índices de capacidad de carga (RF) | |
|---|----------------------|
| Nivel de Evaluación | Rating Factor |
| Primer nivel: Carga de Diseño | RF>1.00 |
| Segundo nivel: Carga Legales | RF>1.00 |
| Tercer nivel: Cargas Permitidas | RF>1.00 |

Fuente: MEB, AASHTO-2013

Complementando este método de evaluación determinista, tenemos que Umpire, 2015, en su tesis presenta tres niveles de índices de capacidad tal como las acciones de prevención a realizar.

Tabla N°16. Clasificación según el índice de capacidad (RF)

| Clasificador de RF | | |
|---------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| Índice de capacidad (RF) | Nivel de desempeño | Medidas |
| RF < 0.65 | Malo | La estructura debe demolerse |
| 0.65 < RF < 1.0 | Regular | Reforzamiento de la estructura |
| RF > 1.0 | Alto | Estructura estable |

Fuente: Umpire, 2015

2.2.12. EVALUACIÓN CUALITATIVA DE PUENTES

2.2.12.1. Guía para inspección de puentes, 2006

- **Finalidad:** La guía para inspección de puentes tiene como fin constatar el estado de los componentes de los mismos que permita la toma de decisiones orientados a mantener continuidad de la transitabilidad de la infraestructura vial en forma eficiente y segura.
- **Objetivo:** El objetivo de la Guía es proporcionar pautas para realizar la inspección apropiada de los componentes de los puentes del Sistema Nacional de Carreteras del Perú a través de procedimientos técnicos estandarizados.
- **Alcances:** La presente Directiva será de cumplimiento y aplicación obligatoria por los entes ejecutores y/o gestores de la red vial correspondiente, a través de los Ingenieros responsables de las Inspecciones de los Puentes.

2.2.12.2. Métodos Descriptivos - MTC

Según La Guía para Inspección de Puentes (2006), se entiende por inspección al conjunto de acciones de gabinete y campo, desde la recopilación de información, hasta la toma de datos en campo, a fin de conocer el estado actual de la estructura. Los objetivos de esta inspección es asegurar el tráfico sin riesgo sobre esta y detectar a tiempo las deficiencias existentes.

La frecuencia para evaluar la estructura de un puente en servicio según el MTC, es de por lo menos una vez al año, y para los componentes sumergidos del puente cada tres años, por parte de personal correctamente adiestrado. Se recomienda realizar la evaluación al término de la temporada de lluvias.

El procedimiento de inspección a seguir según la directiva del MTC, es generalmente sistemático, es decir seguir una rutina de inspección en todos los puentes. La inspección bien documentada es esencial para determinar los requerimientos de mantenimiento y dar recomendaciones prácticas, sugiriendo acciones para corregir las deficiencias o impedir el incremento de estos defectos. Cuando se lleve a cabo una inspección en el campo se debe seguir los siguientes pasos:

A. Acciones previas a los trabajos de campo

Se debe revisar el inventario y los informes de inspección anteriores, a fin de tomar conocimiento si existen circunstancias especiales, como daños observados anteriormente, o elementos estructurales que necesitan una inspección más detallada. Guía para Inspección de Puentes (2006).

B. Acciones en el campo propiamente dichas:

- Se debe verificar la ubicación y nombre del puente programado para su inspección.

- Se debe tomar las medidas de seguridad necesarias.
- Se debe iniciar la inspección tomando fotos de identificación del puente.
- Se debe tomar una fotografía del acceso al puente.
- Se debe inspeccionar y calificar la condición de cada uno de los componentes del puente. ¹
- Al final se debe calificar la condición del puente en general, a través de la tabla N°17. Cuadro de condición global del puente, presentada a continuación.

(Guía para Inspección de Puentes, MTC 2006)

¹ Limitándose la presente investigación a evaluar de manera cualitativa los elementos que conforman la superestructura del puente en estudio.

Tabla N°17. Cuadro de condición global del puente

| Calificación | Descripción de la condición |
|---------------------|---|
| 0 | Muy bueno: No se observa problemas |
| 1 | Bueno: Hay problemas menores. Algunos elementos muestran deterioro sin importancia. |
| 2 | Regular: Los elementos primarios están en buen estado, pero algunos secundarios muestran deterioro, algo de pérdida de sección, grietas, descascaramiento o socavación pérdida de sección avanzada. |
| 3 | Malo: La pérdida de sección, deterioro o socavación afectan seriamente a los elementos estructurales primarios. Hay posibilidad de fracturas locales, pueden presentarse rajaduras en el concreto o fatigas en el acero. |
| 4 | Muy Malo: Avanzado deterioro de los elementos estructurales primarios. <ul style="list-style-type: none"> - Grietas de fatiga en acero o grietas de corte en el concreto - La socavación compromete el apoyo que debe dar la infraestructura. - Conviene cerrar el puente a menos que este monitoreado. |
| 5 | Pésimo: Gran deterioro o pérdida de sección presente en elementos estructurales críticos. <ul style="list-style-type: none"> - Desplazamientos horizontales o verticales afectan la estabilidad de la estructura - El puente se cierra al tráfico pero con acciones correctivas se puede restablecer el tránsito de unidades ligeras. |

Fuente: Guía para inspección de puentes, 2006

C. Acciones para detectar daños más comunes en el concreto:

Los daños en los componentes de concreto incluyen agrietamientos, escamas, delaminación, descascaramiento, afloramientos, desgaste o abrasión, daños de

colisión, pulido y sobrecarga. Estos pueden ser inspeccionados por exámenes visuales y físicos:

La inspección visual permite observar los deterioros primarios, como son las grietas y las manchas de óxido. Se debe reconocer el hecho que no todas las grietas son de igual importancia ya que dependen de la longitud, dirección, localización y extensión de las grietas y manchas de óxido. Para el desarrollo de esta investigación, en la inspección física se realizará el ensayo no destructivo ASTM C805 de esclerometría, el cual nos brindará la actual resistencia del concreto que presenta los elementos que conforman la superestructura del puente.

2.2.12.3. Patologías estructurales en puentes

Según lo citado por Tadeu M. y Lenz A. (2011), las patologías estructurales que se presentan en los puentes varían en intensidad e incidencia, provocando muchas veces altos gastos de reparación como lo describió Raina (2003). Teniendo consideraciones estéticas y, a menudo, reducciones de la capacidad de resistencia, a veces conduciendo a una parcial o total falla estructural.

Cabrera C. y Beltrán N., (2019), definen a patología del concreto en puentes como el estudio de los orígenes, formas, consecuencias de la obra civil. Las estructuras de concreto pueden sufrir defectos o daños que alteran su estructura interna y su comportamiento, Algunos pueden estar presentes desde su concepción o construcción (patología congénita), otras pueden haberse contraído durante alguna etapa de su vida útil (patología contraída), esta puede darse por el mal uso, por la calidad de los materiales, por las falencias en la construcción que se ven reflejadas a lo largo de su uso, deformaciones presentadas por sobrecarga o lesiones químicas como la eflorescencia en la superficie y otras pueden ser consecuencia de accidentes (patología accidental), como la sobrecarga que este expuesta y que no cumpla el

límite de peso para la que fue diseñada, la falta de mantenimiento y supervisión del estado físico de la estructura.

2.2.12.3.1. Mecanismos de daño

Las patologías o lesiones se pueden clasificar según el estado en el que esta se encuentre, se pueden ocasionar por afectaciones o cambios en el ambiente y en el clima, también se pueden ocasionar por impactos a la estructura, estas patologías siempre presentan características las cuales en un diagnostico se pueden identificar, ya que se pueden clasificar como lesiones químicas, lesiones mecánicas, y lesiones biológicas. (Cabrera C. y Beltrán N., 2019)

Tabla N°18. Mecanismos de Daño

| MECANISMOS DE DAÑO | |
|----------------------------|---|
| ACCIONES MECÁNICAS | <ul style="list-style-type: none"> - Fluencia - Sobrecargas - Impactos - Sobrecargas - Abrasión - Vibraciones |
| ACCIONES FÍSICAS | <ul style="list-style-type: none"> - Cambios volumétricos en estado plástico. - Cambios volumétricos en estado endurecido. |
| ACCIONES BIOLÓGICAS | <ul style="list-style-type: none"> - Contaminación por microorganismos hongos y líquenes. |
| ACCIONES QUÍMICAS | <ul style="list-style-type: none"> - Ataque por ácidos y sulfatos. - Lixiviación por aguas blandas. - Carbonatación. - Reacciones Álcali – agregados. - Corrosión del acero de refuerzo. |

Fuente: Cabrera C. y Beltrán N., 2019

2.2.12.4. Formación y mecanismos manifiestos de las patologías

- **Grietas:** se debe a la deformación provocada por la carga medioambiental o mecánica en una pieza de hormigón reforzado o pre-tensado, y puede tener origen en muchos factores, tales como grietas por deformación de tensión o

compresión; grietas originadas por esfuerzo cortante o torsión; grietas causadas por desplazamiento del hormigón; grietas originadas por contracción; grietas causadas por deformación de longitud térmicas o higroscópicas; grietas provocadas por deficiencia en el posicionamiento de equipo de soporte y detalles en las juntas dentadas. (Tadeu N. y Lenz A. ,2011)

- **Reacciones químicas:** Además de las reacciones químicas necesarias para la hidratación de los componentes del hormigón, que inducen a deformaciones por encogimiento, pueden existir reacciones nocivas tales como reacciones expansivas. Mehta y Monteiro (2008) indicaron que las más comunes de este tipo son: reacción alcalina del agregado, reacción alcalina dolomita, feldespato calcio- sódico, ataque de sulfatos. (Tadeu N. y Lenz A. ,2011)
- **Daño provocado por la colisión de vehículos y fuego:** La colisión de un vehículo contra las estructuras del puente provoca cargas extremas y elevadas difíciles de dimensionar, causando deformación aguda y daños tales como el desprendimiento de la cubierta y la exposición de la barra de acero reforzado. El fuego produce una acción tremendamente nociva, el calentamiento del material produce un aumento del volumen generando enormes esfuerzos internos que provocan deformación del hormigón, grietas y colapso del hormigón. (Tadeu N. y Lenz A. ,2011)

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

- **Estados límites de servicio:** estados límite relacionados con la tensión, la deformación y el agrietamiento en condiciones normales de funcionamiento. (ASSHTO, 2020, p 1-3)
- **Evaluación determinística:** metodología que determina la capacidad estructural de la carga viva de puentes, por medio de factores de carga y su clasificación. (Álvarez, et al., 2014, p 2)
- **Evaluación probabilística:** método que permite la verificación de la seguridad estructural de puentes en servicio, bajo condiciones reales de la estructura que combina resultados experimentales, con el cálculo estructural y simulaciones estadísticas, se busca aproximar la condición de trabajo del puente a la realidad. (Muñoz, et al., 2002, p 3)
- **Factor de capacidad:** son expresiones que son usadas para determinar la capacidad segura de carga, que relacionan la resistencia sobre la sollicitación. (AASHTO, 2013, p 6-28)
- **Factor de carga:** las cargas nominales multiplicadas por los factores de carga apropiados especificados para la combinación de carga bajo consideración. (ASSHTO, 2020, p 1-2)
- **Índice de confiabilidad:** es una medida de la seguridad estructural, que explica el desempeño de una estructura en términos de la probabilidad inversa de la función. (Nowak A., 1999, p 6).
- **Inspección visual:** permite determinar el agrietamiento, corrosión, las deformaciones y las flechas en la estructura del puente. (Guía de inspección de puentes, MTC)

- **Modificador de carga:** un factor que explica la ductilidad, la redundancia y la clasificación operativa del puente. (ASSHTO, 2020, p 1-2)
- **Patología:** Estudio sistemático de daños y fallas que pueden sufrir las estructuras de concreto, analizando sus causas y consecuencias, para poder determinar el mejor método de intervención, que permita recuperar las condiciones de desempeño de la estructura afectada, éstas se identifican mediante una inspección ocular y ciertos determinantes que inciden sobre la estructura. (Cabrera C. y Beltrán N., 2019)
- **Resistencia nominal:** resistencia de un componente o conexión a los efectos de la fuerza, según lo indicado por las dimensiones especificadas en los documentos del diseño y por las tensiones, deformaciones o resistencia especificada de los materiales permisibles. (ASSHTO, 2020, p 1-2)

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

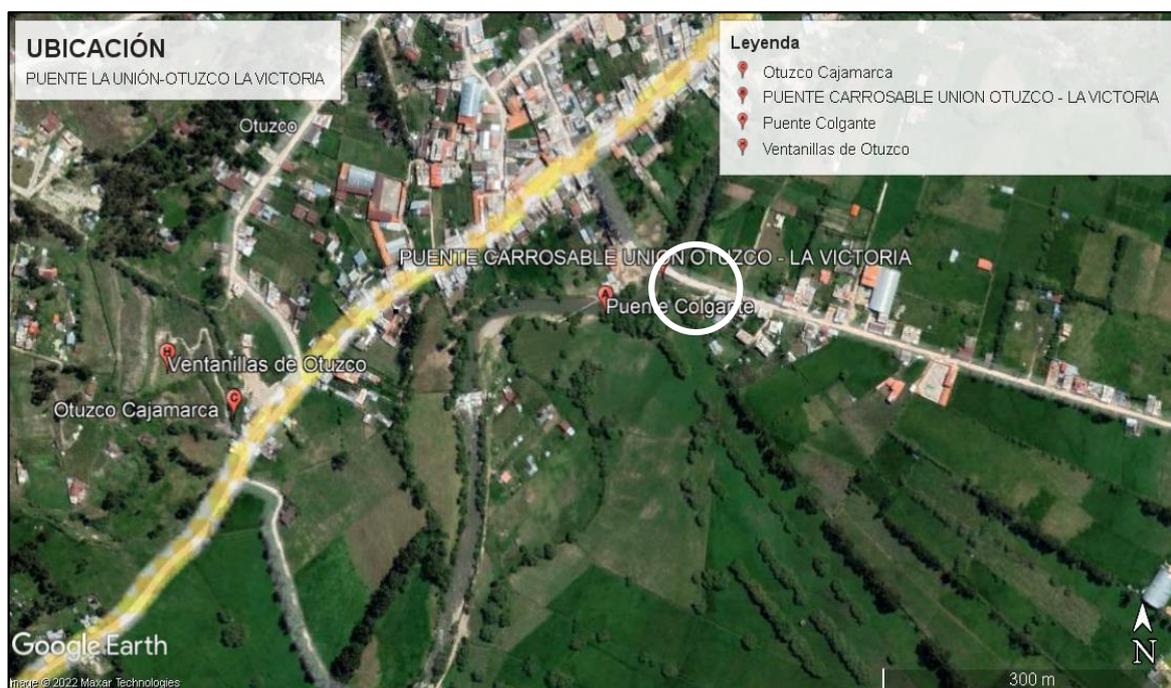
La presente investigación se desarrollará en el puente La Unión - Otuzco La Victoria, ubicado en el caserío la Victoria, Centro Poblado de Otuzco, Distrito Baños del Inca, Provincia de Cajamarca.

Tabla N°19. Coordenadas UTM del puente La Unión – Otuzco La Victoria

| Coordenadas UTM WGS-84 | |
|--------------------------------------|--------------|
| Puente La Unión – Otuzco La Victoria | |
| NORTE | 9'211,994.22 |
| ESTE | 781,581.99 |

Fuente: Elaboración propia

Figura N°16. Vista satelital del puente La Unión – Otuzco La Victoria.



Fuente: Google Earth.

Para una mejor referencia, revisar el ANEXO C. PLANOS.

3.2. ÉPOCA DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación se desarrolló en el transcurso del año 2022. Desarrollando diferentes actividades, tal y como se describe a continuación:

- Junio 2022: se solicitó a la Municipalidad Distrital de Los Baños del Inca información referente al puente como el expediente técnico, además de solicitar el permiso para realizar ensayos no destructivos en la superestructura del Puente.
- Del 11 de junio al 17 de junio del 2022: se realizó por una semana el estudio de tráfico vehicular, para determinar los vehículos que más transitan por este Puente en este periodo de tiempo para los requerimientos de esta investigación.
- 02 de setiembre del 2022: se realizó los ensayos de esclerometría ASTM C805 en los elementos de la superestructura del puente y la corroboración de medidas de las secciones de la viga y losa.
- Octubre – Diciembre: se realizó el desarrollo en general de esta investigación.

3.3. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Según el tipo de la investigación a realizar, el presente estudio corresponde a una investigación **APLICADA**, ya que utilizaremos teorías y normativas referente al diseño, estudio y mantenimiento de puentes. Considerándose para tal un enfoque teórico metodológico Probabilístico y Determinístico.

3.4. NIVEL DE INVESTIGACIÓN

Según el nivel de investigación, presenta un nivel **DESCRIPTIVO** porque describiremos la condición en la que se encuentra el puente La Unión – Otuzco La Victoria.

3.5. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Por el diseño de investigación, el presente estudio reúne las características de una investigación **NO EXPERIMENTAL**. Además, reúne las características de un diseño **TRANSVERSAL**, ya que la recolección de datos es en un determinado tiempo, como es el caso para el conteo de vehículos y cálculo del IMD, o toma de medidas y datos en la inspección visual de la estructura.

3.6. POBLACIÓN DE ESTUDIO

La población de estudio se encuentra constituida por todos los puentes que se encuentran en el distrito de Los Baños del Inca, provincia de Cajamarca.

3.7. MUESTRA

La muestra de estudio, es el puente La Unión - Otuzco La Victoria, ubicado en el caserío la Victoria, Centro Poblado de Otuzco, Distrito Baños del Inca, Provincia de Cajamarca.

3.8. UNIDAD DE ANÁLISIS

La unidad de análisis para este estudio serán los elementos estructurales que conforman la superestructura como la viga principal y losa del puente La Unión - Otuzco La Victoria, ubicado en el caserío la Victoria, Centro Poblado de Otuzco, Distrito Baños del Inca, Provincia de Cajamarca.

