

UNIVERSIDAD CENTRAL
VICERRECTORÍA ACADÉMICA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Proyecto Diseño de Propuesta de Ampliación del Puente
Cambronero sobre el Río Limón en el Cantón de Alajuelita de la
Provincia de San José

MODALIDAD DE TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA
CIVIL

ESTUDIANTE: ERIC MORALES GODÍNEZ

TUTOR: CLAUDIO ZÚÑIGA SERRANO

SEDE CENTRAL

Marzo, 2024

Tabla de contenido

<u>Dedicatoria y Agradecimiento</u>	<u>6</u>
<u>Resumen</u>	<u>6</u>
<i>Capítulo I: Problema</i>	<u>9</u>
<u>Tema General</u>	<u>9</u>
<u>Planteamiento del Problema</u>	<u>9</u>
<u>Pregunta de Investigación</u>	<u>11</u>
<u>Objetivo General</u>	<u>11</u>
<u>Objetivos Específicos</u>	<u>11</u>
<u>Aspectos relevantes de la investigación</u>	<u>12</u>
<u>Justificación</u>	<u>12</u>
<u>Alcances del proyecto</u>	<u>12</u>
<u>Limitaciones del proyecto</u>	<u>13</u>
<u>Antecedentes</u>	<u>14</u>
<i>Antecedentes Internacionales</i>	<u>14</u>
<i>Antecedentes Nacionales</i>	<u>16</u>
<u>Capítulo II: Marco Teórico</u>	<u>18</u>
<u>Puente</u>	<u>18</u>
<i>Superestructura</i>	<u>18</u>
<i>Tablero</i>	<u>19</u>

	3
<i>Estructura Portante</i> _____	19
<i>Componentes Adicionales del Tablero</i> _____	19
<u>Subestructura</u>	19
<i>Estribos</i> _____	20
<i>Bastión</i> _____	20
<i>Pilares</i> _____	20
<i>Tramo</i> _____	20
<i>Pilotes</i> _____	20
<i>Apoyos</i> _____	21
<u>Legislación Nacional</u>	22
<i>Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes CR-</i> <i>2020</i> _____	22
<i>Lineamientos para el Diseño Sismo Resistente de Puentes</i> _____	22
<u>Demanda Sísmica</u>	23
<i>Descripción geológica y tectónica de las Zonas Sísmicas</i> _____	25
Zona II. _____	25
Zona III _____	25
Zona IV _____	26
Tipos de Sitio de Cimentación _____	27
<u>Clasificación y Métodos de diseño estructural</u>	29
<u>Puentes Simples de un solo Tramo</u>	30
<u>Análisis No Lineal por Elementos no Finitos</u>	31
<u>Líneas de Influencia</u>	32
<u>Capítulo III: Marco metodológico</u> _____	33

<u>Solicitud de Diseño</u>	<u>33</u>
<u>Estado del Proyecto</u>	<u>33</u>
Guía para la determinación de la condición de puentes en Costa Rica mediante inspección visual _	34
Información Hidráulica _____	37
Diseño sismorresistente _____	37
Materiales _____	38
<i>Capítulo IV: Análisis de Resultado</i> _____	<u>39</u>
<u>Orden se servicio</u>	<u>39</u>
<u>Localización del Puente</u>	<u>39</u>
Estudio de estructura existente _____	40
<u>Dimensiones Preliminares del Puente y Propuesta de Materiales</u>	<u>43</u>
Croquis de las dimensiones actuales del puente _____	43
Croquis dimensiones propuestas del nuevo puente _____	44
Propuesta de Superestructura del Puente _____	44
Accesorios de la Superestructura _____	46
<u>Propuesta de Subestructura</u>	<u>46</u>
Determinación de la demanda sísmica según los Lineamientos _____	46
Clasificación Operacional _____	46
<i>Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones</i> _____	<u>48</u>
<u>Conclusiones</u>	<u>48</u>
<u>Recomendaciones</u>	<u>49</u>
<u>Referencias bibliográficas</u>	<u>50</u>

Tablas e ilustraciones

Tabla 1	27
Tabla 2	27
Tabla 3	35
Tabla 4	36
Ilustración 1	10
Ilustración 2	24
Ilustración 3	26
Ilustración 4	40
Ilustración 5	42
Ilustración 6	43
Ilustración 7	44
Ilustración 8	45

Dedicatoria y Agradecimiento

Con todo el amor, quiero dedicarle esta tesis a mis dos hijas, que han sido la fuente de inspiración, para brindarles el ejemplo de que nunca es tarde para empezar un proyecto de superación profesional y personal. Esto con el fin de motivar a mis hijas a despertar el interés por el estudio académico y lograr la superación personal de adquirir los conocimientos técnicos que funcionarán como herramienta para cumplir sus metas de vida.

Además, dedicarle a los docentes y directores de carrera, que han sido parte de la enseñanza académica y profesional, al compartir sus conocimientos y experiencia profesional para la formación de nuevos profesionales, los cuales brinden grandes aportes al país y al mundo.

Quiero agradecer a mi esposa que ha estado a mi lado en esta etapa universitaria y ha sido pilar de apoyo incondicional para nunca desfallecer, a pesar de las adversidades y limitaciones que se presentaron en todo el proceso académico. Asimismo, agradezco sus consejos al alentarme a seguir adelante con todo el proceso de estudio e investigación del trabajo final de graduación.

Agradecer a excompañeros universitarios y amigos cercanos, que me han dado palabras de aliento en los momentos difíciles y han sido un apoyo emocional en el proceso investigativo, incentivo que todos necesitamos para enfrentar las adversidades presentadas en el proceso.

Resumen

Con la finalidad de presentar un trabajo investigativo para la propuesta de una ampliación del puente en calle Cambronero, sobre el cauce del Río Limón, la Municipalidad de Alajuelita propone realizar el proyecto con la finalidad de las mejoras viales que se proyectan en el plan ejecutor de la dirección Vial del municipio.

El puente actual presenta deficiencias en la capacidad de demanda, siendo un puente de un carril, en una vía cantonal de dos carriles, un carril por cada sentido de la vía. Teniendo la necesidad de ampliar las características del puente a uno de dos carriles, con la finalidad de mejorar las condiciones de la infraestructura general del cantón.

Se plantea el objetivo general de realizar una propuesta de ampliación del puente y se crean los objetivos específicos, que serán las herramientas para llegar al cumplimiento del objetivo general, como lo son investigar las normativas nacionales e internacionales vigentes en Costa Rica en el tema de administración y diseño de puentes.

Se realizan las investigaciones de los entes ejecutores a cargo de la administración y fiscalización de los diseños de la red vial, los cuales son el Ministerio de Obras Públicas y Transportes, el Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos. Por otra parte, se identifica el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, el cual se encarga de realizar investigaciones y colaboraciones en el desarrollo de manuales técnicos referentes en diseño, mantenimiento e inspección de las infraestructuras viales.

Se logra determinar que el CR-2020, los lineamientos y sus comentarios del Colegio De Ingenieros y Arquitectos son los dos documentos oficiales que guían al profesional y estandarizan los procedimientos; los mismos hacen referencia en sus artículos a la norma AASTHO LFRD. Actualmente, la norma vigente es la AASHTO LRFD 2020, novena edición, la misma no se encuentra abierta para el profesional y esta trabaja bajo una licencia que no está accesible en costo para estudiantes y profesionales que no se dedican a diario en el diseño de puentes.

Por esta razón, no es posible realizar una investigación profunda para el diseño estructural de puentes para Costa Rica, pero se realiza toda la recopilación teórica posible de una guía para

entender y realizar un planteamiento teórico que funcione como inicio, para que una empresa consultora realice los estudios y diseños estructurales para el puente por ampliar.

Capítulo I: Problema

Tema General

Presentar una propuesta de ampliación para el puente en calle Cambronero, en el cantón de Alajuelita, con la finalidad de ampliar la capacidad de servicio de la infraestructura vial.

Planteamiento del Problema

Los primeros caminos de Costa Rica eran calles de tierra, en los que la población se movilizaba a pie, a caballo, mula o carreta. Con una movilidad que, comparada con los tiempos y facilidad del presente, se percibe como lenta y de muchas dificultades, donde, para movilizarse dentro de los pueblos del Valle Central, la duración era de alta cantidad de horas y, en algunos casos, de días. El trasladarse de la capital a pueblos alejados u otras provincias significaba días de travesía, en carreteras diseñadas empíricamente.

En las historias que nos relatan antepasados, se aprecia cómo la expansión de los pueblos se dio con grupos de personas que, en búsqueda de nuevas tierras para la realización de actividades agrícolas, ganaderas o de vivienda, abrieron caminos con herramientas rudimentarias entre bosque, montañas y valles del país.

Tanto en el pasado como en la actualidad, estos pueblos han presentado un crecimiento que, en la mayoría de los casos y de una forma desmedida, han poblado algunos sectores con una alta densidad de habitantes, lo cual crea la necesidad de ampliar la infraestructura pública, así como los servicios de primera necesidad, comercio y la red vial.

Un ejemplo de esta expansión y crecimiento es el cantón de Alajuelita, pues los primeros pobladores llegaron cerca del año 1650, estableciéndose inicialmente en la Boca y expandiéndose en sus alrededores, hasta llegar al lugar conocido como El Monte, donde es actualmente

Alajuelita. La primera calle del cantón se construyó el 9 de noviembre de 1832 y la construcción del primer puente terminó el 14 de enero de 1833.

Como es común en nuestro país, se encuentran muchas estructuras de la infraestructura vial que satisfacían a una demanda muy baja de uso, esto llevó a la construcción de una infraestructura vial que, para el presente, es obsoleta en la capacidad de servicios. Este es el caso del puente localizado en calle Cambronerero sobre el Río Limón.

Ilustración 1

Puente Existente



El mismo presenta una deficiencia en la cantidad de carriles con respecto a la calle en servicio que une, la cual tiene dos carriles: uno para cada sentido; y el puente con un cancho de cuatro metros incluyendo las barandas, cuenta con un carril reversible, el cual es regulado por una señal de Ceda. Esto provoca una problemática de congestionamiento vial y social, que incrementa

la accidentabilidad en la zona y la violencia entre la población por la disputa del uso del espacio público.

Pregunta de Investigación

¿Con el diseño que se proponga, para la ampliación a dos carriles del puente sobre el Río Limón, en calle Cambronero, se podrá mejorar la problemática de capacidad del puente?

Objetivo General

Diseñar la ampliación del puente, mediante la normativa nacional, con la finalidad de cumplir con los requisitos estructurales y sismorresistentes de puentes.

Objetivos Específicos

Con la finalidad del cumplimiento del objetivo general, se presentan los siguientes objetivos específicos:

1. Recopilar las diferentes normas técnicas estructurales y sismorresistentes de Costa Rica al reunir los diferentes manuales de las entidades gubernamentales para el cumplimiento de los requisitos mínimos de diseño.
2. Clasificar el puente en investigación, utilizando la información recopilada con la finalidad de entender el tipo de estructura a diseñar.
3. Identificar las normas y lineamientos de diseño de puentes, analizando las normas vigentes en Costa Rica, para un correcto diseño de la infraestructura a intervenir.
4. Diseñar la ampliación arquitectónica y estructural con referencia a la información recopilada para ser plasmada en planos finales.

Aspectos relevantes de la investigación

La presente investigación busca solucionar una problemática en la infraestructura vial con beneficios secundarios en la búsqueda de soluciones sociales de la movilidad urbana, donde los beneficios buscan acaparar a los habitantes locales y comercio en general, abriendo una mayor facilidad de tránsito y disminuyendo las dificultades de tránsito vehicular, al mejorar la alineación del puente con el eje de la carretera y ampliar su capacidad de servicio a la demanda de uso.

Justificación

Con la finalidad de crecimiento profesional y personal, se busca un proyecto de investigación que tenga un beneficio positivo a la comunidad; por lo tanto, se busca un proyecto en los planes de ejecución a corto plazo del gobierno de local del cantón de Alajuelita, donde cuentan con la necesidad de mejoras en la red vial. La misma ha estado en un proceso de mejoras en los últimos años, en el que han intervenido todos los elementos que conforman el diseño de las vías de comunicación, tanto los carriles de circulación vehicular como aceras y cordón.

Este trabajo busca contribuir con las mejoras que se han estado presentado en los últimos años por parte del Departamento de Unidad Técnica de Gestión Vial.

Alcances del proyecto

La presente investigación tiene como finalidad la presentación de la propuesta de ampliación de un puente simple de un solo tramo, con lo que se visualiza una solución a la necesidad de la Municipalidad de Alajuelita de mejorar la red vial cantonal.

Para lograr el objetivo general es necesario llevar en marca la recopilación de las normas de diseño nacional e internacionales vigentes, para un correcto cumplimiento con los requisitos mínimos de diseño, por lo que se indaga en las entidades gubernamentales correspondientes las

diferentes leyes y normativas vigentes y se busca acceso a las guías de diseño internacionales que son referencia para los códigos costarricenses.

Con el acceso a las normas, se realiza una propuesta teórica de ampliación a la infraestructura del puente, que será plasmada en un preliminar para ser estudiado por el Gobierno local del cantón de Alajuelita. El mismo no será un diseño definitivo constructivo.

Limitaciones del proyecto

En Costa Rica, las normas de diseño son basadas en investigaciones de países desarrollados con infraestructura más avanzada y laboratorios, para ser sometidos a pruebas técnicas de diseño y construcción antes de ser puestas en práctica en campo. Estas normas tienen un acceso limitado, pues, en la mayoría de los casos, tienen un acceso restringido a través de una membresía pago, es decir, sin acceso abierto al público en general y al enfoque académico.

A nivel nacional, los entes ejecutores en el ámbito de infraestructura vial no otorgan el permiso para la utilización de las normas internaciones referentes a los lineamientos para el Diseño Sismo Resistente de Puentes y el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes CR-2020. Los mismos hacen referencia a las normas AASTHO LRFD.

Las Normas AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2020) son las vigentes a nivel internacional y nacional, las mismas no se encuentran para el público en general y no cuentan con licencias estudiantiles.

La Investigación presenta la limitante de colaboración de la municipalidad correspondiente, respecto a realizar los estudios necesarios y básicos para ejecutar una propuesta concreta de la estructura en estudio. Estos estudios preliminares, como lo son el estudio de suelos

para puentes y estudios hidráulicos, son necesarios para un correcto prediseño según las normas nacionales e internacionales.

Además, se carece de asesoramiento técnico de las entidades ejecutoras para estudiantes y profesionales en formación académica.

Antecedentes

Antecedentes Internacionales

Como primer antecedente, se presenta el documento del Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana. (2019), titulado “Premiada la ampliación del Puente de Rande como la segunda mejor estructura del mundo”. En el año 2015, se inició la ampliación del puente de Rande y se finalizó en el año 2017, con la nueva puesta en servicio el 30 de diciembre del año en mención.

La misma se realizó con el puente en servicio durante toda su ejecución y consistió en aumentar su capacidad, al aumentar a dos carriles más, construidos al costado del puente existente, esto logró un aumento de capacidad del puente del 40%. La Ampliación de Puente Rande de estructura atirantado con una longitud total de 704 m y 400 m de luz de vano principal, es la primera obra sin antecedentes similares en obras de este tipo en el mundo.

En este proyecto se refleja el resultado de la búsqueda de aumentar la capacidad de servicio de la infraestructura vial y las soluciones tomadas a problemas de congestión vial en proyectos de gran envergadura.

Un segundo antecedente es el de la Presidencia de la República (2016): “Nuevo puente sobre el río Virilla en Santa Ana y Ruta 32”. La obra de ampliación del Centenario de Sevilla, inició en el año 2021, con un tiempo estimado de 27 meses; la obra consiste en la ampliación de

tres carriles por sentido para un total de seis carriles, la cual también contempla el reforzamiento de la cimentación y nuevas zapatas. Por la envergadura del proyecto, se deberán colocar nuevas estructuras metálicas para el soporte de los nuevos carriles. La empresa encargada de la obra es la empresa sevillana Tecade, empresa internacional nacida en Utrera.

Por su gran envergadura, la similitud con el proyecto es difícil de apreciar. Pero ondeando a detalle, se puede apreciar la intervención en la logística, cuyo enfoque es un análisis de cimentaciones y estructuras adicionales para la colocación de las superficies de rodamiento. Por lo tanto, con el presente proyecto se deben tomar medidas similares, como mejorar los bastiones y ampliar la losa del puente, con la finalidad de aumentar a un carril por sentido.

En un tercer antecedente, Ameneiro (2022) presenta “Así es la ampliación del puente del Centenario que necesita más de dos años de obras. Diario de Sevilla”. El proyecto de ampliación del Puente de A Pasaxe fue impulsado en el año 2020 por el gobierno local, con un tiempo estimado a 18 meses de ejecución para las obras de Sol y Mar, las cuales el proyecto debe ser sometido a este, para poder ser ejecutado, es estimaba que para el año 2022 se iniciara los trabajos de ampliación.

El proyecto se construiría a un lado de la estructura existente que actualmente soporta un flujo de 90 000 vehículos diarios. El nuevo puente adyacente tendrá las mismas medidas del actual, con un ancho de 25 m y 225 m de largo. Al finalizar el proyecto, cada sentido tendrá cuatro carriles, espacio para bicicletas, peatones, arcenes y pasarelas para acceso a los paseos marítimos de la zona.

Este proyecto se podría asemejar al proyecto final si se considera construir un puente adjunto que diera la solución a la capacidad de la vial, pero aun tomando la decisión de hacer un

solo puente de dos carriles y demoliendo el existente, da una similitud, integrando el paso peatonal existente y un paso para bicicletas a la solución final del proyecto.

Antecedentes Nacionales

En un primer antecedente nacional, se analiza uno de la Presidencia de la República (2020), titulado “Inicia ampliación de puente sobre Río Alajuela”. En el año 2020, el Consorcio OBIS Ruta 1 CPC, realizó y ejecutó el diseño de la ampliación del puente sobre el río Alajuela, el cual era parte del primer lote de obras del Programa de Obras Impostergables del Fideicomiso Ruta Uno.

El proyecto consistió en la construcción de un nuevo puente de tres carriles, el mismo se ejecutó paralelo al existente, el cual, posteriormente, fue demolido para ser construido otro nuevo de tres carriles; por lo tanto, la ampliación finalizó completando seis carriles, quedando así tres carriles por sentido.