3.9. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Para la realización de este estudio fue necesario recopilar la mayor cantidad de información confiable del Puente La Unión – Otuzco La Victoria, para poder determinar su nivel de confiabilidad estando al servicio de la población.

La Municipalidad Distrital de Los Baños del Inca me facilitó el expediente técnico: *“CONSTRUCCION DEL PUENTE CARROZABLE SOBRE EL RIO CHONTA, CASERIO LA VICTORIA DE OTUZCO, CENTRO POBLADO DE OTUZCO, DISTRITO DE LOS BAÑOS DEL INCA, CAJAMARCA - CAJAMARCA”*, el cual complementó al desarrollo de la investigación con los datos de su diseño,

medidas, consideraciones, resistencia y solicitaciones que presentan los elementos estructurales de la superestructura de este puente.

In situ se realizó actividades como es la corroboración de medidas según los datos del expediente técnico antes mencionado, complementándose esta con una evaluación cualitativa basándose en la Guía de inspección para puentes propuesta por el MTC, la que determinó la condición en la que se encuentra la superestructura del puente.

En referencia a los estudios y ensayos considerados para esta investigación, se desarrolló el ensayo no destructivo de Esclerometría ASTM C 805 para determinar la resistencia del concreto en los elementos de su superestructura como lo es la viga principal y la losa, además se realizó el estudio de tráfico vehicular por una semana para identificar los vehículos que más transitan por el puente y así tener las cargas; tanto los datos del ensayo de esclerometría como los del estudio de tráfico fueron necesarios para completar las condiciones del segundo escenario (desempeño actual) propuesto para esta investigación.

Finalmente, con la obtención de los datos anteriores se realizó la modelación de la superestructura de este puente en el software CSI Bridge, con los valores del Momento Flector y Fuerzas Cortantes obtenidos del modelamiento se calculó los índices de confiabilidad con ayuda del Software Microsoft Excel y su extensión Oracle Crystal Ball para determinar los valores estadísticos. Todo este proceso se desarrolló en base a la Normativa Peruana brindada por el MTC (determinación de cargas y solicitaciones) y considerando la Normativa Americana de la ASSHTO LRFD para la determinación de los índices de confiabilidad por las dos metodologías.

Instrumentos: Para el registro de los estudios realizados en campo se utilizó fichas con formatos, wincha para las mediciones, Martillo para prueba de concreto -

esclerómetro para el ensayo de Esclerometría ASTM C805, Equipo de protección personal, Softwares computacionales tanto como los del Microsoft Office y programas de ingeniería como lo es el AutoCAD, CSI Bridge; y, cámara fotográfica para registrar las actividades como parte del sustento de la investigación.

3.10. PROCEDIMIENTO

3.10.1. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

El Puente La Unión – Otuzco La Victoria se encuentra ubicado en el centro poblado de Otuzco, caserío La Victoria, Distrito de Los Baños del Inca, Cajamarca.

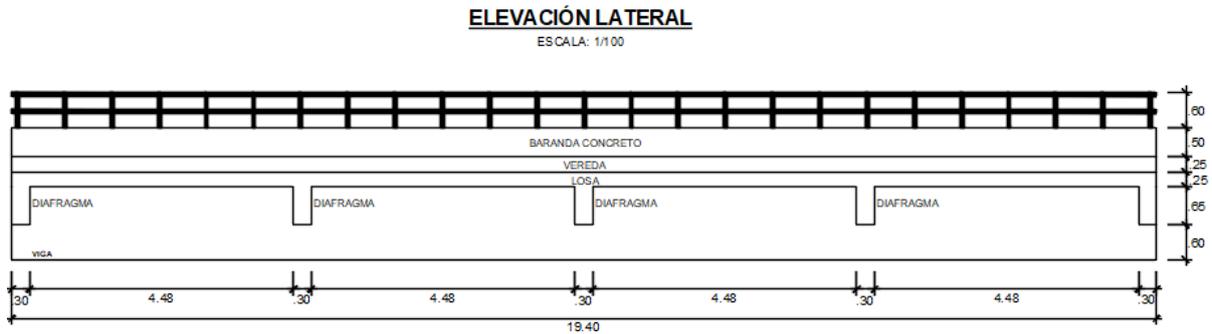
Figura N°17. Vista del puente La Unión – Otuzco La Victoria.



Fuente: Elaboración propia, 2022

El puente La Unión - Otuzco La Victoria es una estructura de 38.90m de longitud total, su superestructura está formada por 02 vigas discontinuas, separadas en dos tramos de 19.40 m y 18.10 m de luz libre cada tramo y una losa de concreto armado con un ancho de 3.60m separada transversalmente por una junta de dilatación; la subestructura contiene 04 aletas de concreto ciclópeo, 02 estribos laterales de concreto armado, 01 pilar central de concreto armado.

Figura N°18. Elevación lateral de un tramo del puente La Unión – Otuzco La Victoria.



Fuente: Expediente técnico

Para más detalle de la estructura se tiene los planos presentados en el ANEXO

C. PLANOS

3.10.2. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DE LOS ELEMENTOS

ESTRUCTURALES DE LA SUPERESTRUCTURA

Las propiedades más importantes del concreto y acero para los elementos de la superestructura del Puente La Unión – Otuzco La Victoria fueron obtenidos del expediente técnico, lo cual es de suma importancia para el modelamiento en el Software que contribuya con su análisis.

De una manera directa, se complementó y/o contrastó la información brindada por el expediente con los datos obtenidos de los ensayos de ESCLEROMETRÍA o Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete ASTM C805 realizados a los elementos estructurales que conforman la superestructura del puente.

3.10.3. GEOMETRÍA DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LA

SUPERESTRUCTURA

Las medidas y detalles de la geometría de los elementos de la superestructura se presentan en los planos adjuntos a esta investigación (ANEXO C. PLANOS),

dichos planos fueron elaborados previa verificación y/o contraste con la información del expediente técnico y las mediciones obtenidas en campo.

3.10.4. RESISTENCIA DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LA SUPERESTRUCTURA

a) Elementos en evaluación:

Se realizará el estudio de los elementos estructurales que conforman la superestructura del puente La Unión – Otuzco La Victoria, como lo es las vigas exteriores y la losa, se seguirá la normativa de la AAHSTO LRFD, 2020.

b) Estado límite de resistencia:

El puente La Unión – Otuzco La Victoria es una estructura tipo viga – losa, por lo que las ecuaciones para su cálculo según la AASHTO LRDF y las citadas anteriormente, son:

Resistencia Nominal a la flexión para Vigas de concreto reforzado:

$$M_n = A_s f_y \left(d_s - \frac{a}{2} \right) + 0.85 f'_c b h_f \left(\frac{a}{2} - \frac{t}{2} \right) \quad (5)$$

Resistencia a Fuerza Cortante Nominal para vigas de concreto reforzado

$$V_c = 0.53 \sqrt{f'_c} b d \quad (15)$$

c) Momento flector y Fuerzas cortantes calculados por el Software CSI

Bridge:

Se realizó el modelamiento de los elementos de la superestructura en el software CSI Bridge V23.3.1., con ayuda de la información presentada en los planos y especificaciones técnicas del expediente técnico (sección geométrica, propiedades físicas). Para el desarrollo de su análisis estructural se asignó las cargas correspondientes según la normativa de la AASHTO. También se crea una envolvente con los vehículos más representativos identificados en el estudio de

tráfico, el cual sirvió para la evaluación de su desempeño actual. Finalmente se calculó el Momento flector y Fuerza cortante correspondiente a cada carga para los elementos de la viga exterior principal y para la losa, así como para la envolvente.

d) Resistencia determinada por el ensayo de Esclerometría ASTM C-805:

Para la evaluación del segundo escenario (desempeño actual), fue necesario realizar ensayos de Esclerometría ASTM C805 en los elementos que estuvieron sometidos a evaluación como son las vigas principales y la losa.

El puente cuenta con 02 vigas principales exteriores no continuas, divididas en 02 tramos de 19.40 m de longitud y 18.10 m de luz libre cada una, haciendo un total de 04 vigas, por lo que para determinar la ubicación de los puntos de ensayos en estas se tomó las medidas de rebote en las caras laterales interiores de las 04 vigas a 0° y se consideró aleatoriamente 02 medidas a -90°, una en la viga 01 para el tramo izquierdo y la otra en la viga 02 para el tramo derecho. Mientras que, para la losa, se realizó 02 ensayos de esclerometría a -90°, uno en cada tramo por la accesibilidad al elemento. Tal y como se puede apreciar en el Anexo C. Planos (Plano EE-01).

- Consideraciones:

Se realizó los ensayos en las caras internas de las vigas principales ubicadas bajo el tablero de la losa, según accesibilidad a esta parte. Otro factor importante es que se realizó los ensayos en áreas donde no se encuentra ninguna área de tarrajeo, además fueron indispensable los planos, para tomar medidas y ubicar los puntos de manera que no choquemos con las áreas de acero, siendo el caso que salga un rebote mayor y por ende una resistencia alta, estos valores serán descartados y proceder a tomar una mejor ubicación para la toma del ensayo.

Otra consideración que se tuvo en cuenta para la ubicación de los puntos de ensayos, en las vigas principales fue que, al ser 02 vigas en cada tramo, y estas cuentan con las mismas características en su sección, longitud, diseño y dosificación,

se podría coger aleatoriamente los ensayos, ya que el diseño es global para el puente.

3.10.5. SOLICITACIONES DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES

3.10.5.1. Asignación de cargas

a) Cargas estáticas:

- Peso Propio de los elementos de concreto armado (DC): 2400 Kg/m^3
- Peso propio de las Barandas (DC): 350 Kg/m
- Carga peatonal (PL): 367 Kg/m^2

b) Cargas móviles:

- **Escenario 01 - Cargas de diseño según su expediente técnico:**

Según la memoria de cálculo estructural adjunta en el expediente técnico del puente, se ha utilizado la carga vehicular tipo HL-93.

- **Escenario 02 - Desempeño actual:**

Se realizó el estudio de tráfico del puente La Unión – Otuzco La Victoria por una semana, para determinar los vehículos representativos que transitan para este periodo de investigación, no tomando en cuenta los casos excepcionales como que haya podido pasar un vehículo más pesado al de su diseño.

3.10.5.2. Modelo y análisis estructural

Se realizó el modelamiento de la superestructura del Puente La Unión – Otuzco La Victoria en el Software CSI Bridge, con el fin de obtener los valores de los momentos flectores y fuerzas cortantes de los elementos viga y losa de la superestructura del puente.

- La superestructura de este puente se evaluó en dos escenarios. El primer escenario se utilizó los datos del expediente técnico como son las propiedades físicas del concreto y acero, además de considerarse el vehículo de diseño HL-

93; mientras que el segundo escenario, fue para la evaluación de su desempeño actual, en el cual se consideró la resistencia del concreto obtenida mediante el ensayo de esclerometría, para las propiedades del acero se consideró las del expediente técnico, y para las cargas vehiculares, se realizó un estudio de tráfico el cual nos determinó los vehículos más representativos para el periodo de estudio.

3.10.6. ÍNDICE DE CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL

3.10.6.1. Modelos de carga

a) Parámetros estadísticos de cargas estáticas:

Paramétricos obtenidos de los estudios propuestos por Nowak y Collins (2000), los mismo que son utilizados para la evaluación AASHTO (2020), considerando los siguientes valores:

Tabla N°20. Parámetros estadísticos para cargas estáticas

| Componente | V. nominal | Distribución | Factor Bias | Coefficiente de variación |
|------------------------|------------------------|--------------|-------------|---------------------------|
| Concreto hecho in situ | 2400 Kg/m ³ | Normal | 1.05 | 0.10 |
| Otros elementos | 350 Kg/m | Normal | 1.05 | 0.10 |
| Carga peatonal | 367 Kg/m ² | Lognormal | 1.00 | 0.18 |

Fuente: Nowak y Collins (2000),

b) Parámetros estadísticos de carga móvil

Venegas y Chio (2014) recomienda realizar un estudio de tráfico, para poder determinar los vehículos que transitan por dicha estructura. Cumpliendo con esta recomendación se identificó los vehículos más representativos tras el estudio de tráfico presentado en las Tabla N°27 y 28, además de presentar las características propias de estos vehículos como la distribución de ejes y cargas, los mismos que se han obtenido del Reglamento Nacional de Vehículos (2003), tal y como se observa en la Tabla N°29.

Escenario 01 - Evaluación según consideraciones del expediente técnico: diseñado con el vehículo de diseño HL-93, considerándose para este los siguientes valores estadísticos:

- **Distribución de probabilidad:** Lognormal
- **Factor Bias (λ):** 1.20
- **Coefficiente de variación (CV):** 18%

Escenario 02 - Evaluación de su desempeño actual: Se considerará los vehículos que más transitan por esta estructura para este periodo de investigación tras haber realizado el estudio de tráfico. Ahora, para los parámetros estadísticos en referencia al periodo de análisis y tipo de estructura, según Nowak A. (1993), estos se obtienen de la interpolación de las figuras presentadas en el ítem 2.2.8.3. Cargas vivas móviles y cargas de impacto, Figura N°5 y N°6.

Tabla N°21. Parámetros estadísticos seleccionados para cargas móviles

| Puente | Periodo | Longitud (m) | Distribución probabilidad | Factor Bias (λ) | C.V. (%) |
|----------------------------------|----------------|-------------------------|--------------------------------------|---|---------------------|
| La Unión – Otuzco La Victoria | 8 años | 38.90 | Lognormal | 1.96 | 0.119 |

Fuente: Elaboración propia

c) Funciones de probabilidad de carga

Se tiene en consideración la teoría propuesta por Nowak A y Collins K, (2000), teniendo las siguientes relaciones:

$$\mu = \lambda * S \quad (45)$$

$$\sigma = C.V.* \mu \quad (46)$$

Donde:

- S : Valor nominal obtenido del Análisis estructural.
- λ : Factor bias considerado para el análisis.
- $C.V.$: Coeficiente de variación considerado para el análisis.
- μ : Media de la función de probabilidad.
- σ : Desviación estándar de la función de probabilidad.

Teniendo la distribución de probabilidad y la formación de las funciones mediante los parámetros estadísticos (media y desviación estándar), teniendo base de ayuda el software Crystal Ball.

d) Modelo de matemático de carga

Para la función de probabilidad de Solicitación o Carga, Hyo – Kim. Et al. (2016), propone la suma de todas las variables que intervienen en esta función, tal y como se presenta a continuación:

$$p(D_i, LL, \dots) = DC + DW + PL + LL + IM \quad (47)$$

Donde:

- $p(S)$: probabilidad de solicitudes o cargas.
- DC : probabilidad debida al peso propio de elementos estructurales.
- DW : probabilidad debido al peso de la superficie de rodadura.
- PL : probabilidad debido a la carga peatonal.

- *LL*: probabilidad debido a la carga Viva.
- *IM*: probabilidad debido a la carga de Impacto.

3.10.6.2. Modelo de resistencia

a) Parámetros estadísticos para las propiedades mecánicas

Escenario 01 - Evaluación según consideraciones del expediente técnico: sugeridos por Nowak y Collins (2000):

Tabla N°22. Parámetros estadísticos de Resistencia Nominal

| Tipo de estructura | Resistencia | |
|--------------------|-------------|-------|
| | λ | C.V. |
| Concreto reforzado | | |
| Momento | 1.14 | 0.13 |
| Cortante | 1.20 | 0.155 |

Fuente: Nowak A., 1999

Escenario 02 - Evaluación de su desempeño actual: se consideró los siguientes parámetros estadísticos de acuerdo a los componentes del puente en evaluación:

- **Ensayo de esclerometría: Estadísticos del concreto**

Tabla N°23. Parámetros estadísticos de las propiedades mecánicas

| MATERIAL | DISTRIBUCIÓN | FACTOR BIAS | COEFICIENTE DE VARIACIÓN |
|-------------------|--------------|---|--|
| Concreto | Normal | $\frac{f'_{C_{esclerometro}}}{f'_{C_{diseño}}}$ | $\frac{f'_{C_{desv}}}{f'_{C_{media}}}$ |
| Acero de Refuerzo | normal | 1.12 | 0.11 |

Fuente: Silva J., 2018

b) Funciones de probabilidad de Resistencia

Escenario 01 – Evaluación según consideraciones del expediente técnico: para determinar este modelo probabilístico, Nowak A. y Collins R., (2000) sugieren que, teniendo los valores presentados en la sección anterior, se tiene las siguientes expresiones:

$$\mu = \lambda * Rn \quad (48)$$

$$\sigma = C.V.*\mu \quad (49)$$

Donde:

- Rn : Valor de la Resistencia Nominal
- λ : Factor bias considerado para el análisis
- $C.V$: Coeficiente de variación considerado para el análisis
- μ : Media de la función de probabilidad.
- σ : Desviación estándar de la función de probabilidad.

c) Funciones que han sido desarrolladas con ayuda del Software Crystal Ball.

Escenario 02 - Evaluación de su desempeño actual: Según lo citado por Silva J., 2018 en su tesis de pregrado, Muñoz et al (2002) plantea que el modelo resistente consta en operar la expresión resistente con sus parámetros estadísticos, tal y como:

- Resistencia Nominal (Rn): su expresión matemática se va a basar según el tipo de elemento estructural y lo expuesto en los anteriores ítems.
- Dimensiones presentadas en los planos del expediente técnico.
- Propiedades mecánicas: valores estadísticos presentados en la Tabla N°23.

La metodología utilizada en el análisis de confiabilidad de la estructura es el Método de Simulación de Montecarlo, requiriendo del apoyo del Software Crystall Ball.