El proyecto presenta similitudes con el proyecto en curso por su objetivo de mitigar el congestionamiento vial en el cruce que comunica la ruta uno con el Aeropuerto Juan Santamaría.

Como segundo antecedente: “Nuevo puente sobre el río Virilla en Santa Ana y Ruta 32” (Presidencia de la República, 2016). En el año 2016, se anunciaron los detalles finales de las obras de ampliación de los puentes sobre el río Virilla en Santa Ana y Ruta 32, estos proyectos consistieron en la construcción de puentes nuevos paralelos a los existentes para aumentar la capacidad vial de la ruta 32 y ruta 147.

El diseño del puente sobre la ruta 32 consistió en un puente de tres carriles para aumentar la ruta a cinco, el resultado es el puente nuevo en función sentido Limón- San José y el puente existente de dos carriles sentido San José-Limón

El diseño del puente sobre la ruta 147 consistió en la ampliación a cuatro carriles de la ruta, construyendo un puente aguas debajo de dos carriles, quedando la ruta y puentes a dos carriles por sentido.

La similitud con el proyecto efectuado y el proyecto de investigación es el resultado de la búsqueda de la eliminación del congestionamiento vial presente en las diferentes rutas nacionales y cantonales.

Un tercer antecedente es el de Municipalidad de Heredia (2022): “Municipalidad adjudicó la ampliación de puente sobre Río Pirro”. A inicios del 2022, El Concejo Municipal de Heredia presentó el proyecto de ampliación del puente sobre el Río Pirro, adjudicado a la empresa CODOCSA S.A., entre cuadro empresas participantes, por medio de la plataforma SICOP. El proyecto consiste en la ampliación de puente de dos carriles a cuatro.

El aporte de este antecedente a la investigación es la similitud de búsqueda de una solución de problemas de capacidad de la red vial; en este caso, del acceso a Heredia en la Ruta 3. La misma presentaba problemas de capacidad para soportar el flujo vehicular del puente.

Capítulo II: Marco Teórico

Puente

Un puente es una con la función de solucionar la conexión de dos puntos en el trazo de una carretera, para solucionar un accidente geográfico; son diseñados según la función y necesidades por cumplir. Así mismo, según las condiciones topográficas y mecánicas del terreno. El puente puede estar destinado a el tránsito de personas, vehículos o el tránsito de mercancías.

Para el diseño de puentes se pueden encontrar diferentes tipos de estructura y materiales para su elaboración, ambos dependerán de las diferentes necesidades de uso, características geográficas del sitio donde se construirá y las cargas finales de uso a las que estará sometida la estructura. Del mismo modo, se deberá tomar en cuenta los factores naturales a los que estará sometida la estructura, como cargas sísmicas e hidráulicas, si aplicara para cada caso en específico. Los puentes se componen de dos secciones, la superestructura y la subestructura.

Superestructura

La superestructura es el conjunto de elementos que forman la plataforma principal, esta cumplirá la función de servicios para la cual es diseñada y puede estar destinada para tránsito de personas, vehículos o maquinaria de transporte, como trenes de carga y de transporte de personas.

La superestructura está compuesta por la superficie de rodamiento o calzada, tablero, losa, vigas y travesaños que soportan y transmiten la cargas a la subestructura. Este elemento es diseñado para soportar las cargas a las cuales estará sometida, entre las que se pueden mencionar las siguientes: carga viva, carga muerta y carga sísmica.

Tablero

El tablero es el elemento que soporta directamente la carga viva de la estructura, es una losa que puede estar fabricada en diferentes materiales, según sea la función final del puente. Puede estar fabricada de materiales como madera, concreto reforzado, losas pretensadas o rejillas metálicas. Sobre la losa se coloca la superficie de ruedo, la misma puede ser pavimento flexible o rígido. El tablero será soportado por la estructura portante.

Estructura Portante

Está formada por los elementos en donde descansará el tablero; su función es darle soporte a losa del puente y transmitir las cargas de ruedo a la subestructura, por medio de los apoyos situados en los extremos e intermedios del claro o luz del puente. Esta estructura está formada por vigas longitudinales y transversales, según las necesidades de diseño, también se encuentran arriostras y vigas diafragma.

Componentes Adicionales del Tablero

Estos componentes son los que encontramos en la sección de la superestructura que proporcionan funcionalidad al puente, dándole seguridad a los usuarios, estos son las Barandas, barrera, el cordón de Barrera, Desagües de la superficie de rodamiento y demarcación.

Subestructura

La subestructura es el conjunto de elementos que soporta la superestructura y transmiten las cargas transmitidas de esta al suelo. Es un elemento crucial en la durabilidad del puente, ya que da soporte a toda la superestructura y, adicionalmente, soporta otros elementos que afectan la estructura, como lo son las corrientes de agua, erosión y fuerzas sísmicas, factores adicionales a las cargas y peso propio que estarán sometidas a este elemento.

La subestructura se compone por la cimentación, pilares, bastones, los estribos y pilotes. El diseño final de la estructura dependerá de las características topográficas del terreno, propiedades mecánicas del suelo y factores naturales, como carga hidráulica que este sometida en los casos que proceda.

Estribos

Los estribos están destinados a sostener la superestructura y, a su vez, la conecta con el terraplén o borde del terreno. Por medio de los apoyos, recibe las cargas y las transmite a la cimentación.

Bastión

El bastión es un muro ubicado en los extremos del puente y está apoyado en el tramo, por lo que transfiere las cargas a la cimentación inferior y soportan las cargas verticales y horizontales, así como el soporte a los accesos de aproximación.

Pilares

Los pilares son los elementos que soportan el puente en las zonas intermedias, están fabricados en acero, concreto reforzado, madera, entre otros; además, descansan sobre el Tramo que transmitirá las cargas al suelo o si el diseño lo amerita a los pilotes.

Tramo

El tramo da sostén a las pilas, a los bastiones del puente.

Pilotes

Los pilotes hacen referencia a una sección de la cimentación que permite trasladar las cargas a un estrato de suelo con mejores propiedades mecánicas que las capas superiores.

Apoyos

Los apoyos se encuentran entre dos elementos estructurales y estos se encargan de transmitir las cargas entre ellos. Por lo tanto, distribuye las cargas verticales y horizontales que soporta la estructura. Entre algunos factores que los afecta está la temperatura, humedad y tránsito de vehículos.

Los apoyos se clasifican en fijos, móviles y mixtos. Los apoyos fijos son aquellos que no permiten desplazamiento, pero sí permiten rotación; los móviles permiten tanto desplazamiento como rotación, y los apoyos mixtos son aquellos que están constituidos por placas de diversos materiales.

La principal función de los apoyos es transmitir las cargas entre la superestructura y la subestructura, el mismo debe resistir el peso de las cargas vivas y muertas de la estructura, así como facilitar los movimientos de cada eje en la traslación y rotación de los elementos. Entre ellos se encuentra el apoyo de neopreno, que funciona como amortiguador entre la superestructura y la subestructura.

Por otro lado, se encuentran los apoyos articulados, los mismos reaccionan al movimiento provocado a las cargas vehiculares y se clasifican de la siguiente manera:

- Apoyo empotrado, el cual evita el desplazamiento en el plano y el giro en el apoyo.
- Apoyo articulado fijo, el cual permite el giro alrededor de la articulación, pero evita el movimiento en el lugar.
- Apoyo deslizante, el cual no permite giro y desplazamiento en el plano del terreno.
- Apoyo articulado móvil, el mismo permite giro en la articulación y desplazamiento en el lugar en cual de desplaza el terreno donde se encuentra el apoyo.

Legislación Nacional

En el marco legal, para la ejecución de obras de entorno vial, tanto públicas como privadas, el país cuenta con dos guías para el manejo, diseño, ejecución y administración. La mismas bajo la colaboración de entidades gubernamentales, profesionales, especialidades, unidades de investigación de universidades estatales, quienes han logrado la realización de estos manuales.

Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes CR-2020

El Ministerio de Obras Públicas y Transporte tiene entre sus funciones la planificación, administración, construcción y mantenimiento de la infraestructura vial. Con la finalidad estandarizar los diseños, procedimientos constructivos que utilizan los profesionales y empresas en el ámbito nacional, el ministerio creó el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes CR-2020. El mismo debe ser utilizado por toda institución gubernamental y privada que administre o ejecute obra pública o privada en infraestructura Vial.

El documento mencionado tiene como objetivo principal plasmar las especificaciones técnicas para unificar el criterio de los profesionales en el proceso de ejecución de la obra vial. En congruencia, la ingeniería vial está en constante desarrollo, por lo cual, en procura de mantener la innovación y mejora constante de los procesos, la investigación resalta como un pilar primordial en el diseño y construcción de infraestructura vial.

Lineamientos para el Diseño Sismo Resistente de Puentes

El Comité de Puentes del Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos, ante la urgencia de Costa Rica de contar con un Código Sísmico de Puentes, se ha dado a la tarea de crear

Lineamientos para el Diseño Sismo Resistente de Puentes momentáneamente, mientras se realizan las investigaciones pertinentes para crear un código específico para la región.

Estas reglas descritas en dicho lineamiento han proporcionado las herramientas para unificar los procesos de licitación, rehabilitación y diseño sismorresistente de puentes en el territorio nacional. Por otra parte, en un proceso de constante mejora en las investigaciones, estos lineamientos han tenido contantes revisiones, por lo que se logró, por medio del documento Lineamientos para el Diseño Sismo Resistente de Puentes, informar y aclarar a los profesionales para una aplicación más amplia y segura por parte de los profesionales.

Demanda Sísmica

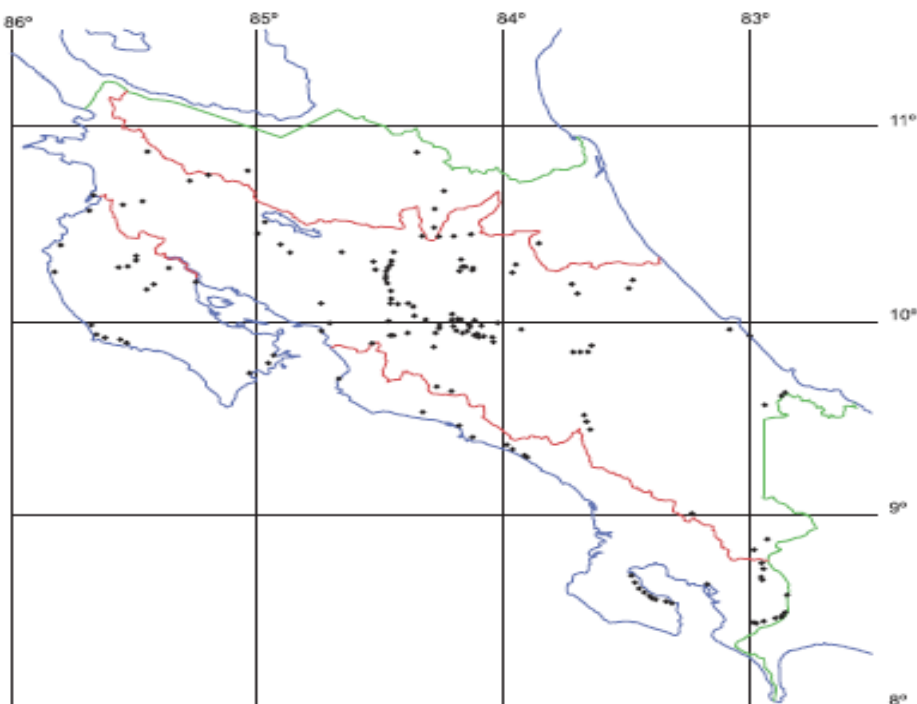
El Espectro de respuesta de aceleración es el medio por el cual caracterizamos la demanda sísmica. Para esto se deben de seguir los lineamientos descritos en el artículo 2.4 y 2.5 de Lineamientos para el Diseño Sismo Resistente de Puentes, en los cuales se describen las generalidades con los que se determinara la demanda sísmica, utilizando la metodología para cada sitio.

El territorio nacional se divide en tres zonas de amenaza sísmicas, denominadas Zona II, Zona III y Zona IV. Esta delimitación es utilizada en el CSCR 2010 vigente y en los Lineamientos, con la diferencia marcada por el periodo de retorno utilizado en el CSCR 2010, la cual es de 500 años y, para los Lineamientos, el período de retorno es de 1000 años. Lo propuesto en la Norma AASHTO LRFD 1033 años equivalente a una probabilidad de 7% en 75 años. Por lo que, para edificaciones normales, la demanda sísmica es menor que la descrita para puentes normales.

La sismicidad producto de la zona de subducción de la placa Coco bajo la placa Caribe, es el principal elemento causante de la amenaza sísmica, la cual se presenta de forma paralela a la Costa Pacífica. La zona de subducción es capaz de crear sismos de magnitud alrededor de 8 grados, adicionalmente, se encuentran fallas corticales que generan en todo el territorio nacional sismos de magnitudes intermedias. En la recopilación de diferentes puntos estudiados a todo el territorio nacional, se logra determinar una alta amenaza en la costa pacífica y una baja amenaza en el noreste del país; por otra parte, se determina una amenaza media en el resto del país.

Ilustración 2

Sitios cuya demanda sísmica ha sido evaluada



Nota. La imagen representa los sitios estudiados para determinar la demanda sísmica.

Tomado de Los comentarios a los Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes (2014, p. 15).

La determinación de la zonificación sísmica de los lineamientos se realizó por la ingeniera María Laporte, con la colaboración del geólogo Gerardo Soto. Los mismos pueden ser consultados en los comentarios al Código Sísmico de Costa Rica 2010. Los puntos de referencia estudiados se encuentran, en su mayoría, en la Figura C2.1-1 de los lineamientos.

Descripción geológica y tectónica de las Zonas Sísmicas

Zona II. Comprende el Caribe Norte y Vertiente Norte, a una profundidad de 2 kilómetros de profundidad se encuentra el basamento de rocas afines al complejo de Nicoya y rellenos sedimentarias. En el sector central de la zona II, se encuentran también rocas volcánicas de arco inactivo de Sarapiquí y, en el norte de la Cordillera de Guanacaste, se hallan rocas volcánicas del arco activo de la Cordillera de Guanacaste; por último, en el sector noreste, se encuentran sedimentos marinos y transicionales estuarinos.

La actividad sísmica está relacionada la Falla Caño Negro y una concentración en el Nido de Parismina, se puede resaltar la baja sismicidad por subducción profundidad con epicentros de más de 100 km de profundidad y de baja a mediana magnitud.

Zona III. Comprende el occidente de la Cordillera de Guanacaste y contempla la Cordilleras de Tilarán, Cordillera Central y Cordillera de Talamanca, desde el Valle del Tempisque hasta Coto Brus, pasando por el Valle del General, los Santos y Valle Central, incluye la Vertiente Caribe Central y Sur.

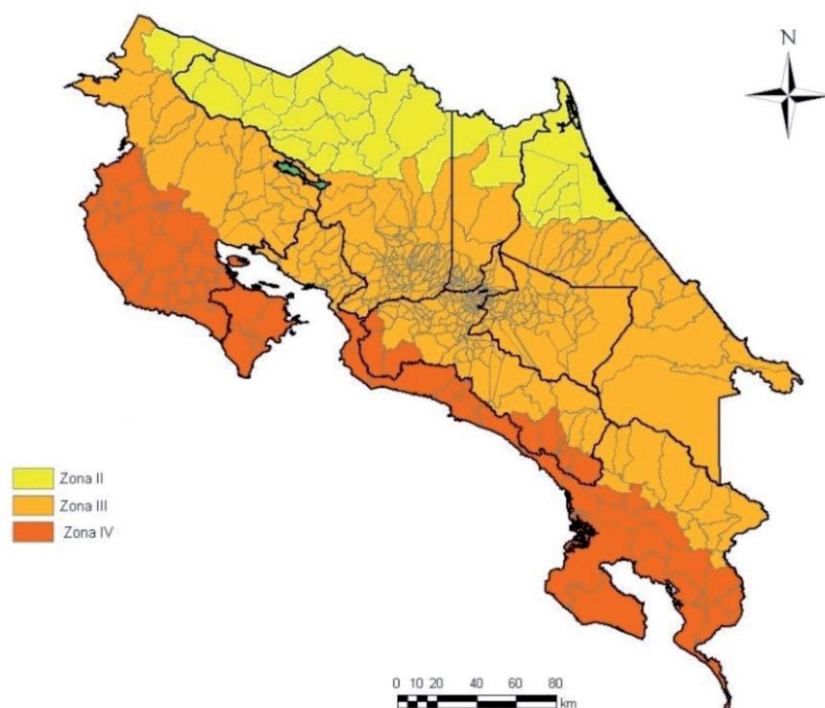
La actividad sísmica está relacionada a la tectónica activa, que incluye fallas transversales y paralelas al arco, las fallas son producto de los esfuerzos resultantes de la colisión de la placa Caribe con la Sierra Oceánica del Coco. Entre la placa Caribe y la Microplaca Panamá se forman un cinturón de fallas y pliegues inversos.

Zona IV. Comprende el Pacífico Central y Pacífico Sur, así como las áreas peninsulares de la Costa Pacífica y promontorios, la roca que se encuentra en las penínsulas es de basamento regional, de origen ígnea oceánica, con presencia de rocas sedimentarias subordinadas. Se puede encontrar una compleja secuencia de rocas sedimentarias que sobre yace al basamento producto de las diversas cuencas. Los suelos más antiguos son de ambientes profundos y los más jóvenes, el resultado de sedimentación aluvial, marino y transicional.

La actividad sísmica es producto de la zona de subducción paralela a la costa Pacífica, donde la placa Coco subduce a la placa caribe a la microplaca Panamá.

Ilustración 3

Zonas de amenaza sísmica



Nota. La imagen representa la división de zonas de amenaza sísmica. Tomado de los lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes (2013, p. 21).

Tipos de Sitio de Cimentación

Los tipos de sitio para la cimentación deben clasificarse basándose en la rigidez del medio soportante, utilizando el valor promedio de velocidad de onda cortante, en los 30 m superficiales del perfil estratigráfico. La clasificación se divide en cinco niveles, los cuales se detallan en las Tabla 2.3-1 y la tabla 2.3-2 de Lineamientos para el diseño sismorresistente de puentes.