3.10.7. ÍNDICE DE CAPACIDAD ESTRUCTURAL

Procedimiento basado en la normativa de la AASHTO, Manual Evaluation of Bridge (2013), el cuál presenta los siguientes requerimientos:

3.10.7.1. Análisis de carga:

Para el análisis de la superestructura del puente se considerará las mismas cargas utilizadas para el método de confiabilidad estructural, tomando como referencia la AASHTO (2013), las que son presentadas a continuación:

- Carga muerta de los elementos estructurales parte de la superestructura (DC)
- Carga Peatonal (PL)
- Carga viva y de impacto (LL y IM)

Posteriormente se realizará el análisis en el Software CSI Bridge.

3.10.7.2. Capacidad estructural (C)

La capacidad estructural de la superestructura del puente está definida por las ecuaciones matemáticas presentadas en la sección 3.11.4.

3.10.7.3. Factores de Carga (Υ)

Para determinar los factores de carga empleados en este análisis se ha seguido las restricciones del Manual de evaluación de Puentes (MBE), AASHTO 2013, los mismos que han sido expuestos en las secciones anteriores (Tabla N°10, Tabla N°11 y Tabla N°12).

3.10.7.4. Factores de Resistencia (φ)

- Factor de sistema (φ_s): complejidad del sistema estructural del puente.
- Factor de condición (φ_c): de acuerdo a las especificaciones técnicas presentadas en el expediente técnico y los datos obtenidos tras el ensayo de esclerometría.
- Factor de carga (φ): de acuerdo al tipo de elemento y condiciones de fuerza que requiera dicha estructura. (AASHTO, 2020)

3.10.7.5. Análisis de capacidad estructural (RF)

Para determinar el índice de capacidad estructural, fue necesario relacionar diferentes variables como la capacidad resistente, cargas y factores para cumplir con los requerimientos de este parámetro. (Silva J.,2018) teoría avalada por el MBE de la AASHTO (2013), referenciando la ecuación 45.

$$RF = \frac{C - (\gamma_{DC})(DC) - (\gamma_{DW})(DW) \pm (\gamma_P)(P)}{(\gamma_{LL})(LL + IM)} \quad (50)$$

3.10.8. ÍNDICE DE CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL

Para determinar el índice de confiabilidad estructural como un sistema estructural fue necesario seguir las siguientes consideraciones: (Silva J.,2018)

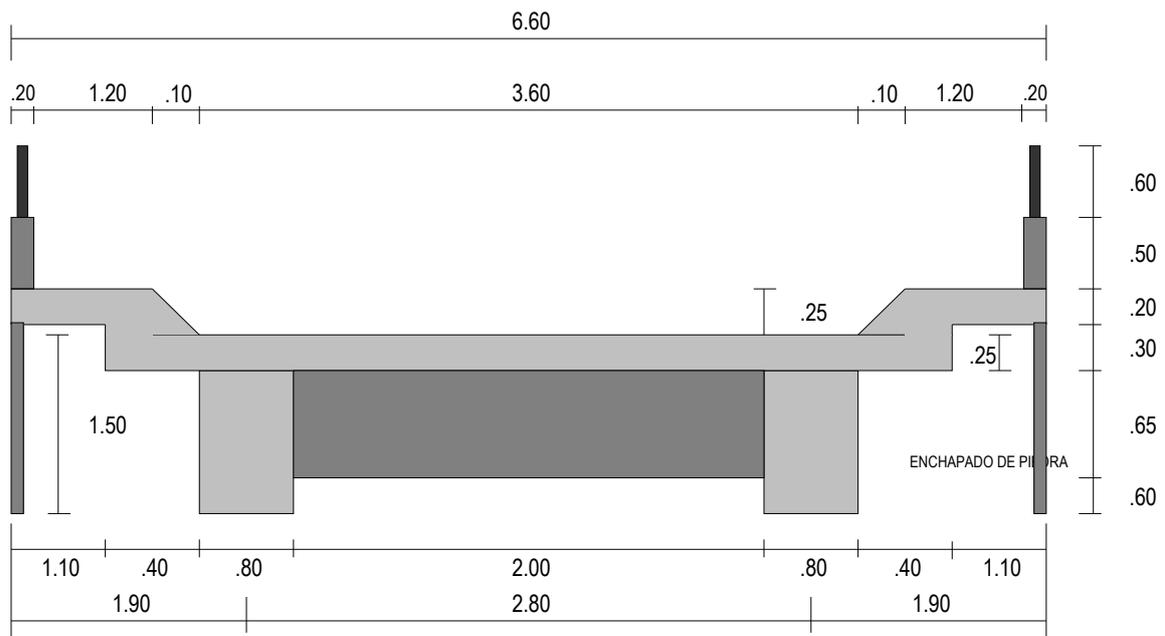
- Definir el sistema estructural (paralelo o serie).
- Calculo de probabilidad de falla de la estructura.
- Calculo de la inversa de la distribución, para obtener el índice de confiabilidad del sistema.
- Se obtuvo un promedio de valores de los elementos de la superestructura (vigas y losa), para representar una seguridad media del sistema.

3.11. RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

3.11.1. GEOMETRÍA DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LA SUPERESTRUCTURA

El Puente La Unión – Otuzco La Victoria, es un puente viga losa de concreto armado, simplemente apoyado de 02 tramos (01 apoyo móvil y 01 apoyo fijo), con veredas y barandas de protección, no presenta calzada en voladizo. La geometría y propiedades propias de los elementos que conforman la superestructura de este puente se presentan a continuación, los mismos que fueron extraídos de manera indirecta del expediente técnico.

Figura N°19. Sección transversal del puente La Unión – Otuzco La Victoria.



Fuente: Expediente técnico

Tabla N°24. Datos generales del puente La Unión – Otuzco La Victoria.

| Descripción / Elemento | Cantidad | Dimensiones |
|---|----------|-------------|
| LOSA | | |
| Número de vías (N) | 01 | |
| Luz libre (L) | | 18.20 m |
| Espesor de losa (e) | | 0.25 m |
| Espesor de asfalto (ef) | | 0.00 m |
| Luz libre entre vigas (S) | | 2.00 m |
| Recubrimiento superior (rs) | | 5.00 cm |
| Recubrimiento inferior (ri) | | 3.00 cm |
| VIGA | | |
| Número de vigas | 02 | |
| Luz de cálculo (L=L´+c) | | 18.80 m |
| Peralte de la viga (h) | | 1.50 m |
| Ancho del alma de la viga T (b) | | 0.80 m |
| Ancho del patín de la viga T (b´) | | 2.20 m |
| Recubrimiento medido al estribo (r) | | 5.00 m |
| Separación entre capas de acero (sc) | | 4.00 cm |
| Luz libre entre vigas (S) | | 2.00 m |
| Distancia entre ejes de viga (S´) | | 2.80 m |

Fuente: Elaboración propia

De manera conjunta se corroboró la geometría y dimensiones de los elementos de la superestructura presentadas en el expediente técnico con los datos obtenidos en campo, para esto se realizó la toma de medidas de los elementos de la superestructura del puente La Unión – Otuzco La Victoria, información que será útil para su revisión, comparación y desarrollo de los planos (VER ANEXO C. PLANOS); los mismos que servirán como referencia para más adelante realizar el modelamiento y análisis en el software de la estructura.

3.11.2. RESISTENCIA DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LA SUPERESTRUCTURA

Escenario 01 - Evaluación según consideraciones del expediente técnico:

Las resistencias de los materiales de construcción de los elementos estructurales de la superestructura fueron obtenidas directamente de la memoria de cálculo estructural del expediente técnico de la estructura, presentando a continuación la resistencia utilizada para su diseño y construcción.

Tabla N°25. Resistencia de diseño de los elementos de la superestructura del puente La Unión – Otuzco La Victoria

| Elemento | F'c (kg/cm ²) | Fy (kg/cm ²) | Recubrimiento (cm) |
|--|------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| Viga | 210 | 4200 | 5.00 |
| Losa | 210 | 4200 | Sup = 5.00, Inf = 3.00 |
| Diafragma | 210 | 4200 | 3.00 |
| Baranda | 210 | 4200 | 3.00 |
| Vereda | 210 | 4200 | 3.00 |
| Calzada de puente sin carpeta asfáltica | | | |

Fuente: Expediente técnico

Escenario 02 - Evaluación de su desempeño actual:

Los datos obtenidos mediante el ensayo de esclerometría ASTM C805, se presentan en la Tabla N°26, en la cual, para escoger un único valor de resistencia del concreto, hemos sacado el promedio de los 06 valores obtenidos de los 06 ensayos realizados en total para las 04 vigas principales, aseverando los resultados de la resistencia obtenida con el cálculo de la desviación estándar que no sea muy alto, que sirve como indicador para saber que nuestras lecturas no se encuentran muy dispersas. Realizándose el mismo procedimiento para los 02 ensayos tomados para la losa.

Tabla N°26. Resistencia de los elementos estructurales obtenidos mediante el ensayo de Esclerometría ASTM C805

| Elemento de la estructura | α | f'_c | f'_c | Promedio | |
|---|----------|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------|
| | | requerida (Kg/cm ²) | obtenida (Kg/cm ²) | f'_c (Kg/cm ²) | σ |
| E4: Viga principal 02 lado derecho | 0 | 210 | 190 | | |
| E7: Viga principal 01 lado derecho | 0 | 210 | 210 | | |
| E9: Viga principal 02 lado derecho | -90 | 210 | 198 | | |
| E14: Viga principal 02 lado izquierdo | 0 | 210 | 238 | 216 | 4.00 |
| E16: Viga principal 01 lado izquierdo | 0 | 210 | 220 | | |
| E17: Viga principal 01 Lado izquierdo | -90 | 210 | 238 | | |
| E6: Losa lado derecho | -90 | 210 | 210 | | |
| E15: Losa lado izquierdo | -90 | 210 | 220 | 215 | 7.07 |

Fuente: Elaboración propia

Las especificaciones técnicas del acero de los elementos estructurales de la superestructura fueron tomadas de los planos del expediente técnico, como se pueden observar en los planos adjuntos. (VER ANEXO C. PLANOS)

3.11.3. ESTUDIO DE TRÁFICO

Escenario 02 - Evaluación de su desempeño actual:

Se realizó el estudio de tráfico, tomando como punto de estación el Puente La Unión – Otuzco La Victoria, con la finalidad de determinar los tipos de vehículos representativos que transitan por este puente para el periodo de estudio, el cuál fue del 11 de junio al 17 de junio del 2022.

A continuación, se presenta las siguientes tablas, en las que se resume la cantidad de vehículos promedio que transitan por el puente en ambos sentidos, expresados estos resultados en cifras absolutas y relativas (Tabla N°27, 28). Además de las cargas de los vehículos más representativos e incidentes de la zona (Tabla N°29).

Se hace de conocimiento que, para la siguiente investigación, se ha tomado los vehículos más representativos para el periodo de estudio, obviando el tráfico de vehículos pesados que excepcionalmente pasan por la estructura.

TABLA N°27. Clasificación y cantidad de vehículos promedio que transitan por el puente La Unión – Otuzco La Victoria.

| CLASIFICACIÓN | TIPO DE VEHICULO | TOTAL | % PROM. |
|----------------------|-------------------------|--------------|----------------|
| | Motos | 108 | 46.96% |
| Transporte ligero | Autos | 62 | 39.31% |
| | Pick Up | 30 | |
| | Bus 2E | 3 | 6.77% |
| Transporte de carga | Combi | 12 | 6.96% |
| | C2 | 11 | |
| | C3 | 5 | |
| TOTAL | | 232 | 100.00% |

Fuente: Elaboración propia (datos tomados del 11/06/22 al 17/06/22)

Tabla N°28. Clasificación y cantidad de vehículos que transitan por el puente La Unión – Otuzco La Victoria.

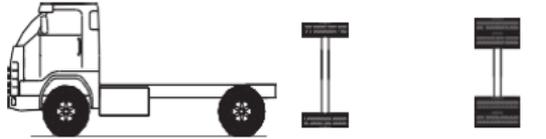
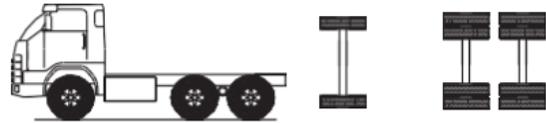
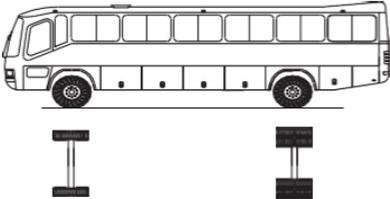
| CLASIFICACIÓN | TIPO DE VEHICULO | TOTAL | CARGA MÍN. | CARGA MÁX. |
|----------------------|-------------------------|--------------|-------------------|-------------------|
| Transporte ligero | Motos | 759 | 0.20 Tn | 0.38 Tn |
| | Autos | 436 | 1.035 Tn | 1.2 Tn |
| | Pick Up | 208 | 1.995 Tn | 2.71 Tn |
| | Bus 2E | 23 | 7.490 Tn | 18 Tn |
| Transporte de carga | Combi | 87 | 2.65 Tn | 3.3 Tn |
| | C2 | 78 | 6.2 Tn | 18 Tn |
| | C3 | 32 | 9.5 Tn | 25 Tn |

Fuente: Elaboración propia (datos tomados del 11/06/22 al 17/06/22)

El estudio de tráfico realizado en este puente se puede observar a detalle en el ANEXO B. ESTUDIO DE TRÁFICO. Finalmente, se está complementando la información recolectada de manera directa de los vehículos que han sido registrados en el estudio de tráfico según su incidencia en la zona para este periodo de evaluación, se muestra a continuación los pesos y medidas máximas permitidas de los vehículos C2, C3 Y B2, según el Reglamento Nacional de Vehículos – Decreto supremo N°058-2003-MTC, Anexo IV. Pesos y medidas.

Para los diferentes escenarios de carga, se ha tenido las siguientes consideraciones: para la evaluación a nivel de su expediente técnico se ha utilizado el vehículo de diseño HL-93 de la AASHTO LRFD, y para la evaluación de su desempeño actual se utilizará los vehículos presentados en la Tabla N°29.

Tabla N°29. Tabla de pesos y medidas de los vehículos que transitan por el puente La Unión - Otuzco La Victoria

| TABLA DE PESOS Y MEDIDAS | | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------------------|------------|---|----------------|-----------------|------------------------------|---|---|---------------------|----|
| N° | Config. Vehicular | N° de ejes | Descripción gráfica de los vehículos | Long. Máx. (m) | Peso mínimo (T) | | | | Peso bruto máx. (T) | |
| | | | | | Eje delant. | Conjunto de ejes posteriores | | | | |
| | | | | | | 1 | 2 | 3 | | 4 |
| 01 | C2 | 2 |  | 12.30 | 7 | 11 | | | | 18 |
| 02 | C3 | 3 |  | 13.20 | 7 | 18 | | | | 25 |
| 03 | B2 | 20 |  | 14 | 7 | 11 | | | | 18 |

Fuente: Reglamento Nacional de Vehículos – Decreto supremo N°058-2003-MTC, Anexo IV. Pesos y medidas

3.12. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS:

3.12.1. RESISTENCIA DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES

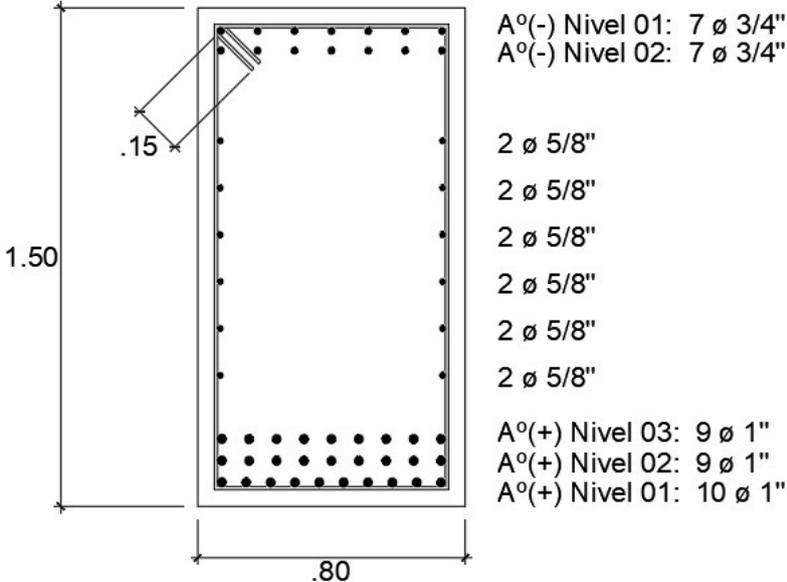
Para la evaluación de los elementos estructurales que forman parte de la superestructura del puente se ha considerado la evaluación de la viga y la losa (Figura N°20 y N°21), calculando también los Momentos flectores y fuerzas cortantes Nominales con las ecuaciones (5) y (15) presentadas en el ítem 3.11.4. (b), valores que son presentados en la Tabla N°30.