Tabla 1

Clasificación del sitio geotécnico de cimentación con base en la velocidad de onda cortante

TABLA 2.3-1. Clasificación del sitio geotécnico de cimentación con base en la velocidad de onda cortante

Sitio geotécnico de cimentación	Perfil estratigráfico	Velocidad de onda cortante promedio ponderada en los 30 m superficiales (\bar{v}_s)
S_1	Roca	$760 \text{ m/s} < (\bar{v}_s)$
S_2	Suelo muy denso y roca suave	$360 \text{ m/s} < (\bar{v}_s) \leq 760 \text{ m/s}$
S_3	Suelo rígido	$180 \text{ m/s} < (\bar{v}_s) \leq 360 \text{ m/s}$
S_4	Suelo suave	$(\bar{v}_s) < 180 \text{ m/s}$
S_5	Sitios que requieren de una evaluación específica de la respuesta sísmica según la investigación preliminar	
\bar{v}_s = velocidad de onda cortante promedio ponderada para los 30 m superiores del perfil de suelo como está definida en el inciso 2.3.2		

Nota. Tomado de los lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes (2013, p. 24).

Tabla 2

Clasificación del sitio geotécnico de cimentación con base en la resistencia del medio

TABLA 2.3-2. Clasificación del sitio geotécnico de cimentación con base en la resistencia del medio

Sitio geotécnico de cimentación	Número de golpes de la prueba SPT, promedio ponderado de los 30 m superficiales (N)	Resistencia al corte no drenada, promedio ponderado de los 30 m superficiales (\bar{s}_u)
S_2	$50 \leq (N)$	$100 \text{ kPa} < (\bar{s}_u)$
S_3	$15 \leq (N) < 50$	$50 \text{ kPa} < (\bar{s}_u) \leq 100 \text{ kPa}$
S_4	$(N) < 15$	$(\bar{s}_u) \leq 50 \text{ kPa}$
S_5	Cualquier perfil con estratos de turba o suelo altamente orgánico con espesor mayor de 3.0 m, arcilla de plasticidad muy alta (IP>75) con espesor mayor de 7.5 m o arcilla suave o de mediana rigidez con espesor mayor de 30 m	

Nota. Tomado de los lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes (2013, p. 24).

La categorización del sitio debe realizarse bajo datos geotécnicos sustentados; en caso de faltante de datos de velocidades de onda cortante para el sitio en estudio, se pueden utilizar parámetros geotécnicos, como el valor de golpes en la prueba de penetración, en el caso de suelos no cohesivos y en el suelo cohesivo se utilizará el valor de resistencia no drenada. Con la excepción de que, para proyectos de gran magnitud, se debe usar la velocidad de onda cortante por ser el parámetro más importante en la categorización del sitio.

AASHTO LRFD (2009) hace la sugerencia el procedimiento para categorizar el sitio. Este procedimiento se ha adaptado según las características el suelo en Costa Rica, por lo tanto, la categoría S_1 se omite al ser un suelo no presente o de escasa presencia en territorio nacional.

Como paso inicial, es importante identificar si el suelo pertenece a las categorías S_2 , S_3 y S_4 , si fuese el caso de que el sitio es clasificado como S_5 , se deben realizar estudios específicos para evaluar el espectro de diseño y utilizar alternativas correctivas o desechar el sitio.

Con la información del estudio de suelos, se debe clasificar el sitio tomando en cuenta uno de los tres parámetros, en la velocidad de onda cortante promedio ponderada, la resistencia a la penetración estándar promedio ponderada o la resistencia no drenada promedio ponderada. Siempre debe prevalecer el parámetro de la velocidad de onda cortante como principal, para categorizar, pero si existe diferencia en la clasificación por alguno de los otros valores, se debe utilizar el suelo más blando.

En el caso de diseños preliminares en los que no se cuente con la información apropiada para categorizar el sitio y no exista evidencia de la presencia de características que lo indiquen, se

debe categorizar en S_4 y S_5 . Se puede utilizar la categorización de S_3 para el diseño preliminar; no obstante, para el diseño definitivo, se deberán realizar los estudios geotécnicos del perfil que determinen la estratigrafía y parámetros indicados en las tablas 2.3-1 y 2.3-2 de los Lineamientos.

Clasificación y Métodos de diseño estructural

Los puentes se categorizan según su importancia operacional, basándose en criterios de la importancia del desempeño que tendrá el puente después de un evento sísmico de importancia. Por lo tanto, a cada categoría se le asigna un valor que modifica el periodo de retorno. Los puentes se clasificarán en puentes críticos, puentes esenciales, puentes convencionales y otros puentes.

Los puentes críticos, por su importancia operacional, se pretende que, después de un sismo, este permanezca en funcionamiento para todo tipo de vehículo, por eso se le asigna un valor de importancia operacional de 1,25 y con un periodo de retorno de 2500 años aproximado. Los puentes esenciales y convencionales tienen el objetivo de que, después de un evento sísmico, puedan ser utilizados como mínimo para vehículos de emergencia, estos son diseñados para un periodo de retorno de 1000 años. Los otros puentes, al no implicar un gran impacto en la sociedad al fallar después de un evento, se considera aceptable diseñarlos con un periodo de retorno de 500 años. En la tabla 3.1 de los Lineamientos se detallan las características que debe tener el puente para elegir la categoría.

Para el diseño sismorresistente se pueden emplear tres mecanismos de diseño plástico, los cuales deben ser evidentes en el diseño para ser identificados claramente. El tipo 1 es una subestructura dúctil complementada con una superestructura elástica. El tipo 2 es una subestructura esencialmente elástica y una superestructura dúctil. El tipo 3, se refiere a subestructuras con el mecanismo fusible entre ambas y una superestructura elástica.

Por otra parte, se debe categorizar el diseño sísmico y zonas de desempeño, las mismas con la finalidad de erigir los requisitos de diseño y análisis de puentes. Para tal fin debe emplearse las tablas 3.2 y 3.3 de los Lineamientos.

Por otra parte, se debe contemplar los factores de modificación de la respuesta de carga, los cuales utilizan las modificaciones hechas en los Lineamientos en la tabla 3.4 de los lineamientos, tomando en cuenta la importancia del puente. Esta tabla modifica el artículo 3.10.7 de las especificaciones AASHTO LRFD 2012.

Para el análisis estructural, se debe utilizar dos métodos: el método de fuerzas y el de desplazamientos. Los mismos se deben realizar siguiendo el procedimiento descrito en los anexos 1 y 2 de los Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes.

Puentes Simples de un solo Tramo

El diseño sismorresistente de puentes de un solo tramo se puede realizar bajo las descripciones anteriores, utilizando el capítulo 2 y 3 de los Lineamientos; sin embargo, para puentes de un solo tramo, se permite un análisis más simplificado siempre y cuando cumpla con los requisitos de características para ser un puente de un solo tramo, así como su clasificación de importancia operacional.

Los puentes de un solo tramo deben cumplir con varias etapas de diseño descritas en los Comentarios de los Lineamientos en el capítulo C4.1 Generalidades. Una característica primordial es que estos puentes no deben estar en la categoría de críticos y su respuesta a un sismo debe ser fácilmente predecible. Uno de los objetivos es simplificar diseñando solamente los bastiones y las conexiones de la superestructura a los bastiones. Por lo tanto, se debe excluir

los puentes tipo armadura, de este tipo de puente. También se excluyen los puentes con bastiones integrados o semi-integrados.

Al lograr identificar y clasificar el puente como un puente de un solo tramo, se puede seguir el proceso de diseño sismorresistente basado en el capítulo 4 de los Lineamientos

Análisis No Lineal por Elementos no Finitos

El análisis lineal es el método más común para elementos estructurales, donde se hace un análisis de equilibrio estático, cuyos resultados están directamente afectados por las cargas directas a los elementos analizados. El análisis no lineal no está basado en el resultado que refleja el análisis de la estructura al someterla a cargas, sino en el resultado de las propiedades físicas de los materiales no lineales.

Al análisis de los comportamientos no lineales de los materiales se logra determinar la pendiente no lineal de la relación entre la fuerza aplicada y las deformaciones. Este análisis se realiza en elementos específicos y también en el comportamiento general de la estructura.

Estos cálculos son realizados por medio de iteraciones, los cuales son necesarios programas con capacidades altas de cálculo para realizarse. En el análisis de diseño de puentes es utilizado tanto para el análisis de los elementos de la estructura como las características soportantes de los suelos. Respecto a cimentaciones profundas, el análisis de elementos finitos contribuye a entregar resultados que reflejen cómo las cargas de la estructura afectan la resistencia del suelo y cómo el suelo tiene influencia en la resistencia de la estructura a las cargas que es sometida.

Un tema importante en este estudio es la rigidez de los materiales, los cuales varían en su valor en el proceso del cálculo de las iteraciones. Dando como resultado un gráfico no lineal del comportamiento de los materiales y elementos que construyen la estructura.

Líneas de Influencia

Las líneas de Influencia son el análisis de las cargas móviles que afectan la estructura en estudio. Para un puente, se encuentran cargas móviles, como lo son la carga vehicular. La carga móvil no afecta la estructura como una carga puntual o una carga distribuida. Estas cargas móviles generan variaciones en las reacciones, según se desplazan por las estructuras, generando valores diferentes en el cortante y momento en los puntos de reacción. Para encontrar los valores máximos, se debe analizar las secciones generadas, ubicando la carga en todos los puntos de la estructura.