Tabla N°30. Momentos (M_n) y Cortes (V_n) Nominales resistentes

| ELEMENTO | VIGA EXTERIOR | LOSA |
|----------------------|---------------|-----------|
| M_n (Exp. técnico) | 598.87 Tn-m | 6.55 Tn-m |
| M_n (Actual) | 594.50Tn-m | 6.55 Tn-m |
| V_n (Exp. técnico) | 83.85 Tn | 14.75 Tn |
| V_n (Actual) | 85.04 Tn | 14.93 Tn |

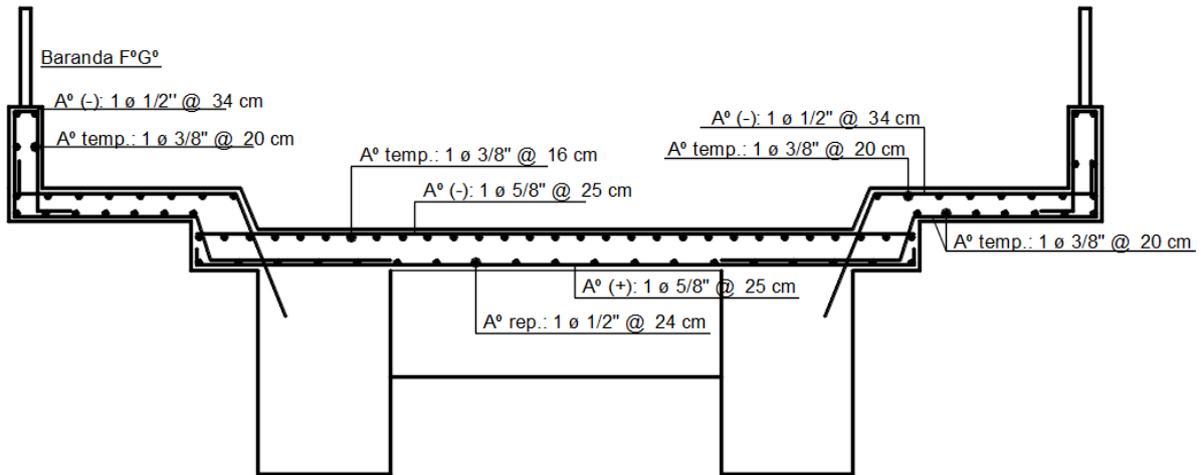
Fuente: Elaboración propia

Figura N°20. Vista transversal viga principal



Fuente: Expediente técnico

Figura N°21. Vista transversal losa - vereda

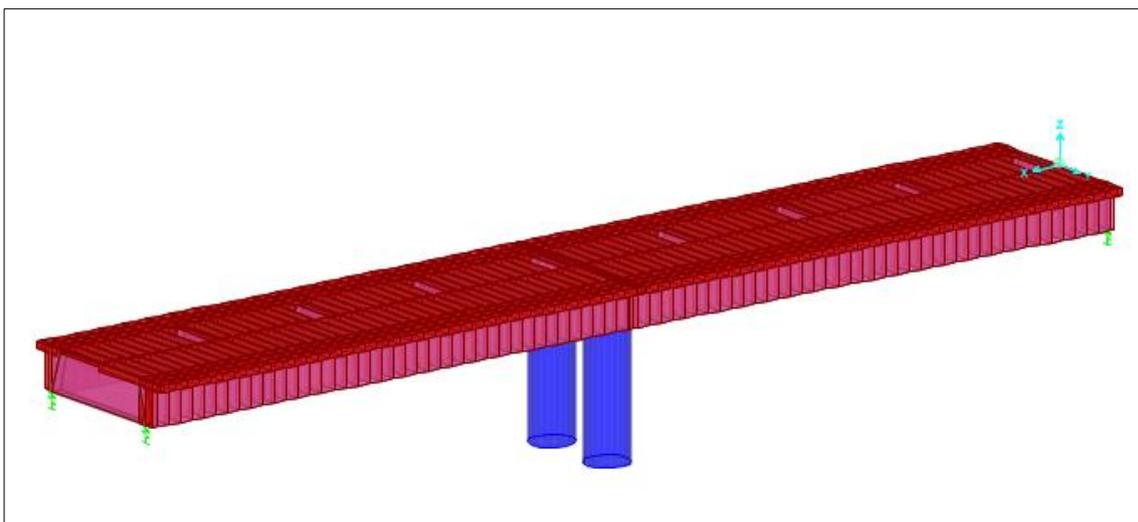


Fuente: Expediente técnico

3.12.2. MODELO Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE SOLICITACIONES

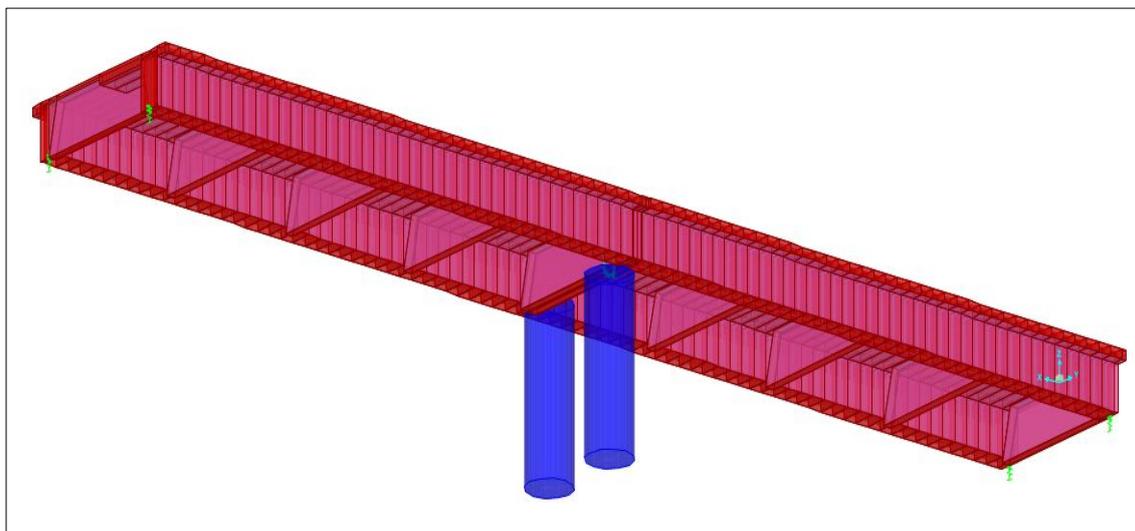
Se realizó en modelamiento en el programa CSI bridge v23.3.1, con la información presentada en los ítems 3.12.1, además de los planos adjuntos en el ANEXO C. PLANOS. A continuación, se presenta el modelado de la superestructura, la cual consta de 2564 Shell elements para su análisis.

Figura N°22. Modelamiento de elementos finitos de la superestructura del puente La Unión – Otuzco La Victoria (losa).



Fuente: Elaboración propia, Software CSI Bridge.

Figura N°23. Modelamiento de elementos finitos de la superestructura del puente La Unión – Otuzco La Victoria (vigas exteriores).



Fuente: Elaboración propia, Software CSI Bridge.

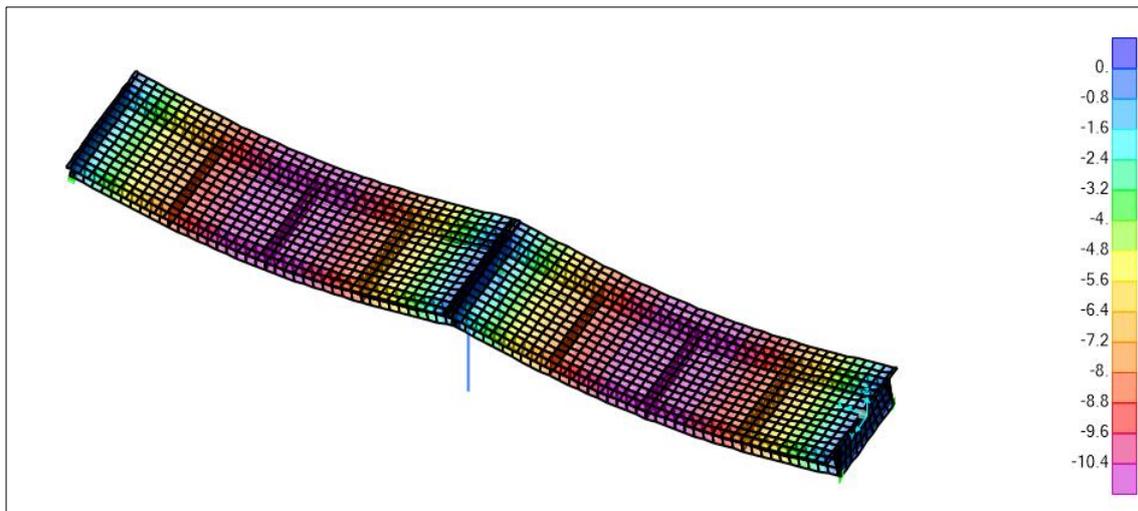
Se realizó el análisis estructural de la superestructura del puente con las solicitaciones presentadas en la sección 3.11.5, resultados que se presentan en la Figura N°24 (Unidad $Tn\text{-}mm$), y tabla N°31, el cual resume la información de los momentos resultantes y cortantes para cada solicitación.

Tabla N°31. Valores obtenidos del análisis estructural

| Tipo | Valor de metrado | Momento Flector ($Tn\text{-}m$) | | Fuerza Cortante (Tn) | |
|---|---------------------|--------------------------------------|----------------------|-----------------------------|------|
| | | Viga exterior | Losa | Viga exterior | Losa |
| | | Carga Muerta (DC) | $2400\text{ kg}/m^3$ | 236.94 | 1.07 |
| Baranda (DC) | $350\text{ kg}/m$ | 16.12 | 0.06 | 3.33 | 0.36 |
| Carga peatonal (PL) | $367\text{ kg}/m^2$ | 9.60 | 0.24 | 2.68 | 0.26 |
| Carga viva (LL+IM) <i>E.T.</i> | HL – 93 | 202.41 | 2.33 | 47.59 | 8.76 |
| Carga viva (LL+IM) <i>Des.actual</i> | B2, C2, C3 | 130.42 | 1.56 | 31.19 | 6.47 |

Fuente: Elaboración propia, Software CSI Bridge.

Figura N°24. Efectos de cargas actuantes en la superestructura del puente.



Fuente: Elaboración propia, Software CSI Bridge.

3.12.3. ÍNDICE DE CONFIABILIDAD

a) Modelo de resistencia (R)

Evaluación según consideraciones del expediente técnico: las variables estadísticas empleadas para esta evaluación son las referenciadas de la obtención de los valores de resistencia nominal con el factor MFP para los elementos viga y losa de la superestructura del puente, presentándose en la Tabla N°32.

Tabla N°32. Valores nominales para la Resistencia – Expediente técnico

| Variables | Elemento | Nominal | Dist. | Media (μ) | Estándar (σ) |
|--|----------|----------------|--------|--------------------|--------------------------|
| Momento Flector (Tn-m) $\lambda = 1.14, CV = 0.13$ | Vigas | $M_n = 598.87$ | Normal | 682.71 | 88.75 |
| | Losa | $M_n = 6.55$ | Normal | 7.47 | 0.97 |
| Fuerza Cortante (Tn) $\lambda = 1.20, CV = 0.155$ | Vigas | $V_n = 83.85$ | Normal | 100.62 | 15.60 |
| | Losa | $V_n = 14.75$ | Normal | 17.70 | 2.74 |

Parámetros estadísticos de Resistencia Nominal R_n obtenidos de la Tabla N°22.

Donde λ : factor bias, CV: coeficiente de variación.

Evaluación desempeño actual: las variables estadísticas empleadas para esta evaluación son las que se presentan a continuación en la tabla N°33.

Tabla N°33. Parámetros estadísticos para la resistencia – desempeño actual

| Variables | Elemento Estructural | | | | | | | |
|--------------------------------|----------------------|------------------|------|------|------------------|---------------|------|--|
| | Estadísticos | Vigas | | | | Losa | | |
| Dimensiones | Nominal | Ver geometría | | | | Ver geometría | | |
| Acero de Refuerzo | Nominal | (Figura N°18) | | | | (Figura N°17) | | |
| $f'c$ (kg/cm ²) | (N; λ ; CV) | (N; 1.12, 0.04) | 216 | 8.64 | (N; 1.13; 0.04) | 215 | 8.60 | |
| $f'y$ (kg/cm ²) | (N; λ ; CV) | (N; 1.11; 0.098) | 4200 | 462 | (N; 1.11; 0.098) | 4200 | 462 | |

Parámetros estadísticos para la resistencia del concreto y acero obtenidos de la Tabla N°2 y N°3. Donde N: función de distribución Normal, λ : factor bias.

b) Modelo de Solicitación (S)

Tabla N°34. Variables de sollicitación (S) – Viga Exterior

| Carga | Estadísticos | Momento Flector (Tn-m) | | | Fuerza Cortante (Tn-m) | | | |
|--------------------------|------------------------|---------------------------|---------------|------------|---------------------------|---------------|------------|--|
| | | F.P | $\bar{\mu}_M$ | σ_M | F.P | $\bar{\mu}_V$ | σ_V | |
| Viga Exterior | | | | | | | | |
| Carga Muerta | $\lambda=1.05$ CV=0.10 | N | 248.79 | 24.88 | N | 52.98 | 5.30 | |
| Peso Baranda | $\lambda=1.05$ CV=0.10 | N | 16.93 | 1.69 | N | 3.50 | 0.35 | |
| Carga Peatonal | $\lambda=1.00$ CV=0.18 | LN | 9.60 | 1.73 | LN | 2.68 | 0.48 | |
| Carga viva (E.T.) | $\lambda=1.20$ CV=0.18 | LN | 242.90 | 43.72 | LN | 57.11 | 10.28 | |
| Carga viva (Des. Actual) | $\lambda=1.96$ CV=0.12 | LN | 255.63 | 30.42 | LN | 61.13 | 7.27 | |

Donde F.P.: función probabilística, N: función de distribución Normal, LN: función de distribución LogNormal, λ : factor bias, CV: coeficiente de variación.

Tabla N°35. Variables de sollicitación (S) – Losa

| Carga | Estadísticos | | Momento Flector (Tn-m) | | | Fuerza Cortante (Tn-m) | | |
|--------------------------|----------------|---------|---------------------------|---------------|------------|---------------------------|---------------|------------|
| | | | F.P | $\bar{\mu}_M$ | σ_M | F.P | $\bar{\mu}_V$ | σ_V |
| Losa | | | | | | | | |
| Carga Muerta | $\lambda=1.05$ | CV=0.10 | N | 1.13 | 0.11 | N | 0.95 | 0.09 |
| Peso Baranda | $\lambda=1.05$ | CV=0.10 | N | 0.06 | 0.01 | N | 0.38 | 0.04 |
| Carga Peatonal | $\lambda=1.00$ | CV=0.18 | LN | 0.24 | 0.04 | LN | 0.26 | 0.05 |
| Carga viva (E.T.) | $\lambda=1.20$ | CV=0.18 | LN | 2.79 | 0.50 | LN | 10.52 | 1.89 |
| Carga viva (Des. Actual) | $\lambda=1.96$ | CV=0.12 | LN | 3.06 | 0.36 | LN | 12.69 | 1.51 |

Donde F.P.: función probabilística, N: función de distribución Normal, LN: función de distribución LogNormal, λ : factor bias, CV: coeficiente de variación.

c) Análisis de confiabilidad

La evaluación a nivel del expediente técnico de la estructura se realizó mediante la Simulación de Monte Carlo, utilizando los valores de la tabla N°34 y 35, además de utilizar la ecuación (45) y (46), mientras que para la evaluación de su desempeño actual se emplearon los valores de la tabla N°36 y las ecuaciones antes mencionadas, de las cuáles se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla N°36. Valores estadísticos de Solicitación (S).

| Elemento estructural | Tipo de Evaluación | Estadísticos de Solicitación (S) | |
|---|--------------------|----------------------------------|---------------------------|
| | | $\mu(\text{media})$ | $\sigma(\text{des, Est})$ |
| Evaluación para Momento Flector (Tn-m) | | | |
| Viga Exterior | Expediente Técnico | 517.85 | 50.28 |
| | Desempeño actual | 530.73 | 39.54 |
| Losa | Expediente Técnico | 4.21 | 0.51 |
| | Desempeño actual | 4.49 | 0.38 |
| Evaluación para Fuerza Cortante (Tn) | | | |
| Viga Exterior | Expediente Técnico | 63.25 | 10.34 |
| | Desempeño actual | 67.29 | 7.36 |
| Losa | Expediente Técnico | 11.13 | 2.15 |
| | Desempeño actual | 13.32 | 1.82 |

Tabla N°37. Valores estadísticos de Resistencia (R).

| Elemento estructural | Tipo de Evaluación | Estadísticos de Resistencia (R) | |
|---|--------------------|---------------------------------|---------------------------|
| | | $\mu(\text{media})$ | $\sigma(\text{des, Est})$ |
| Evaluación para Momento Flector (Tn-m) | | | |
| Viga Exterior | Expediente Técnico | 682.60 | 89.51 |
| | Desempeño actual | 685.39 | 92.92 |
| Losa | Expediente Técnico | 7.47 | 0.97 |
| | Desempeño actual | 7.34 | 0.81 |
| Evaluación para Fuerza Cortante (Tn) | | | |
| Viga Exterior | Expediente Técnico | 100.65 | 15.55 |
| | Desempeño actual | 85.01 | 1.69 |
| Losa | Expediente Técnico | 17.7 | 2.74 |
| | Desempeño actual | 14.93 | 0.30 |

Fuente: Software Oracle Crystal ball.

Tabla N°38. Valores estadísticos de índices de seguridad (M).

| Elemento estructural | Tipo de Evaluación | Índices de seguridad (M) | | | |
|---|--------------------|--------------------------|---------------------------|----------------|------------------|
| | | $\mu(\text{media})$ | $\sigma(\text{des, Est})$ | Índice β | P_f |
| Evaluación para Momento Flector (Tn-m) | | | | | |
| Viga | Expediente Técnico | 164.75 | 102.96 | 1.60 | $5.44 (10^{-2})$ |
| Exterior | Desempeño actual | 154.66 | 101.02 | 1.53 | $6.37 (10^{-2})$ |
| Losa | Expediente Técnico | 3.25 | 1.10 | 2.97 | $1.50 (10^{-3})$ |
| | Desempeño actual | 2.86 | 0.89 | 3.20 | $6.87 (10^{-4})$ |
| Evaluación para Fuerza Cortante (Tn) | | | | | |
| Viga | Expediente Técnico | 37.40 | 18.79 | 2.00 | $2.27 (10^{-2})$ |
| Exterior | Desempeño actual | 17.73 | 7.55 | 2.35 | $9.70 (10^{-3})$ |
| Losa | Expediente Técnico | 6.57 | 3.47 | 1.89 | $3.02 (10^{-2})$ |
| | Desempeño actual | 1.61 | 6.57 | 0.87 | $1.93 (10^{-1})$ |

Fuente: Software Oracle Crystal ball

3.12.4. ÍNDICE DE CAPACIDAD DE PUENTES

Para el cálculo del índice de seguridad determinísticos se ha necesitado la resistencia nominal de los elementos, las cargas calculadas y se he realizado el procedimiento tal cual está descrito en la sección. Obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla N°39. Cálculo del índice de capacidad del puente Otuzco (Viga).

| EVALUACIÓN CAPACIDAD ESTRUCTURAL | | MOMENTO | CORTANTE | | |
|--|--------------------------------|-------------|-----------|--------|-------|
| (RF) | | | | | |
| EVALUACIÓN VIGA EXTERIOR | | | | | |
| i) Cargas (S): | | | | | |
| Tipo de carga | Factores de Carga (γ) | | Valor | Valor | |
| | Inventario | Operación | (Tn-m) | (Tn) | |
| Carga Muerta (DC) | | 1.25 | 253.06 | 53.79 | |
| Carga Peatonal (DW) | | 1.75 | 9.60 | 2.68 | |
| Carga Viva (LL+IM) <i>E.T.</i> | 1.50 | | 202.41 | 47.59 | |
| Carga Viva (LL+IM) <i>Des. actual</i> | | 1.35 | 130.42 | 31.19 | |
| ii) Capacidad de Resistencia (R) | | | | | |
| Resistencia | Factores de Resistencia | | | Valor | Valor |
| | φ_c | φ_s | φ | (Tn-m) | (Tn) |
| Resistencia Nom. – E.T. | 1.00 | 1.00 | 0.9 | 598.87 | 83.85 |
| Resistencia Nom. – Des. actual | 1.00 | 1.00 | 0.9 | 594.50 | 85.04 |
| iii) Factor o índice de capacidad estructural (RF) | | | | | |
| Cargas de Diseño | Inventario | | 0.58 | 0.04 | |
| | Operación | | 1.15 | 0.11 | |

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°40. Cálculo del índice de capacidad del puente Otuzco (losa).

| EVALUACIÓN CAPACIDAD ESTRUCTURAL | | | | MOMENTO | CORTANTE |
|---|--|------------------|-----------|----------------|-----------------|
| (RF) | | | | | |
| EVALUACIÓN LOSA | | | | | |
| i) Cargas (S): | | | | | |
| Tipo de carga | Factores de Carga (γ) | | | Valor | Valor |
| | Inventario | Operación | | (Tn-m) | (Tn) |
| Carga Muerta (DC) | | 1.25 | | 1.13 | 1.26 |
| Carga Peatonal (DW) | | 1.75 | | 0.24 | 0.26 |
| Carga Viva (LL+IM) _{E.T.} | 1.75 | | | 2.32 | 8.76 |
| Carga Viva (LL+IM) _{Des. actual} | | | 1.35 | 1.56 | 6.47 |
| ii) Capacidad de Resistencia (R) | | | | | |
| Resistencia | Factores de Resistencia | | | Valor | Valor |
| | φ_c | φ_s | φ | (Tn-m) | (Tn) |
| Resistencia Nominal – E.T. | 1.00 | 1.00 | 0.9 | 6.55 | 14.75 |
| Resistencia Nominal – Des. actual | 1.00 | 1.00 | 0.9 | 6.55 | 14.93 |
| iii) Factor o índice de capacidad estructural (RF) | | | | | |
| Cargas de Diseño | Inventario | | | 0.99 | 0.73 |
| | Operación | | | 1.93 | 1.31 |

Fuente: Elaboración propia

3.12.5. ÍNDICE DE CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL

- a) **Método del Índice de confiabilidad:** el puente en evaluación es de tipo viga losa, contemplando una losa y 02 vigas exteriores, conectándose de forma monolítica, formando un sistema monolítico.

Figura N°25. Sistema de seguridad del puente – sistema mixto.



Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente se determinó la probabilidad de falla del sistema estructural, mostrándose a continuación los siguientes resultados:

Tabla N°41. Índices de seguridad por el método de confiabilidad.

| Enfoque de evaluación | Evaluación Momento | | Evaluación Cortante | |
|-----------------------|--------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
| | P_f | β | P_f | β |
| | Expediente técnico | $1.6 (10^{-4})$ | 3.59 | $1.4 (10^{-3})$ |
| Desempeño actual | $8.8 (10^{-5})$ | 3.77 | $3.7 (10^{-3})$ | 2.69 |

Fuente: Elaboración propia.

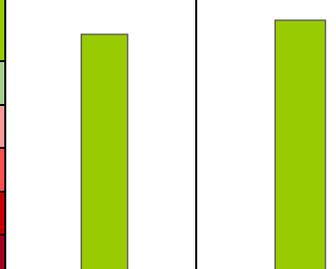
El índice de confiabilidad mediante el método de confiabilidad estructural tiene como referencia los niveles de seguridad propuestos por Army Corps of Engineers (1997); el cuál, tras su estudio considera 8 niveles de confiabilidad los cuales son referenciados en la Tabla N°42, además en esta tabla se referencia los valores límites para β según la investigación de Zlatko Šavor y Marta Šavor,(2014); citando el código de la LRFD USA, el cual determina que el valor β mínimo para evaluación a nivel de expediente técnico $\beta=3.50$ y para evaluación a nivel de desempeño actual $\beta=2.50$.

Tabla N°42. Escala de seguridad en referencia al índice β

| | | ESCALA DE SEGURIDAD | | |
|--|---------------------|---------------------|-----------------|--------|
| | | Nivel | Índices β | |
| | | | Mínimo | Máximo |
| $\beta = 3.5$ Límite mínimo Diseño AASHTO LRFD | Alto | 5.00 | - | |
| | Bueno | 4.00 | 5.00 | |
| | Arriba del promedio | 3.00 | 4.00 | |
| | Bajo del promedio | 2.50 | 3.00 | |
| $\beta = 2.5$ Límite mínimo Evaluación | Pobre | 2.00 | 2.50 | |
| | Insatisfactorio | 1.50 | 2.00 | |
| | Peligroso | 1.00 | 1.50 | |
| | Cercano a la falla | 0.00 | 1.00 | |
| | | | | |

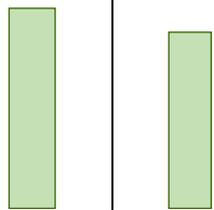
Fuente: Army Corps of Engineers (1997)

Tabla N°43. Índices de Confiabilidad (β) – Evaluación Momento

| | | ESCALA DE SEGURIDAD | | |
|--|---------------------|--|---|--------|
| | | Nivel | Índices β | |
| | | | Exp. técnico | Actual |
| $\beta = 3.5$ Límite mínimo Diseño AASHTO LRFD | Alto |  |  | |
| | Bueno | | | |
| | Arriba del promedio | | | |
| | Bajo del promedio | | | |
| | | | | |
| $\beta = 2.5$ Límite mínimo Evaluación | Pobre | | | |
| | Insatisfactorio | | | |
| | Peligroso | | | |
| | Cercano a la falla | | | |
| Nivel de Seguridad Evaluación de momentos | | 3.59 Arriba del promedio | 3.77 Arriba del promedio | |

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°44. Índices de Confiabilidad (β) – Evaluación Fuerza Cortante

| $\beta = 3.5$ Límite mínimo Diseño AASHTO LRFD | ESCALA DE SEGURIDAD | | |
|--|---------------------|--|---|
| | Nivel | Índices β | |
| | | Exp. técnico | Actual |
| $\beta = 2.5$ Límite mínimo Evaluación | Alto |  |  |
| | Bueno | | |
| | Arriba del promedio | | |
| | Bajo del promedio | | |
| | Pobre | | |
| | Insatisfactorio | | |
| | Peligroso | | |
| | Cercano a la falla | | |
| Nivel de Seguridad Evaluación de Cortantes | | 3.00 Bajo del promedio | 2.69 Bajo del promedio |

Fuente: Elaboración propia

b) **Método del Índice Capacidad:** para este método los resultados son:

Tabla N°45. Índices de seguridad por el método de capacidad estructural.

| Enfoque de evaluación | Evaluación Momento | Evaluación Cortante |
|--------------------------|-----------------------|------------------------|
| | RF de Sistema | |
| Inventario | 0.79 | 0.39 |
| Operativo | 1.53 | 0.71 |

Fuente: Elaboración propia.

El índice de confiabilidad mediante el método de capacidad estructural tiene como referencia los niveles de seguridad propuestos por Umpire (2015) en su investigación; el cuál, tras su estudio considera 3 niveles de confiabilidad los cuales son expuestos en la Tabla N°46, además de hacer referencia los valores límites para RF según la investigación en el MEB, AASHTO-2013; el cual determina que el valor RF mínimo para los diferentes tipos de carga es $RF = 1.00$.

Tabla N°46. Escalas de seguridad en referencia A RF.

| RF = 1.00 Límite mínimo Diseño AASHTO LRFD | ESCALA DE SEGURIDAD | | |
|--|----------------------------|--------------|--------|
| | Nivel | Índices "RF" | |
| | | Mínimo | Máximo |
| | Alto | 1.00 | - |
| | Regular | 0.65 | 1.00 |
| Malo | - | 0.65 | |

Fuente: Adaptación Umpire, 2015

Tabla N°47. Índices de Capacidad "RF" - Evaluación Momentos

| RF = 1.00 Límite mínimo Diseño AASHTO LRFD | ESCALA DE SEGURIDAD | | |
|--|----------------------------|---|---|
| | Nivel | Índices "RF" | |
| | | Inventario | Operativo |
| | Alto | | |
| | Regular |  |  |
| Malo | | | |
| Nivel de Seguridad Evaluación de Momentos | | 0.79 Regular | 1.53 Alto |

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°48. Índices de Capacidad "RF" - Evaluación Cortantes

| RF = 1.00 Límite mínimo Diseño AASHTO LRFD | ESCALA DE SEGURIDAD | | |
|---|---|--------------|---|
| | Nivel | Índices "RF" | |
| | | Inventario | Operativo |
| | Alto | | |
| | Regular | |  |
| Malo |  | | |
| Nivel de Seguridad Evaluación de Cortantes | | 0.39 Malo | 0.71 Regular |

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. ÍNDICE DE CONFIABILIDAD POR EL MÉTODO DE CONFIABILIDAD ESTRUCTURAL

Se determinó que el índice de confiabilidad (β) para la superestructura del Puente La Unión – Otuzco La Victoria, el cual sería el índice hallado para la fuerza cortante a nivel de su desempeño actual, siendo este $\beta=2.69$, lo que indica que su superestructura tiene un nivel de seguridad promedio.

Analizando a nivel del expediente técnico, podemos observar que el índice obtenido para la evaluación de momentos $\beta=3.59$ se encuentra mayor al límite mínimo para diseño según la AASHTO; presentándose falla en la evaluación al corte con un índice $\beta=3.00$, encontrándose por debajo del límite mínimo establecido. A nivel de su desempeño actual para la evaluación momento el índice $\beta=3.77$ se encuentra considerablemente por encima del límite mínimo: mientras que el índice hallado para la evaluación cortante $\beta=2.69$ se encuentra cerca al límite mínimo para su evaluación actual, esto debido a sus consideraciones de acero.

Resaltamos que no existe mucha variación en los índices obtenidos para ambos escenarios; puesto que la resistencia del concreto ($f'c=210 \text{ kg/cm}^2$) actual obtenida no difiere mucho al valor utilizado para su diseño según las especificaciones dadas en el expediente técnico; además de considerarse una resistencia considerablemente baja para elementos estructurales de este puente.

4.2. ÍNDICE DE CONFIABILIDAD POR EL MÉTODO DE CAPACIDAD ESTRUCTURAL

Se determinó que el índice de capacidad (RF) para la superestructura del Puente La Unión – Otuzco La Victoria, sería el índice hallado para la fuerza cortante a nivel de su desempeño actual, siendo este $RF=0.71$, lo que indica que su superestructura tiene un nivel de seguridad regular.

Analizando a nivel de su expediente técnico, podemos observar que su índice obtenido a nivel de estudio de momentos **RF=0.79** y cortantes **RF=0.39** es menor al promedio, lo que le hace susceptible a presentar fallas. A nivel de su desempeño actual para la evaluación de momentos **RF=1.53** está sobre el límite mínimo; mientras que para la evaluación cortante con un **RF=0.71** esta se encuentra por debajo del límite estando en un nivel de confiabilidad regular, pese a que los vehículos que transitan por este puente son de menor carga, la falla se puede presentar en la resistencia de concreto de 210 kg/cm² y en las consideraciones de su acero de refuerzo de Ø3/8, pudiendo ser de área mayor o mejor distribución.

4.3. EVALUACIÓN CUALITATIVA MEDIANTE LA DIRECTIVA N°01-2006-MTC/14 "GUÍA PARA INSPECCIÓN DE PUENTES"

a. LOSA Y COMPONENTES:

- Puente de concreto armado, conformado por una losa de 02 tramos. No cuenta con capa de rodadura o carpeta asfáltica. En buenas condiciones.
- Se puede observar descascaramiento del concreto en los filos de las veredas producto del tráfico vehicular, además fisuras leves en los parapetos.
- Las barandas son de fierro galvanizado y se encuentran en estado regular, con necesidad de mantenimiento de pintura.
- Falta de mantenimiento en drenaje de la losa.
- Mantenimiento en la junta de los 02 tramos.
- Enchapado en las vistas laterales del puente, en estado regular.

Tal y como se presenta en las siguientes fotografías:

Figura N°26. Losa del puente sin mantenimiento



Fuente: propia

Figura N°27. Descascaramiento del concreto, grietas, falta mantenimiento de drenaje



Fuente: propia

b. VIGA:

- Estructura formada por 02 vigas principales y 05 vigas diafragmas, las mismas que por la parte inferior de la estructura se ha podido presenciar fisuras, descascaramiento del concreto, eflorescencia, formación de hongos como parte del deterioro por uso, vibración, carga y exposición a agentes externos.

Figura N°28. Presencia de hongos y descascaramiento del concreto en las vigas principales del puente.



Fuente: propia

Figura N°29. Presencia de grietas en las vigas principales del puente.



Fuente: propia

c. ESTRIBOS Y ALETAS:

- Socavación en el puente y acumulación de sedimentos y basura.
- Presencia de hongos, eflorescencia y deterioro por filtraciones entre los apoyos.

Figura N°30. Presencia de filtraciones, hongos, y acumulación de basura en los estribos y aletas del puente.



Fuente: propia

d. ACCESO AL PUENTE:

- A pesar de ser una zona turística no cuenta con una adecuada transitabilidad peatonal y vehicular, el acceso al puente por el ingreso de la carretera principal de Otuzco es un desvío de camino de herradura o comúnmente llamada trocha carrozable, mientras que para la salida o ingreso desde Puyllucanas, es un camino afirmado, acomodándose al nivel de la estructura.

Finalmente, luego de haber realizado la inspección visual y cualitativa del puente mediante **LA DIRECTIVA N°01-2006-MTC/14 "GUÍA PARA INSPECCIÓN DE PUENTES"** se procede a clasificarlo según la tabla N°48, del cual podemos decir: El puente La Unión – Otuzco La Victoria pertenece a la clasificación N°02, **PUENTE REGULAR**, ya que no presenta variaciones las secciones geométricas de los elementos de la superestructura, y como fueron descritas anteriormente, presentan patologías en el concreto propias del uso, carga e inclemencias del clima, pero no fallas estructurales graves. Para mayor referencia se adjunta fotografías tomadas (ver

ANEXO A. PANEL FOTOGRÁFICO) en las que se puede apreciar el estado actual del Puente La Unión – Otuzco La Victoria.

Tabla N°49. Cuadro de condición global del puente - MTC

| Calificación | Descripción de la condición |
|---------------------|---|
| 0 | Muy bueno: No se observa problemas |
| 1 | Bueno: Hay problemas menores. Algunos elementos muestran deterioro sin importancia. |
| 2 | Regular: Los elementos primarios están en buen estado, pero algunos secundarios muestran deterioro, algo de pérdida de sección, grietas, descascaramiento o socavación pérdida de sección avanzada. |
| 3 | Malo: La pérdida de sección, deterioro o socavación afectan seriamente a los elementos estructurales primarios. Hay posibilidad de fracturas locales, pueden presentarse rajaduras en el concreto o fatigas en el acero. |
| 4 | Muy Malo: Avanzado deterioro de los elementos estructurales primarios. <ul style="list-style-type: none"> - Grietas de fatiga en acero o grietas de corte en el concreto - La socavación compromete el apoyo que debe dar la infraestructura. - Conviene cerrar el puente a menos que este monitoreado. |
| 5 | Pésimo: Gran deterioro o pérdida de sección presente en elementos estructurales críticos. <ul style="list-style-type: none"> - Desplazamientos horizontales o verticales afectan la estabilidad de la estructura - El puente se cierra al tráfico pero con acciones correctivas se puede restablecer el tránsito de unidades ligeras. |

Fuente: Guía para inspección de puentes,2006

4.4. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

Habiendo concluido con la Evaluación del Puente La Unión – Otuzco La Victoria, podemos contrastar nuestra hipótesis: "Los elementos estructurales de la superestructura del Puente La Unión – Otuzco La Victoria ubicado en el Centro Poblado de Otuzco, distrito Baños del Inca, provincia Cajamarca tienen un alto índice de confiabilidad"; con los resultados obtenidos. Se tiene lo siguiente:

Mediante el método de confiabilidad estructural, El puente La Unión – Otuzco La Victoria presenta un nivel de seguridad promedio, rechazando la hipótesis. Mediante el método de capacidad estructural, el Puente La Unión – Otuzco La Victoria presenta un nivel de seguridad regular, también refutando lo planteado en la hipótesis. Evaluados por ambos métodos se descarta la clasificación de seguridad alta, puesto que no se encuentra en los parámetros establecidos según los diferentes autores.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- El índice de confiabilidad de la superestructura del Puente La Unión – Otuzco La Victoria determinado mediante el método de confiabilidad (probabilístico) tiene un valor de $\beta=2.69$, considerándose un índice de seguridad promedio.
- El índice de confiabilidad de la superestructura del Puente La Unión – Otuzco La Victoria determinado mediante el método capacidad estructural (determinista) tiene un valor de $RF=0.71$, determinando un nivel de seguridad regular.
- Mediante LA DIRECTIVA N°01-2006-MTC/14 "GUÍA PARA INSPECCIÓN DE PUENTES" se logró identificar la condición actual de la estructura del puente La Unión - Otuzco La Victoria, perteneciendo este a la Clasificación 02, considerándose una estructura en un estado **REGULAR**.