Capítulo III: Marco metodológico

En los proyectos civiles de diseño y construcción, se pueden seguir diferentes métodos para lograr el objetivo final, siempre siguiendo las normas nacionales e internacionales que así lo ameriten, según la legislación de cada país. En el caso de esta investigación y con el propósito de realizar el diseño preliminar, se explica la siguiente metodología.

Solicitud de Diseño

La solicitud de diseño es el primer paso para que el profesional empiece a realizar en el marco administrativo un listado de posibles interrogantes, necesidades y retos que demande el proyecto. Con este marcar la línea de trabajado para cumplir los objetivos solicitados.

Estado del Proyecto

Es la primera etapa que debe realizarse en todo proyecto de remodelación o ampliación, donde se puede evaluar la estado físico y estructural de la infraestructura en análisis; otro punto que se puede valorar es el funcionamiento operativo del mismo y las necesidades de demanda a las que está sometido.

En el caso en estudio, se debe plantear el porqué se hace la solicitud de diseño, cuál es la demanda operacional del puente y, siguiendo los manuales de procedimiento de las instituciones competentes, realizar una valoración visual, la cual debe seguir la Guía para la Determinación de la Condición de Puentes en Costa Rica mediante la Inspección Visual, Publicado por Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales en el año 2015.

La clasificación del estado de un puente por medio de la guía está sujeta a evaluaciones visuales, lo que limita el alcance, que conlleva a una inspección visual. La eficiencia de la evaluación dependerá de la experiencia y criterio profesional que pueda adquirir el evaluador con

el pasar del tiempo y experiencias adquiridas en anteriores proyectos. Como un complemento a la evaluación y cuando se tenga al alcance, se evaluarán los planos constructivos para comprender mejor la estructura por evaluar, sin someter a ello la capacidad de carga y la capacidad de carga hidráulica, entre otros aspectos de evaluación de cálculos estructurales.

Guía para la determinación de la condición de puentes en Costa Rica mediante inspección visual

La metodología empleada en la Guía simplifica los métodos internacionales al contexto nacional, con base en los estudios internacionales y a la experiencia adquirida a través de los años por la Unidad de Puentes de Laname, para crear una Guía propia.

En primera instancia, se debe clasificar la importancia de la estructura, siguiendo las pautas de los lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes (2013). Asimismo, se debe estimar la construcción del mismo, así como estudiar los planos constructivos para un mejor entendimiento del comportamiento y tipo de estructura.

En la metodología, se analiza tanto elementos estructurales por medio de apreciación visual, como otros de funcionalidad y accesorios del puente. Se hace una relación de los daños que pueden influir de una sección de la estructura hacia otra, tanto de forma parcial como permanente, y de su impacto a funcionalidad estructural que pueda llevar a un colapso de la estructura.

La clasificación final de este método tiene seis niveles, los mismos se ajustan a las condiciones que reflejan los puentes en Costa Rica. Para la creación de estos seis niveles se considera el supuesto que existe un programa de mantenimiento rutinario, en el siguiente cuadro se describe cada categoría y la necesidad de atención (ver Tabla 3).

Tabla 3

Niveles de clasificación de puentes propuestos para Costa Rica

Categoría	Condición	Descripción	
		Integridad Estructural y Seguridad Vial	Necesidad de Atención
1	SATISFACTORIA	Estado bueno. Sin daño o daños son leves. La estabilidad estructural, seguridad vial y durabilidad están asegurados	Mantenimiento rutinario (Debe estar programado para todos los puentes de la Red Vial Nacional)
2	REGULAR	Deterioros ligeros que deben ser tratados por aspectos de durabilidad o progresión del daño. Deficiencias en aspectos de seguridad vial	Reparaciones se programan en conjunto con el siguiente mantenimiento rutinario del puente
3	DEFICIENTE	Deficiencia importante pero los componentes del puente funcionan aún de forma adecuada. Daño o defecto en seguridad vial peligroso	Es necesario programar la reparación previo al próximo mantenimiento rutinario
4	SERIA	Puente estable pero con deterioro significativo en uno o varios elementos estructurales primarios, o falla en secundarios. Si no se trata la proliferación del deterioro, este podría conducir a una situación inestable a futuro. Deficiencia en seguridad vial muy riesgosa para los usuarios	Atención pronta. Se debe atender pronto el puente para detener la progresión del daño. Se debe atender una situación peligrosa en la seguridad vial de forma prioritaria incluyendo el señalamiento de la situación vial riesgosa
5	ALARMANTE	Situación crítica. La estabilidad del puente puede estar comprometida en un periodo de tiempo corto gracias a la progresión del daño. Procurar reparación o tratamiento inmediato para asegurar estabilidad y evitar daños irreversibles en los elementos	Atención prioritaria. Se debe señalar la condición estructural peligrosa del puente y los trabajos de reparación son prioritarios. Evaluar la capacidad estructural residual del puente para juzgar si es necesario restringir la carga permitida
6	RIESGO INACEPTABLE O FALLA INMINENTE	Situación de puente inestable. Riesgo alto de colapso de la estructura. Daño severo en un elemento crítico o daños severos extendidos sobre varios elementos principales del puente. Daño irreversible que posiblemente requiera el cambio del puente o la sustitución de elementos dañados. Condición de deterioro inaceptable en puentes de importancia muy alta	Atención inmediata. Cerrar el puente o restringir el paso de vehículos pesados (según criterio de la Administración). Evaluar necesidad de colocación de soportes temporales o un puente temporal. Estudio estructural del puente y propuesta de reparación o cambio del puente

Nota. La tabla refleja las diferentes categorías sus características y necesidades de atención, tomada de Guía para la determinación de la condición de puentes en Costa Rica mediante inspección visual. Programa de infraestructura del transporte (2015, p. 19).

Para lograr la clasificación en alguna de las categorías anteriores, se deben evaluar tres variables:

- Grado de Daño (GD): este clasifica el grado del daño observado, el cual tiene una escala de cero a tres, donde cero corresponde a ningún daño observado, uno corresponde a un daño ligero, dos a un daño moderado y tres a un daño severo, donde puede ser un daño que afecte otros elementos o sea necesario el cambio de este.

- Relevancia Estructural (RE): esta clasificación tiene una escala de uno a cuatro, y está destinada a todos los elementos del puente; los mismos no tienen que ser estrictamente estructurales, sino que estos se evalúan todos los elementos y las posibles repercusiones por la posible falla del elemento y su importancia a la protección de la estructura en eventos naturales

sísmicos e hidráulicos, o por fallas de fatiga y fallas por deterioros propios de la vida útil de cada elemento.

- Factor de Consecuencia de Falla (FCF): es una variable que incluye en sus parámetros la afectación económica, afectación por lesiones y pérdida de vidas de los usuarios y la importancia del puente en el funcionamiento de la carretera a la cual pertenece. Este factor se debe elegir del cuadro 12 de la Guía, el cual se detalla a continuación (ver Tabla 4).

Tabla 4

Relación entre la Relevancia Estructural RE, tipos de falla y niveles de consecuencias

Cuadro 12. Relación entre la Relevancia Estructural RE, tipos de falla y niveles de consecuencias

Tipo de falla probable del puente como sistema	Consecuencias según tipo de Falla							
	Nivel 1 FCF = 0,6	Nivel 2 FCF = 0,8			Nivel 3 FCF = 1,0		Nivel 4 FCF = 1,25	
	Todos	CO	E	CR	E	CR	CR +	CR +
A: Servicio	RE = 1	-	-	-	-	-	-	-
B: Falla elemento secundario o de entorno	-	RE = 2	RE = 2	RE = 2	-	-	RE = 2	-
C: Redundante: Falla de elemento no causaría colapso del puente	-	RE = 3 o 4	RE = 3	-	RE = 4	RE = 3 o 4	RE = 3 o 4	-
D: No redundante: Falla de elemento causaría colapso del puente	-	RE = 3 o 4	RE = 3	-	RE = 4	RE = 3 o 4	RE = 3	RE = 4

Nota. La tabla refleja la relación entre el RE, tipos de falla y el nivel de consecuencia, tomada de Guía para la determinación de la condición de puentes en Costa Rica mediante inspección visual Programa de infraestructura del transporte (2015, p. 19).

En el cuadro 12 de la Guía, se detalla los tipos de falla, los mismos deben ser contemplados en cada elemento en análisis, esto con la finalidad de llegar a la clasificación final del grado del daño.

Como siguiente paso, se debe calificar cada elemento del puente (CE), esta clasificación se realiza por medio de la ecuación $CE_i = \text{entero} \{[(FCF*RE)-1]+GD\} \leq 6$

Donde $GD=0 \Rightarrow CE_i = 1$; $CE_{\min} = 1$ y $CE_{\max} = 6$. Por lo tanto, analizando la ecuación se visualiza la importancia de un buen criterio en la determinación del valor GD para la determinación final del puente.

- Clasificación Global del Puente CP. En esta metodología la asignación corresponde a la ecuación $CP = \text{valor máximo } CE_i$.