5.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar nuevos estudios de confiabilidad en los que se considere nuevas propuestas de envolventes para el tráfico vehicular con cargas mayores a las previstas y analizadas en esta investigación.
- Se recomienda realizar la evaluación del nivel de confiabilidad de los elementos de la subestructura del puente, ya que así se puede completar la evaluación global del puente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2013). *The Manual Bridge Evaluation*. 2 ed Rev. Washington DC, Estados Unidos.
2. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2020). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*. 9th ed. Setiembre. Washington, Estados Unidos.
3. Army Corps of Engineers. 1997. Engineering and design: Introduction to probability and reliability methods for use in geotechnical engineering. Washington, DC. Estados Unidos. 15 p.
4. Aylas M.R., (2019). *“Evaluación del puente Lucas Chacana mediante métodos convencionales – Región Junín en 2019”* (Tesis de pregrado). Universidad Cesar Vallejo, Facultad de Ingeniería. Lima – Perú.
5. Becerra L. (2021). *“Estimación del índice de confiabilidad (β) de las vigas de los Puentes Venecia, Los Shilcos y Shudal – Cajamarca, usando conteos de tráfico real mediante simulación”* (tesis de pregrado). Universidad Privada del Norte, Carrera de Ingeniería Civil. Cajamarca- Perú.
6. Cabrera C. y Beltrán N. 2019. Estudio de Patologías estructurales de los puentes vehiculares en la calle 13 avenida américas con carrera 50 – localidad de puente Aranda en la ciudad de Bogotá (Tesis de pregrado). Bogotá, D.C.
7. Carrasco E. (2005). Evaluación de la vulnerabilidad sísmica del puente Warth. UPC. Barcelona.
8. CTE. (2019). Documento Básico Seguridad Estructural. SE. España
9. Gongkang Fu. 2012. Bridge Design and Evaluation. Ed. reprint. LRFD and LRFR. New Jersey, Estados Unidos. John Wiley & Sons. 456 p.

10. ICEET.1992. Introducción a la fiabilidad estructural y algunas aplicaciones. Madrid
11. Kumar A., Ajit S. y Rao D. (2016). *Reliability and Sfety Engineering*. 2nd ed. Springer. Estados Unidos
12. Melchers R. y Beck, A. 2018. *Structural Reliability Analysis and Prediction*. 3rd Ed. New Jersey, Estados Unidos. Wiley. 514 p.
13. Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). (2003). Reglamento Nacional de Vehículos. Lima, Perú.
14. Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). (2006). Directiva N°01-2006-MTC/14 " *Guía para Inspección de Puentes*". Marzo. Lima, Perú.
15. Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). (2018). *Manual de Puentes*. Ed. rev. Diciembre. Lima, Perú.
16. Muñoz, et al. (2002). Metodología de evaluación estructural de puente metálico por técnicas de fiabilidad estructural. *Revista Ingeniería De Construcción*, Vol. 17.
17. National Cooperative Highway Research Program. 2003. Report 489. Design of Highway Bridge for Extreme Events. Washington DC, New York. U.S. Transportation Research Board. 175 p.
18. Nilson A. (2001). *Diseño de Estructuras de Concreto*. 12th Ed. Bogotá. Colombia. McGraw-Hill.
19. Nowak A. (1999). *NCHRP Report 368*. Calibration of LRFD Bridge Design Code. Transportation Research Board. Washington, D.C.
20. Nowak A. y Collins K. (2000). *Reliability of Structures*. 1st ed. Estados Unidos: MgGraw-Hill.

21. Nowak, A. 1993. Reliability-based evaluation of existing bridges. 67 (1993). Revista Estadounidense. 275 -282.
22. Picado F. y Ortiz G. (2017). Desarrollo de un modelo de confiabilidad para el análisis del desempeño de puentes. Un caso de estudio en Costa Rica. Tecnología en Marcha. Vol. 30-1.
23. Polanco, K. (2013). "*Evaluación de las Fallas del Puente Chonta de la Red Vial Cajamarca- Baños del Inca*" (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Cajamarca, Facultad de Ingeniería. Cajamarca- Perú.
24. Rodríguez A. (2022). Puentes con AASHTO LRFD 2020 (9th Edition). Perú.
25. Silva J. (2018). "*Índices de Seguridad Estructural en Puentes de la Carretera Longitudinal de la Sierra Provincia de Chota*" (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Cajamarca, Facultad de Ingeniería. Cajamarca- Perú.
26. Tadeu, n., y Lenz, a. (2011). *Identificación y análisis de patologías en puentes de carreteras urbanas y rurales*. título para pre grado. Universidad Estadual de Campiñas, Sao Paulo, Brasil.
27. Taly, N. 2014. Highway Bridge Superstructure Engineering LRFD Approaches to Design and Analysis. 1st Ed. New York, Estados Unidos. Taylor & Francis Group. 959 p.
28. Téllez C. (2005). "Evaluación de la confiabilidad de superestructuras de puentes carreteros" (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F.
29. Umpire J. 2015. Evaluación estructural del Puente Nochoz en el Tramo II- Villa Rica –Puerto Bermudez, Oxapampa (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Ingeniería. Lima – Perú.

30. Universidad de Sevilla. (2016). *Estructuras I: La seguridad en las estructuras*. Sevilla, España.
31. Vanegas S. y Chio G. (2014). Estimación del índice de confiabilidad β de las vigas de un puente usando conteos de tráfico real (TPDS) mediante simulación. *Tecnura, Volumen 18*.
32. Villarreal, G. (2009). *Análisis Estructural*. s/n ed. Lima, Perú.
33. Zlatko Šavor y Marta Šavor. 2014. Procedures for reliability assessment of existing bridges. Zagreb. *Revista Crota Gradevinar*. 6 (65). 557 -562.

ANEXOS

ANEXO A. PANEL FOTOGRÁFICO

a) PUENTE LA UNIÓN – OTUZCO LA VICTORIA



Fotografía N°1. Vista de losa, vereda y barandas de la estructura.



Fotografía N°2. Vista inferior de las vigas principales y vigas diafragmas, pilar central de la estructura.



Fotografía N°3. Vista de las aletas y estribos que forman parte del puente.

Fuente: Propia

b) VERIFICACIÓN DE MEDIDAS DE LA ESTRUCTURA IN SITU



Fotografía N°1. Toma de medidas del peralte y ancho de la viga principal.



Fotografía N°2. Toma de medida del peralte y ancho de la viga diafragma.



Fotografía N°3. Toma de medidas del largo y ancho de un tramo de la losa.

Fuente: Propia

c) **ESTUDIO DE TRÁFICO**

A continuación, se presenta fotografías tomadas en el registro del estudio de tráfico vehicular realizado por el periodo de una semana (07 días) desde el 11/06/22 al 17/06/22.



Fotografía N°1. Registro de tráfico vehicular del 12/06/2022.



Fotografía N°2. Registro de tráfico vehicular del 14/06/2022.

Fuente: Propia



Fotografía N°3. Registro de tráfico vehicular del 15/06/2022.



Fotografía N°4. Registro de tráfico vehicular del 16/06/2022.



Fotografía N°5. Registro de tráfico vehicular del 17/06/2022.

Fuente: Propia

ANEXO B. ESTUDIO DE TRÁFICO

A continuación, se presenta el registro del estudio de tráfico vehicular realizado por el periodo de una semana (07 días) desde el 11/06/22 al 17/06/22, datos que sirvieron para determinar los vehículos de transitan por el Puente La Unión – Otuzco La Victoria para el periodo de tiempo en el que se desarrolló la investigación.

Tesis: "Índices de confiabilidad de la superestructura del Puente La Unión – Otuzco La Victoria en el Centro Poblado de Otuzco distrito Baños del Inca"

Tesista: Soila S. Angulo Soto **Asesor:** Miguel Mosquera Moreno

Estación: Puente La Unión – Otuzco La Victoria - (Ambos sentidos)

Ubicación: Cajamarca – Cajamarca - Baños del Inca - Otuzco

Tabla N°50. Registro de Vehículos – Día 1: 11/06/2022

| Hora | Motos | Transporte ligero | | Urbano | | Carga | |
|--------------------|------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| | | Autos | Pick Up | Bus 2E | Combi | C2 | C3 |
| 7:00-8:00 | 6 | 3 | | | | 1 | 1 |
| 8:00-9:00 | 10 | | 1 | | 2 | 3 | |
| 9:00-10:00 | 10 | 1 | 2 | | 1 | 1 | |
| 10:00-11:00 | 6 | 3 | 5 | | 1 | 3 | |
| 11:00-12:00 | 11 | 8 | 2 | | 2 | 2 | |
| 12:00-13:00 | 9 | 4 | 6 | | 3 | 3 | 2 |
| 13:00-14:00 | 12 | 4 | 9 | | 2 | 1 | |
| 14:00-15:00 | 17 | 13 | 9 | | 1 | | |
| 15:00-16:00 | 9 | 4 | 2 | 1 | 1 | 1 | |
| 16:00-17:00 | 7 | 1 | 2 | 1 | | | |
| 17:00-18:00 | 8 | 1 | 3 | | 2 | | |
| 18:00-19:00 | 7 | 1 | | | 1 | | |
| TOTAL | 112 | 43 | 41 | 2 | 16 | 15 | 3 |
| 232 | 112 | 84 | | 18 | | 18 | |
| Porcentaje: | 48% | 36% | | 8% | | 8% | |

Fuente: Elaboración propia

Tesis: "Índices de confiabilidad de la superestructura del Puente La Unión – Otuzco La Victoria en el Centro Poblado de Otuzco distrito Baños del Inca"

Tesista: Soila S. Angulo Soto **Asesor:** Miguel Mosqueira Moreno

Estación: Puente La Unión – Otuzco La Victoria - (Ambos sentidos)

Ubicación: Cajamarca – Cajamarca - Baños del Inca - Otuzco

Tabla N°51. Registro de Vehículos – Día 2: 12/06/2022

| Hora | Motos | Transporte ligero | | Urbano | | Carga | |
|--------------------|------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| | | Autos | Pick Up | Bus 2E | Combi | C2 | C3 |
| 7:00-8:00 | 8 | 3 | 1 | | | | 1 |
| 8:00-9:00 | 7 | 4 | 4 | | 1 | | |
| 9:00-10:00 | 13 | 13 | 2 | | | 2 | |
| 10:00-11:00 | 11 | 5 | 5 | | 3 | | 1 |
| 11:00-12:00 | 19 | 5 | 7 | | 3 | 1 | |
| 12:00-13:00 | 11 | 6 | 7 | | 2 | | |
| 13:00-14:00 | 8 | 12 | 12 | | 5 | 3 | |
| 14:00-15:00 | 13 | 13 | 3 | | | 1 | |
| 15:00-16:00 | 11 | 6 | 3 | 1 | | | |
| 16:00-17:00 | 17 | 3 | 9 | 2 | 1 | | |
| 17:00-18:00 | 7 | 6 | 3 | | 1 | | |
| 18:00-19:00 | 8 | 5 | 1 | | 1 | 1 | |
| TOTAL | 133 | 81 | 57 | 3 | 17 | 8 | 2 |
| 301 | 133 | 138 | | 20 | | 10 | |
| Porcentaje: | 44% | 46% | | 7% | | 3% | |

Tabla N°52. Registro de Vehículos – Día 3: 13/06/2022

| Hora | Motos | Transporte ligero | | Urbano | | Carga | |
|--------------------|------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| | | Autos | Pick Up | Bus 2E | Combi | C2 | C3 |
| 7:00-8:00 | 10 | 8 | 6 | 1 | 2 | | 3 |
| 8:00-9:00 | 8 | 5 | 2 | | | 2 | |
| 9:00-10:00 | 8 | 3 | 2 | | 2 | 2 | |
| 10:00-11:00 | 5 | 3 | | | | | |
| 11:00-12:00 | 16 | 5 | | | 1 | | |
| 12:00-13:00 | 5 | 2 | 3 | | | | |
| 13:00-14:00 | 5 | 4 | 2 | | 2 | 4 | |
| 14:00-15:00 | 12 | 8 | | | | 1 | 2 |
| 15:00-16:00 | 7 | 4 | | | | | |
| 16:00-17:00 | 10 | 2 | 1 | 1 | 1 | | |
| 17:00-18:00 | 8 | 2 | 2 | 1 | 3 | | 1 |
| 18:00-19:00 | 7 | 2 | | | | 1 | |
| TOTAL | 101 | 48 | 18 | 3 | 11 | 10 | 6 |
| 197 | 101 | 66 | | 14 | | 16 | |
| Porcentaje: | 51% | 34% | | 7% | | 8% | |

Fuente: Elaboración propia

Tesis: "Índices de confiabilidad de la superestructura del Puente La Unión – Otuzco La Victoria en el Centro Poblado de Otuzco distrito Baños del Inca"

Tesista: Soila S. Angulo Soto **Asesor:** Miguel Mosqueira Moreno

Estación: Puente La Unión – Otuzco La Victoria - (Ambos sentidos)

Ubicación: Cajamarca – Cajamarca - Baños del Inca - Otuzco

Tabla N°53. Registro de Vehículos – Día 4: 14/06/2022

| Hora | Motos | Transporte ligero | | Urbano | | Carga | |
|--------------------|------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| | | Autos | Pick Up | Bus 2E | Combi | C2 | C3 |
| 7:00-8:00 | 11 | 7 | 7 | 1 | 3 | | |
| 8:00-9:00 | 7 | 5 | | | 1 | | 2 |
| 9:00-10:00 | 9 | 4 | 4 | | 1 | 3 | |
| 10:00-11:00 | 6 | 5 | 3 | | | 1 | 1 |
| 11:00-12:00 | 13 | 7 | 2 | 1 | 2 | | |
| 12:00-13:00 | 7 | 4 | 2 | | | | |
| 13:00-14:00 | 4 | 6 | | | 1 | 3 | |
| 14:00-15:00 | 10 | 6 | 3 | | | | |
| 15:00-16:00 | 9 | 6 | | | | 2 | |
| 16:00-17:00 | 8 | 2 | 2 | 1 | 1 | | 1 |
| 17:00-18:00 | 7 | 4 | 2 | | 1 | | |
| 18:00-19:00 | 6 | 4 | 1 | | | 1 | |
| TOTAL | 97 | 60 | 26 | 3 | 10 | 10 | 4 |
| 301 | 97 | 86 | | 13 | | 14 | |
| Porcentaje: | 46% | 41% | | 6% | | 7% | |

Tabla N°54. Registro de Vehículos – Día 5: 15/06/2022

| Hora | Motos | Transporte ligero | | Urbano | | Carga | |
|--------------------|------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| | | Autos | Pick Up | Bus 2E | Combi | C2 | C3 |
| 7:00-8:00 | 9 | 9 | 5 | 1 | 2 | | 2 |
| 8:00-9:00 | 9 | 6 | 2 | | | 3 | 1 |
| 9:00-10:00 | 10 | 6 | | | 2 | | |
| 10:00-11:00 | 8 | 4 | 2 | | 1 | 2 | |
| 11:00-12:00 | 11 | 6 | 1 | 1 | | | 1 |
| 12:00-13:00 | 8 | 5 | 3 | | 1 | | 1 |
| 13:00-14:00 | 6 | 6 | | | 1 | 2 | |
| 14:00-15:00 | 12 | 7 | | | | 2 | |
| 15:00-16:00 | 10 | 5 | 3 | | | 1 | |
| 16:00-17:00 | 9 | 3 | 1 | 1 | 2 | | 1 |
| 17:00-18:00 | 9 | 5 | | 1 | 1 | | |
| 18:00-19:00 | 6 | 5 | 1 | | | 2 | |
| TOTAL | 107 | 67 | 18 | 4 | 10 | 12 | 6 |
| 224 | 107 | 85 | | 14 | | 18 | |
| Porcentaje: | 48% | 38% | | 6% | | 8% | |

Fuente: Elaboración propia

Tesis: "Índices de confiabilidad de la superestructura del Puente La Unión – Otuzco La Victoria en el Centro Poblado de Otuzco distrito Baños del Inca"

Tesista: Soila S. Angulo Soto **Asesor:** Miguel Mosqueira Moreno

Estación: Puente La Unión – Otuzco La Victoria

Ubicación: Cajamarca – Cajamarca - Baños del Inca - Otuzco

Tabla N°55. Registro de Vehículos – Día 6: 16/06/2022

| Hora | Motos | Transporte ligero | | Urbano | | Carga | |
|--------------------|------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| | | Autos | Pick Up | Bus 2E | Combi | C2 | C3 |
| 7:00-8:00 | 9 | 9 | 7 | | 2 | 2 | 1 |
| 8:00-9:00 | 10 | 5 | 1 | | 2 | 2 | |
| 9:00-10:00 | 8 | 5 | 3 | | 1 | | |
| 10:00-11:00 | 6 | 6 | | | | 1 | |
| 11:00-12:00 | 12 | 7 | 3 | 1 | 1 | | |
| 12:00-13:00 | 6 | 6 | 2 | | 1 | | |
| 13:00-14:00 | 5 | 5 | | | | 1 | 2 |
| 14:00-15:00 | 10 | 9 | 3 | | | 3 | |
| 15:00-16:00 | 8 | 7 | 2 | | | | |
| 16:00-17:00 | 12 | 4 | 2 | 1 | 1 | | |
| 17:00-18:00 | 10 | 4 | 1 | | 2 | 1 | 1 |
| 18:00-19:00 | 5 | 3 | 1 | | 1 | 1 | |
| TOTAL | 101 | 70 | 25 | 2 | 11 | 11 | 4 |
| 224 | 101 | 95 | | 13 | | 15 | |
| Porcentaje: | 45% | 42% | | 6% | | 7% | |

Tabla N°56. Registro de Vehículos – Día 7: 17/06/2022

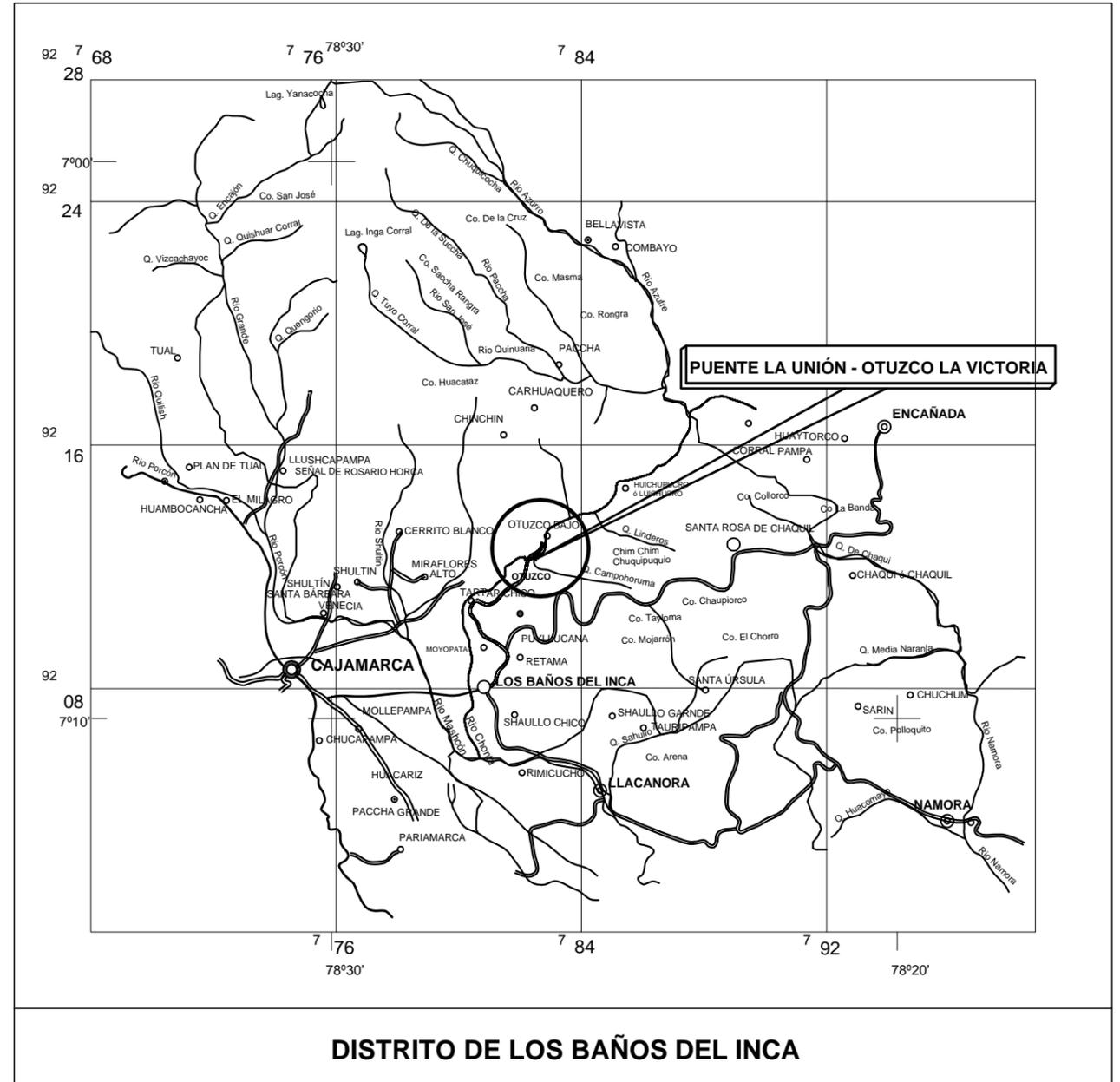
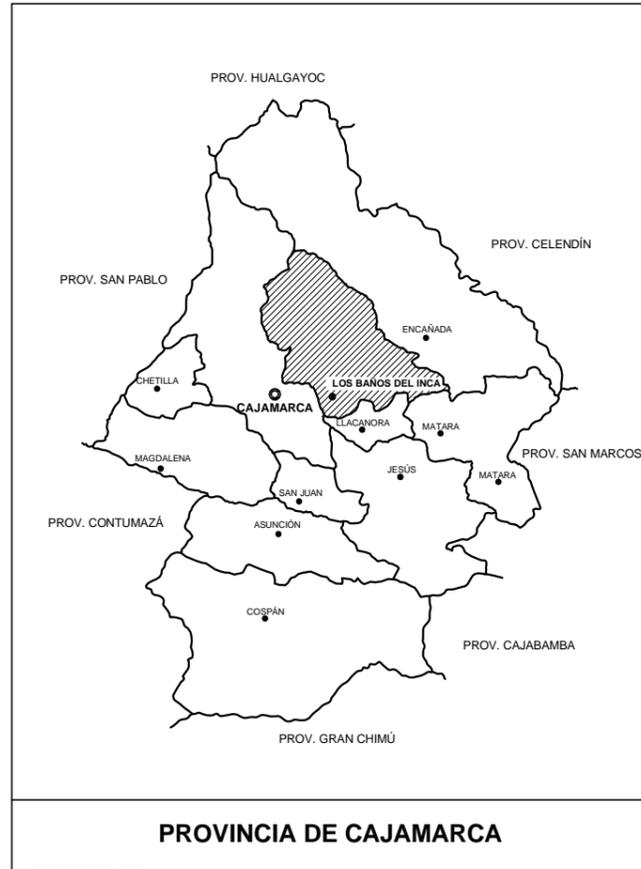
| Hora | Motos | Transporte ligero | | Urbano | | Carga | |
|--------------------|------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| | | Autos | Pick Up | Bus 2E | Combi | C2 | C3 |
| 7:00-8:00 | 10 | 8 | 6 | 2 | 3 | 1 | 1 |
| 8:00-9:00 | 11 | 6 | 2 | | | 3 | 2 |
| 9:00-10:00 | 9 | 6 | | | 2 | 1 | |
| 10:00-11:00 | 7 | 7 | 3 | | | | |
| 11:00-12:00 | 14 | 5 | 2 | 1 | 1 | | |
| 12:00-13:00 | 4 | 4 | 2 | | 2 | | 2 |
| 13:00-14:00 | 6 | 6 | 2 | | | 3 | |
| 14:00-15:00 | 11 | 9 | | | | | |
| 15:00-16:00 | 9 | 5 | 1 | | | 2 | |
| 16:00-17:00 | 11 | 4 | | 1 | 2 | | |
| 17:00-18:00 | 9 | 3 | 2 | 2 | 2 | | 2 |
| 18:00-19:00 | 7 | 4 | 3 | | | 2 | |
| TOTAL | 108 | 67 | 23 | 6 | 12 | 12 | 7 |
| 235 | 108 | 90 | | 18 | | 19 | |
| Porcentaje: | 46% | 38% | | 8% | | 8% | |

Fuente: Elaboración propia

ANEXO C. PLANOS

A continuación, se presentan los planos de la superestructura del Puente La Unión – Otuzco La Victoria elaborados con información del Expediente técnico, la misma que ha sido revisada y corroborada con la medición en campo de estos elementos.

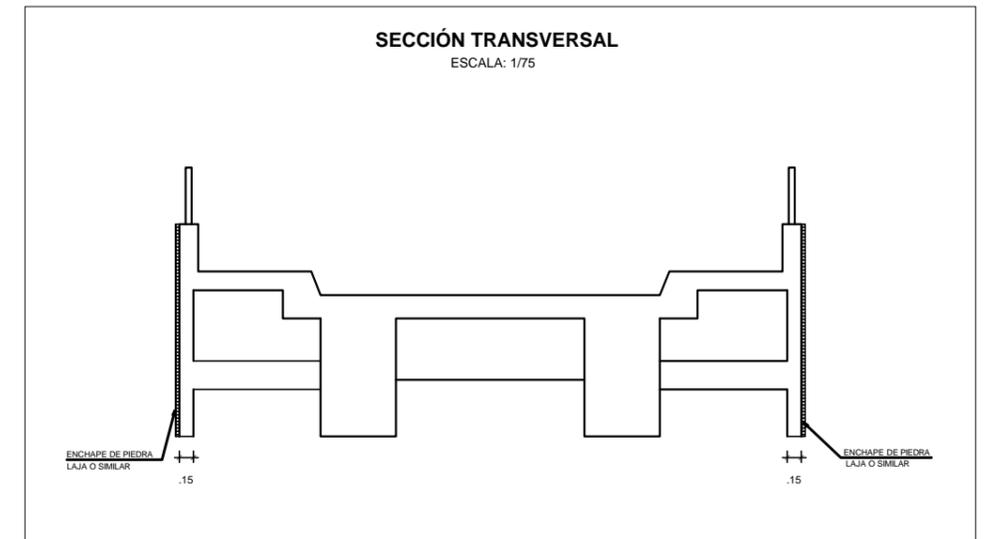
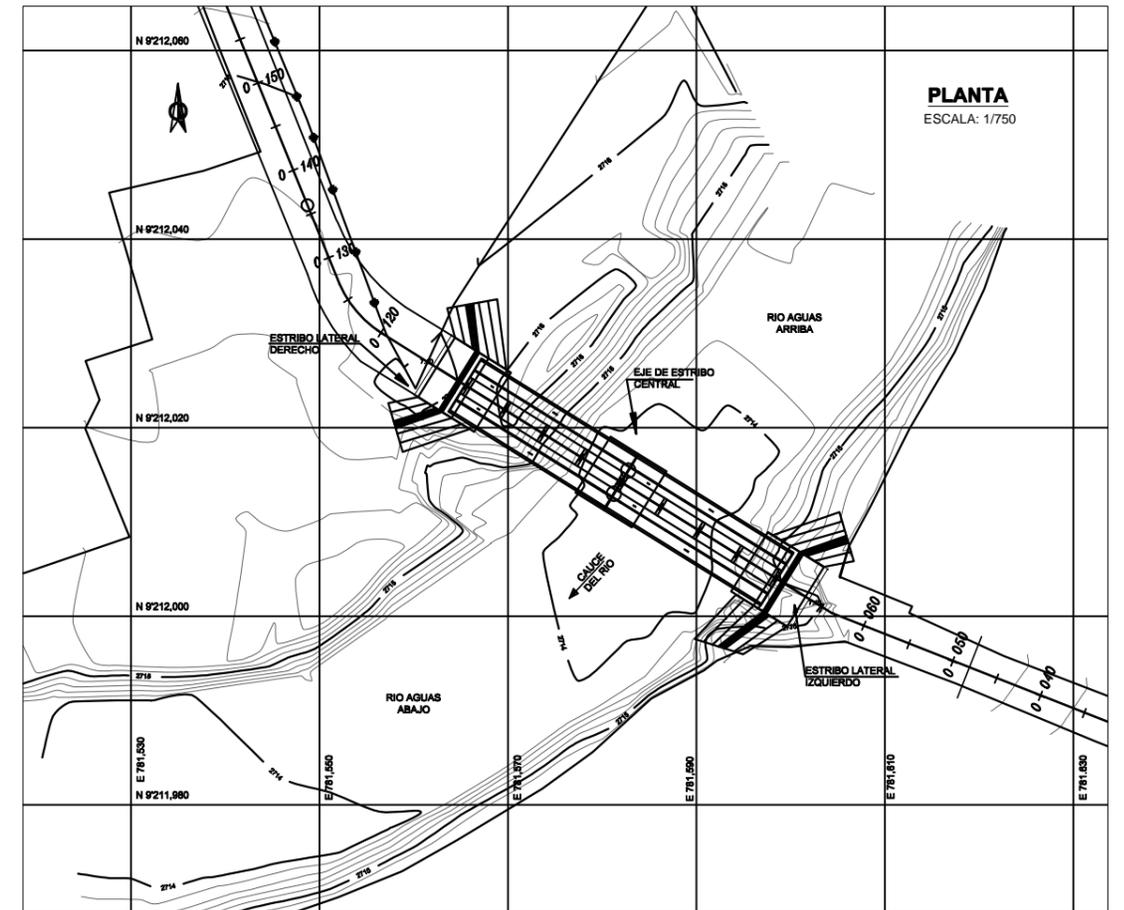
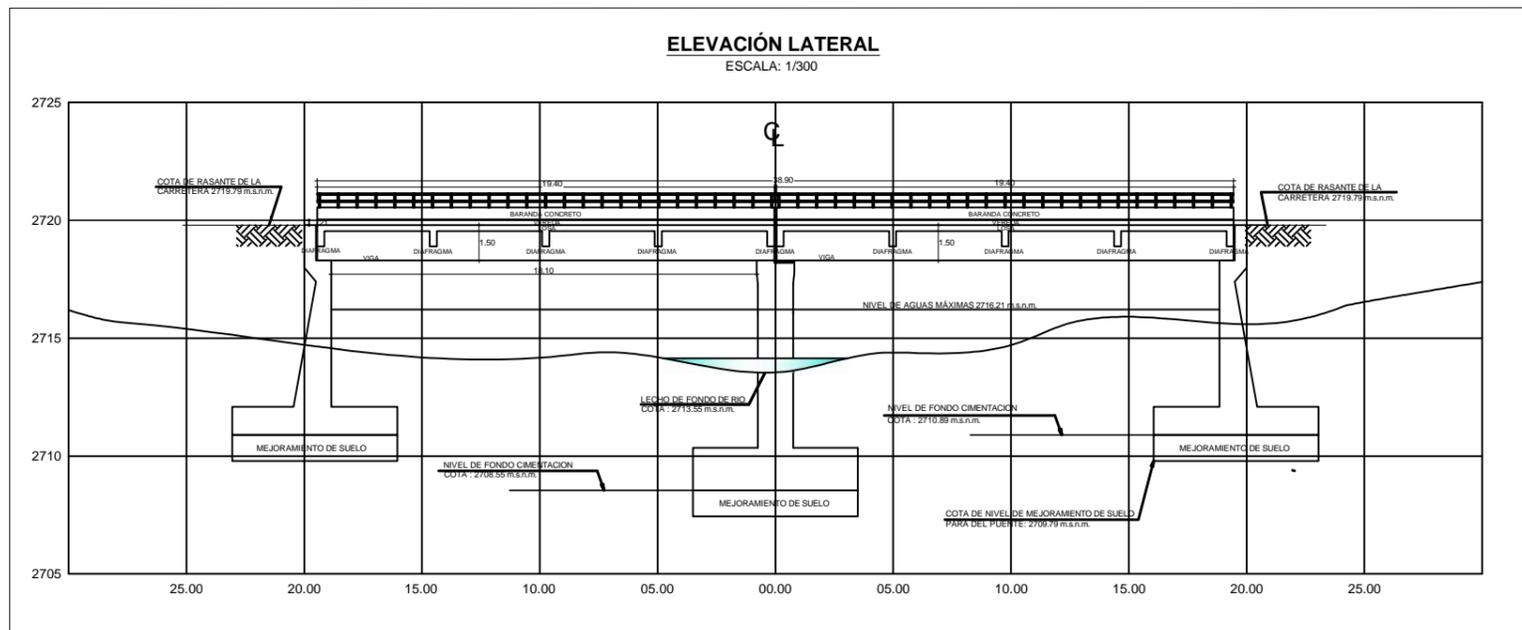
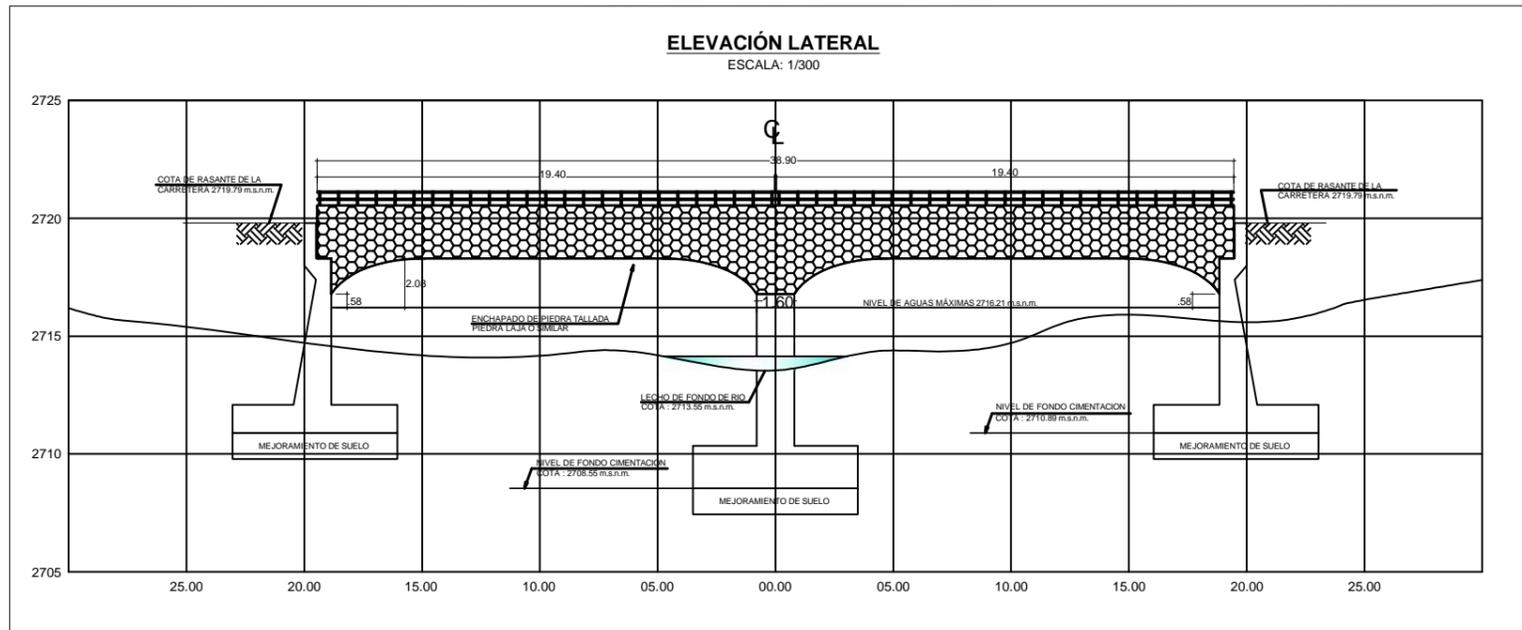
- **Plano U-01:** Ubicación Puente La Unión – Otuzco La Victoria.
- **Plano V-01:** Vistas y elevaciones Puente La Unión - Otuzco La Victoria.
- **Plano E-01:** Estructuras - elementos de la superestructura del Puente La Unión – Otuzco La Victoria.
- **Plano EE-01:** Plano de ubicación de los ensayos de Esclerometría ASTM-C805.