En este método se asume la hipótesis de que el puente está formado por elementos independientes entrelazados en sí y que el fallo de un elemento débil puede crear el colapso de la estructura o de una sección.

Información Hidráulica

Con la visita previa al sitio, se debe recabar información hidráulica de importancia, como es la apreciación de los rastros de crecida en el caudal, daños en la estructura existente que puedan servir de evidencia para la nueva propuesta, se deberá recaudar información relevante de historial de la precipitación, en el cual se revisará el caudal de la cuenca.

Diseño sismorresistente

Con la finalidad de cumplir con la normativa nacional, se deben realizar los análisis pertinentes de las características que tienen el proyecto y seguir los lineamientos para una clasificación correcta, según lo indicado en los Lineamientos para el Diseño Sismo Resistente de Puentes, dentro de los cuales se podrá analizar si el proyecto se clasifica entre los puentes de un solo tramo, con la finalidad de simplificar el análisis sismorresistente y realizar el diseño de la subestructura, según el capítulo 4 de Los Lineamientos.

Materiales

Conforme a los análisis previos, se podrán definir los materiales para el proceso constructivo, con los cuales se definen los parámetros de análisis de diseño. Esta definición de materiales dependerá de las condiciones de cada proyecto en estudio y de las necesidades del solicitante. Todos los materiales deben cumplir con las normas internacionales y las características y propiedades descritas en el CR-2020.

Las especificaciones descritas en el CR-2020 deben cumplirse en su totalidad. Por lo tanto, se consideran para el diseño y construcción de este. Los manejos y almacenamientos descritos en el CR-2020 serán responsabilidad del ejecutor de obra y su fiscalización de cumplimiento del contratante.

Capítulo IV: Análisis de Resultado

Orden se servicio

La Municipalidad de Alajuelita, por medio del departamento de Unidad Técnica de Gestión Vial, es la encargada del desarrollo de la Red Vial Cantonal, de las obras de mantenimiento y conservación, por medio de sus 31 funciones, según el artículo 14 en el Decreto Ejecutivo 34624-MOPT.

Dentro de estos planes está el planificar programas de conservación vial, el planificar y desarrollar las obras de desarrollo en la infraestructura vial, así como velar por el cumplimiento y acatamiento del derecho de vial.

Entre sus planes de desarrollo y mejora vial y con la finalidad de mejoras en el flujo vehicular del cantón, se planea la ampliación a dos carriles del puente sobre la quebrada Limón. El mismo presenta la deficiencia en la capacidad de servicio al ser de un solo carril y presentar un alineamiento con los ejes del camino casi perpendicular, provocando una disminución en la velocidad de tránsito.

Localización del Puente

El puente se ubica en el Cantón de Alajuelita, en la Calle Cambronerero en la intersección con el Río Limón. Esta intención se ubica 150 metros al este del cementerio Bosques de Paz.

Ilustración 4

Imagen satelital de Google Earth Pro



Estudio de estructura existente

Con la finalidad de comprender la situación actual del proyecto, se procede a realizar una inspección visual de la infraestructura, siguiendo los parámetros descritos en la Guía para la Determinación de la Condición de Puentes en Costa Rica, mediante Inspección Visual, elaborado por la Unidad de Puentes del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, publicado en el año 2015.

Para una correcta aplicación de la evaluación visual, se debe seguir el capítulo 2 de la Guía, la cual determina la forma de evaluar cada sección y elemento del puente, así como su relación directa con la afectación estructural y de servicio que esta pueda ocasionar en el puente.

Por medio de una visita a sitio, se realiza la inspección visual de la condición del puente sobre el Río Limón en Calle Cambronero en el cantón de Alajuelita. El mismo se clasifica como un puente convencional según Los Lineamientos por sus condiciones actuales de servicios, el

cual se encuentra en una vía cantonal y cuenta con vías alternas, como medida para la circulación de la ciudadanía en una eventual falla estructural y no presenta una afectación socioeconómica para el país y el cantón.

Del puente en estudio no existe documentación que especifique el diseño y método constructivo, así como su año de construcción; en los registros de rendición de cuentas municipales del año 2020, se realizó una mejora al puente con la construcción de las barandas, las cuales sufrieron daños por un accidente de tránsito y se construyó una estructura complementaria para la construcción de un paso peatonal, para mejorar la seguridad de los usuarios y habitantes de la comunidad.

En una inspección al sitio, realizada con la finalidad de obtener una valoración visual, se logra detallar el estado actual del puente y la afectación producto de la cuenca, en ella se enfatiza el buen estado de los elementos renovados en el mantenimiento correctivo por parte del gobierno local y se logra apreciar el deterioro en la subestructura, producto del impacto hidráulico, causado por el caudal de la cuenca y las crecidas de la misma.

Por esta causa, se logra determinar que la cimentación presenta deficiencias que implican que la estructura se debe intervenir prontamente, para evitar el incremento del daño en los bastiones, los cuales presentan efectos de socavación, los cuales no tienen una estructura de protección para evitar tal daño. Estos están siendo protegidos por las rocas presentes en el margen del río, pero no son estrictamente suficientes para evitar una falla en la estructura. En el siguiente cuadro se detalla la evaluación de la estructura.

Ilustración 5

Resultado de estudio visual de la condición de Puente

CALIFICACIÓN DE LA CONDICIÓN DEL PUENTE SEGÚN LA EVALUACIÓN VISUAL							
Nombre del puente	puente Calle Cambronero, Cantón de Alajuelita		Importancia Operacional (LDSP 2013)	Convencionales	Código importancia	CO	
Fecha de Evaluación	7/1/2024		TPD (vch/día)	1400	Edad (años)	1 años	
Año de construcción o diseño			Vida de diseño según código (años)	50 (LDSP 2013)	Vida de servicio remanente	49 ASL 1	
ELEMENTO	RE	GD	DESCRIPCIÓN DE DAÑOS	TIPO DE FALLA	FCF	CE ₁	
SEGURIDAD VIAL	Barra vehicular (Puente)	1	0	No presenta Daños	B	0.80	1
	Barra vehicular (accesos)	1	0	No presenta Daños	A	0.60	1
	Aceras	2	0	No presenta Daños	A	0.60	1
	Señalización Vial	1	0	Señalizan en optimas condiciones	A	0.60	1
	Rotulación Carga/Altura Máxima	No Aplica	0		A	0.60	1
iluminación	1	1	Iluminacion deficiente	A	0.60	1	
Accesorios	Superficie de Rodamiento (puente)	1	0	En buenas condiciones	A	0.60	1
	Sistema de drenaje del puente	1	1	Falta de sistema de drenaje, no comprometen el funcionamiento del puente	A	0.60	1
	juntas de expansión	No Aplica	0		A	0.60	1
ACCESOS	Superficie de Rodamiento (acceso)	1	0	Superficie en Buenas condiciones	A	0.60	1
	Relleno de aproximación	2	0	No presentan erosión	B	0.80	1
	Losa de a aproximación	2	0	No hay acceso visual	B	0.80	1
	Muros de contención en accesos	2	2	inexistente	C		1
SUPERESTRUCTURA TIPO VIGAS	Tablero	3	0	no se apresian fallas	C	1.00	1
	Vigas principales de concreto o acero	3	1	Vigas en buen estado, presencia corrosión superficial	C	1.00	3
	Vigas diafragma de concreto o acero	3	0	en buenas condiciones	B	1.00	1
	Sistema de arriostamiento de acero	No Aplica	0		C	1.00	1
Subestructura	Apoyos	3	0	No se aprecian fallas	B	0.80	1
	Aletones	3	1	Inexistentes en un costado de k puente	B	0.80	2
	Bastiones: Viga Cabezal	3	0	no se aprecian fallas	C	0.80	1
	Bastiones: Cuerpo	3	1	el cuerpo del bastion se encuentra en buenas condiciones	C	0.80	2
	Bastiones: Cimentación	3	2	inexistente, el bastion esta apoyado sobre la roca	C	1.00	4
	Pilas: Viga cabezal	No Aplica	0		C	1.00	1
	Pilas: Cuerpo tipo Columna	No Aplica	0		C	1.00	1
	Pilas: Cuerpo tipo Marco	No Aplica	0		C	1.00	1
	Pilas: Cuerpo tipo Muro o marco con pant...	No Aplica	0		C	1.00	1
	Pila: Cimentación	No Aplica	0		C	1.00	1
ELEMENTOS DE PROTECCIÓN SÍSMICA	Longitud de asiento (pedestales)	No Aplica	0		C	1.00	1
	Llave de corte	No Aplica	0		C	1.00	1
	Cadena/anclaje/postensión externa	No Aplica	0		C	1.00	1
	Dispositivos especiales	No Aplica	0		C	1.00	1
ELEMENTOS DE PROTECCIÓN HIDRÁULICA	Protección de taludes de rellenos	2	2	Inexistentes, en la actualidad la proteccion la realiza la roca existente en el río	C	1.00	3
	Escollera de protección	2	2	Inexistentes, en la actualidad la proteccion la realiza la roca	C	1.00	3
	Protección de socavación en pilas	No Aplica			C		1

CP = 4

SERIA

Puente estable pero con deterioro significativo en uno o varios elementos estructurales primarios, o falla en secundarios. Si no se trata la proliferación del deterioro, este podría conducir a una situación inestable a futuro. Deficiencia en seguridad vial muy riesgosa para los usuarios