| PUENTE LA UNIÓN-OTUZCO LA VICTORIA | |
|---|----------------|
| UBICACIÓN | |
| DEPARTAMENTO | Cajamarca |
| PROVINCIA | Cajamarca |
| DISTRITO | Baños del Inca |
| CENTRO POBLADO | Otuzco |
| CASERÍO | La Victoria |
| COORDENADAS UTM GWS-84 | |
| NORTE: | 9'211,994.22 |
| ESTE: | 781,581.99 |



| UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA | | | |
|--|--------------------------------------|------------------|------------------|
| FACULTAD DE INGENIERÍA | | | |
| ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL | | | |
| PROYECTO: | | | |
| "INDICES DE CONFIABILIDAD DE LA SUPERESTRUCTURA DEL PUENTE LA UNIÓN - OTUZCO LA VICTORIA EN EL CENTRO POBLADO DE OTUZCO, DISTRITO DE BAÑOS DEL INCA - CAJAMARCA" | | | |
| PLANO: | UBICACIÓN | | PLANO N°: |
| | PUENTE LA UNIÓN - OTUZCO LA VICTORIA | | U-01 |
| TESISTA: | Bach. ANGULO SOTO SOILA SELENE | | |
| REGIÓN: | PROVINCIA: | DISTRITO: | FECHA: |
| CAJAMARCA | CAJAMARCA | BAÑOS DEL INCA | 2023 |



| PUENTE LA UNIÓN-OTUZCO LA VICTORIA/ UBICACIÓN | |
|--|----------------|
| DEPARTAMENTO | Cajamarca |
| PROVINCIA | Cajamarca |
| DISTRITO | Baños del Inca |
| CENTRO POBLADO | Otuzco |
| CASERIO | La Victoria |
| COORDENADAS UTM GWS-84 | |
| NORTE: | 9'211,994.22 |
| ESTE: | 781,581.99 |

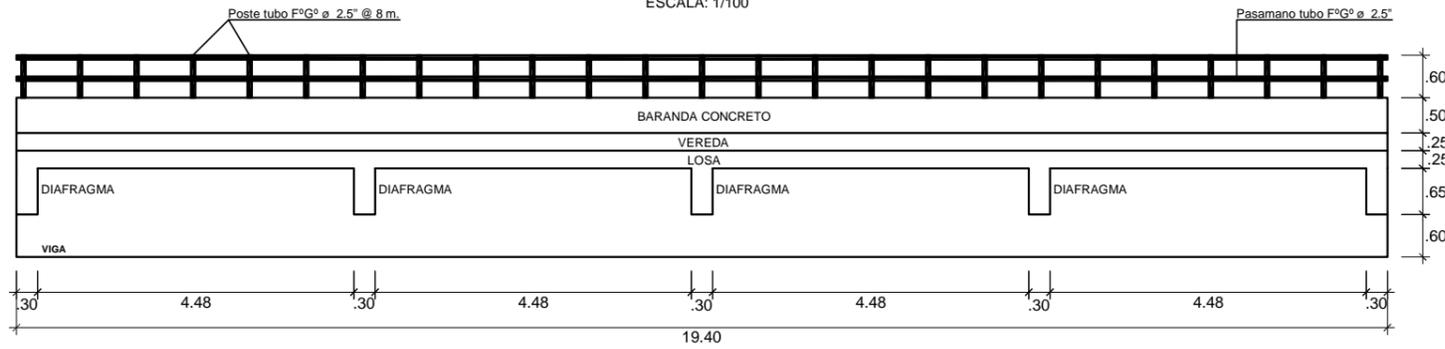
| PUENTE LA UNIÓN - OTUZCO LA VICTORIA DATOS | | |
|---|--|------------------|
| RÍO | | Río Chonta |
| LUZ LIBRE DEL TRAMO | | L=18.10 M. |
| LUZ TOTAL DEL PUENTE | | L=38.90 M. |
| NÚMERO DE VÍAS | | 01 vía |
| CAMIÓN DE DISEÑO | | HL-93 |
| COTA LOSA TERM PUENTE | | 2719.79 m.s.n.m. |
| COTA LECHO RÍO | | 2713.75 m.s.n.m. |



| UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL | | | |
|--|--------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| PROYECTO: "INDICES DE CONFIABILIDAD DE LA SUPERESTRUCTURA DEL PUENTE LA UNIÓN - OTUZCO LA VICTORIA EN EL CENTRO POBLADO DE OTUZCO, DISTRITO DE BAÑOS DEL INCA - CAJAMARCA" | | | |
| PLANO: VISTAS Y ELEVACIONES PUENTE LA UNIÓN - OTUZCO LA VICTORIA | | | PLANO N°: V-01 |
| TESISTA: Bach. Ing. ANGULO SOTO SOILA SELENE | | | |
| REGIÓN: CAJAMARCA | PROVINCIA: CAJAMARCA | DISTRITO: BAÑOS DEL INCA | FECHA: 2023 |

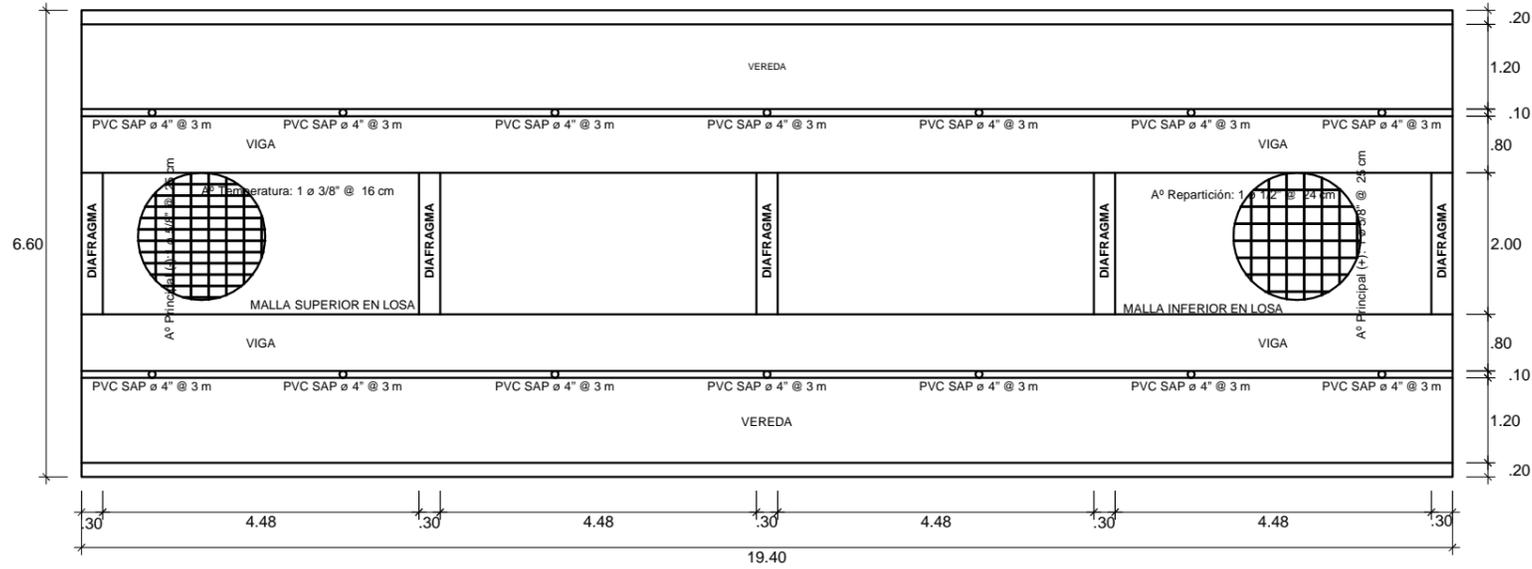
ELEVACIÓN LATERAL

ESCALA: 1/100



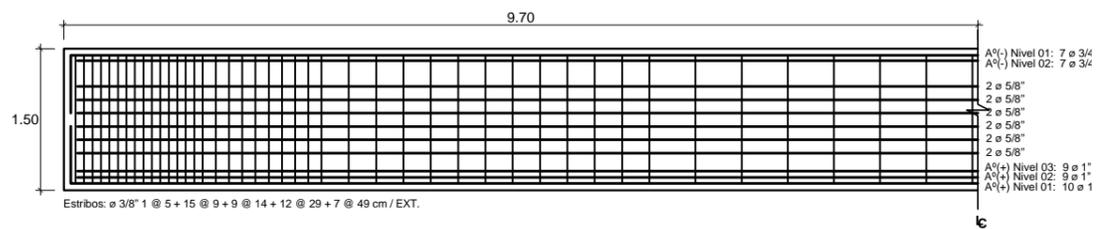
PLANTA

ESCALA: 1/100



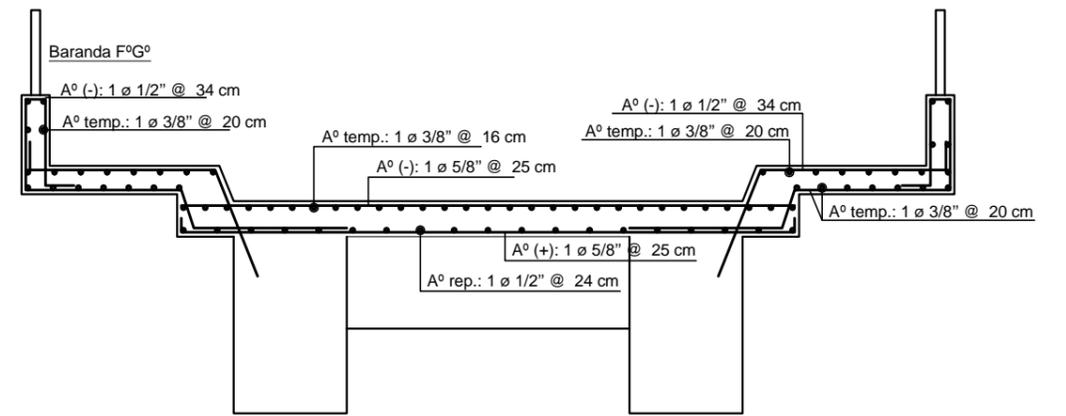
SECCIÓN LONGITUDINAL DE VIGA

ESCALA: 1/50



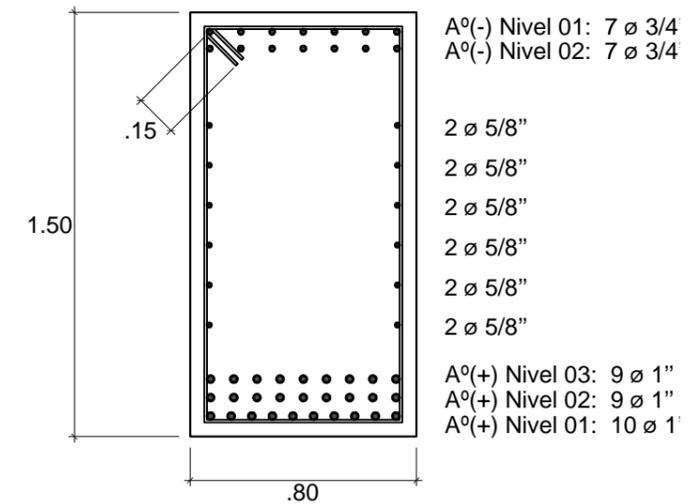
ACERO EN LOSA Y VEREDA

ESCALA: 1/50



SECCIÓN TRANSVERSAL DE VIGA

ESCALA 1/25



ESPECIFICACIONES TÉCNICAS SUPERESTRUCTURA

DATOS DE DISEÑO

| DESCRIPCION | VALOR | UNIDAD |
|-------------------------|--------|-------------------|
| Luz Libre (02 tramos) | 18.10 | m |
| Número de Vías | 1 | unid |
| Camión de Diseño | HL-93 | - |
| S/C Peatonal | 0.40 | Tn/m ² |
| S/C Baranda de Metal | 0.15 | Tn/m |
| S/C Baranda de Concreto | 4.55 | Tn/m |
| Aceleración Sismo | 0.32 | g |
| Velocidad de Viento | 100.00 | km/h |

SUPERESTRUCTURA

| ELEMENTO | f _c (kg/cm ²) | f _y (kg/cm ²) | Recubrimiento (cm) |
|-----------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| Viga | 210 | 4200 | 5.00 |
| Losa | 210 | 4200 | Sup = 5.00 Inf = 3.00 |
| Diafragma | 210 | 4200 | 3.00 |
| Baranda | 210 | 4200 | 3.00 |
| Vereda | 210 | 4200 | 3.00 |

Calzada de puente sin carpeta asfáltica



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO:

"INDICES DE CONFIABILIDAD DE LA SUPERESTRUCTURA DEL PUENTE LA UNIÓN - OTUZCO LA VICTORIA EN EL CENTRO POBLADO DE OTUZCO, DISTRITO DE BAÑOS DEL INCA - CAJAMARCA"

PLANO:

ESTRUCTURAS - ELEMENTOS DE LA SUPERESTRUCTURA
PUENTE LA UNIÓN - OTUZCO LA VICTORIA

PLANO N°:

E-01

TESISTA:

Bach. ANGULO SOTO SOILA SELENE

REGIÓN:
CAJAMARCA

PROVINCIA:
CAJAMARCA

DISTRITO:
BAÑOS DEL INCA

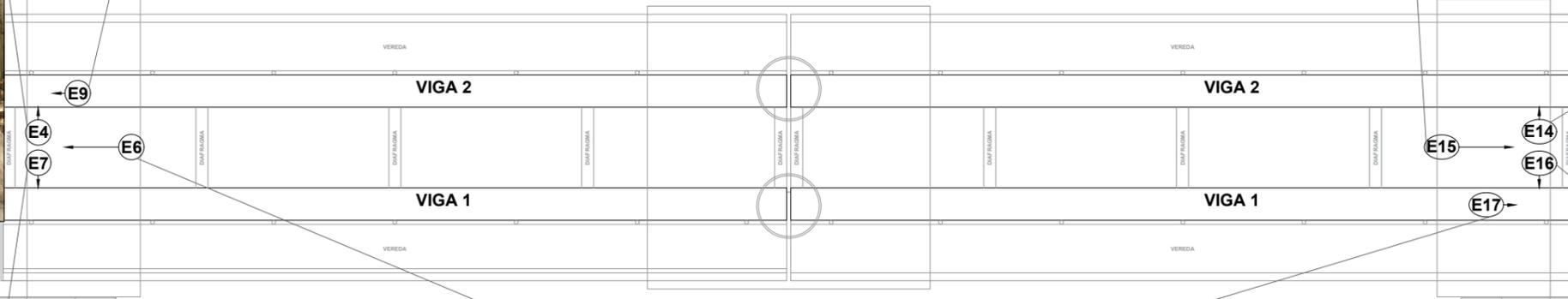
FECHA:
2023

PLANO DE UBICACIÓN DE LOS ENSAYOS DE ESCLEROMETRÍA ASTM-C805

ESCALA: 1/125



| Ensayo | Elemento de la superestructura | α | Resistencia a compresión requerida Kg/Cm ² | Resistencia a compresión obtenida Kg/Cm ² |
|--------|----------------------------------|----------|---|--|
| E4 | Viga principal 02 lado derecho | 0 | 210 | 190 |
| E7 | Viga principal 01 lado derecho | 0 | 210 | 210 |
| E9 | Viga principal 02 lado derecho | -90 | 210 | 198 |
| E14 | Viga principal 02 lado izquierdo | 0 | 210 | 238 |
| E16 | Viga principal 01 lado izquierdo | 0 | 210 <td 220 | |
| E17 | Viga principal 01 lado izquierdo | -90 | 210 | 238 |
| E6 | Losa lado derecho | -90 | 210 | 210 |
| E15 | Losa lado izquierdo | -90 | 210 | 220 |



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

PROYECTO:
"INDICES DE CONFIABILIDAD DE LA SUPERESTRUCTURA DEL PUENTE LA UNIÓN - OTUZCO LA VICTORIA EN EL CENTRO POBLADO DE OTUZCO, DISTRITO DE BAÑOS DEL INCA - CAJAMARCA"

PLANO: UBICACIÓN DE ENSAYOS DE ESCLEROMETRÍA ASTM C805 **PLANO N°:**
EE-01

TESISTA: Bach. Ing. ANGULO SOTO SOILA SELENE

REGIÓN: CAJAMARCA **PROVINCIA:** CAJAMARCA **DISTRITO:** BAÑOS DEL INCA **FECHA:** 2023