Atención pronta. Se debe atender pronto el puente para detener la progresión del daño. Se debe atender una situación peligrosa en la seguridad vial de forma prioritaria incluyendo el señalamiento de la situación vial riesgosa

Dimensiones Preliminares del Puente y Propuesta de Materiales

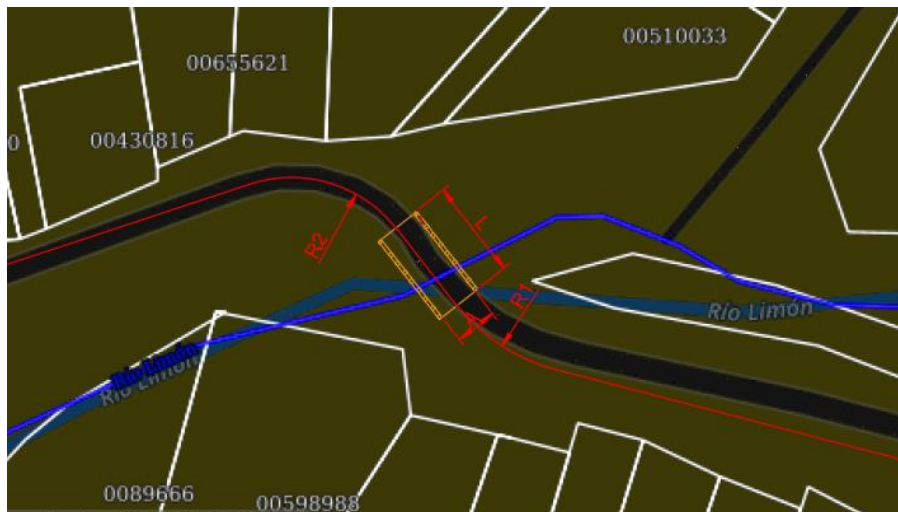
Con la finalidad de entregar una propuesta de ampliación y, después de realizar la inspección visual del puente y la infraestructura vial adyacente, se determina la necesidad del nuevo puente y su alineamiento con los ejes de la carretera; así mismo, como algunos trabajos preliminares de importancia para la realización de la obra en su proceso constructivo.

En un levantamiento en el sitio, se determina que la alineación del puente no es la más óptima, los ejes de la vía no cruzan el cauce del río de una forma perpendicular, pero la alineación del puente sí es perpendicular al cauce. Por lo que el nuevo puente deberá rotar su eje con respecto al existente, con la finalidad de tener una mejor maniobrabilidad al ingresar y salir del puente.

Croquis de las dimensiones actuales del puente

Ilustración 6

Dimensiones de Puente Existente



$L= 8,00 \text{ m}$; $A=4,00 \text{ m}$; $R1=16,00 \text{ m}$; $R2=12,00 \text{ m}$

Croquis dimensiones propuestas del nuevo puente

Ilustración 7

Dimensiones de Puente Propuesto



$L = 11,00 \text{ m}$; $A = 7,30 \text{ m}$; $R1 = 25,00 \text{ m}$; $R2 = 14,00 \text{ m}$

Para la ampliación a dos carriles el (A) ancho de la calzada se propone a 7,30 m para una dimensión de cada carril de 3,65 m de ancho, la rotación del eje del puente con respecto al anterior es de 10° , logrando ampliar los radios de curvatura; el R1 pasa de un valor de 16 m de radio a 25 m de radio y el R2 de 12 m de radio a 14 m de radio. La longitud del puente al rotarlo pasa a medir 11 m de longitud total con un estimado de luz preliminar entre bastiones de 10 m.

Propuesta de Superestructura del Puente

Para la superestructura del puente se tienen diferentes opciones preliminares a disposición del profesional, entre las que se pueden mencionar la opción de superestructura de concreto

reforzado, superestructura de vigas y losa en concreto reforzado, superestructuras vigas metálicas y superestructura combinada, donde se adopta concreto reforzado y estructuras metálicas.

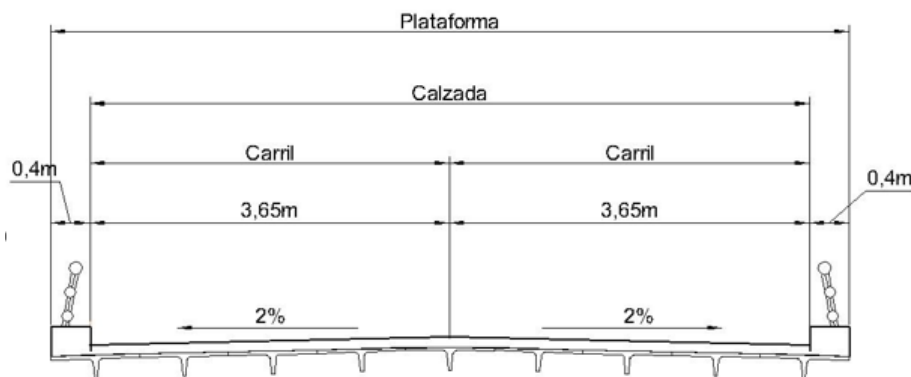
Una solución en el mercado nacional son los puentes prefabricados pretensados y postensados, con losas coladas en sitio; otra opción sin losas coladas en sitio utilizando losas prefabricadas o viguetas tipo T y T doble con espesores, que no necesitan losa colada, solamente sellado de juntas.

Todas las opciones deben ser diseñadas según el puente específico que se esté proponiendo, esto por las variables particulares que refleja cada caso. No existe en el territorio nacional uno con las mismas características, esto porque pueden estar en diferente tipo de zona sísmica.

Por las condiciones de sitio, se propone la opción de utilizar un puente completo prefabricado, el mismo debe ser diseñado por el consultor estructural proveedor del sistema, realizar los estudios de suelo y seguir los lineamientos de diseño sismorresistente de Costa Rica, este último hace referencia en varios artículos a la norma AASTHO RFLD.

Ilustración 8

Sección Transversal de Puente a Proponer



Sección Transversal Puente

Accesorios de la Superestructura

Para las barandas del puente, se deberán diseñar o utilizar sistemas que cumplan con la norma AASTHO LRFD, y deberán ser probadas a escala real contra impacto, según el tipo por elegir. La misma deberá tener un diseño final que direcciona los vehículos, para que se mantengan sobre la estructura y debe ser revisados la resistencia del sistema de fijación, siguiendo los lineamientos descritos en la CR- 2020.

Propuesta de Subestructura

Para la subestructura, se propone utilizar bastiones y cimentación coladas en sitio diseñadas por el consultor estructural, con base a los lineamientos para el diseño sismorresistente de puentes de Costa Rica.

En un levantamiento de sitio, se determina que la altura desde la calzada al fondo del cauce del río Limón es de 4 m de altura. Con esta medida de deberá hacer un diseño preliminar del bastión y su cimentación correspondiente según los datos que se recolecten de los estudios de suelos que se realizarían para iniciar con el proceso de diseño.

Determinación de la demanda sísmica según los Lineamientos

La Zonificación sísmica divide el territorio nacional en tres zonas de demanda sísmica nombradas zona II, III, IV. Por su ubicación en el cantón de Alajuelita y provincia de San José, el puente se encuentra en la zona III, según la tabla 2.1-1 de los lineamientos.

Clasificación Operacional

El puente en propuesta se califica como un puente convencional, el cual no cumple con los requisitos para clasificar entre los puentes críticos y puentes esenciales; ante esto, se encuentra en una vía cantonal, que cuenta con rutas alternas, así que su cierre por falla de un

evento natural no implicaría el impedimento de conexiones cantonales con rutas nacionales o rurales de importancia. Por otra parte, existen rutas alternas donde se podrá desviar el tránsito son afectación al comercio o industrial local.

Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

El objetivo general presenta dificultades para lograr cumplirse algunas limitaciones que presenta la tesis, como es la no colaboración de los entes ejecutores y del gobierno local que realiza la solicitud de proyecto, al no autorizar y facilitar estudios técnicos preliminares, los cuales, a nivel estudiantil, son de difícil acceso, al no contar con el equipo técnico para su realización. El gobierno local no muestra una apertura a información técnica relevante como estudios hidráulicos actuales, estudios de suelos enfocados para diseño de puentes, entre otros diversos que se solicitaron al departamento de Ingeniería Vial.

Los manuales a nivel nacional se encuentran bajo la creación de los entes ejecutores, los cuales presentan artículos referenciados a normas internacionales que no se encuentran a uso público; por lo tanto, a nivel investigativo, crea vacíos para lograr una investigación exitosa y los entes ejecutores no pueden brindar, por derechos de autor, estas normas internacionales a estudiantes y profesionales en general.

Con la información recolectada, se logra identificar que el diseño de puentes en el territorio nacional está basado en normas internacionales, primordialmente normas y prácticas norteamericanas como la AASTHO LRFD, las cuales son necesarias adaptar a las condiciones geográficas y geológicas del país. Labor que ha realizado el Ministerio de Obras Públicas y Transportes, en conjunto con el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.

Para el diseño sismorresistente, se deben seguir los Lineamientos y los comentarios del Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos, que están basados en la norma AASHTO LRFD y adaptados a las condiciones del territorio nacional.

Con toda la investigación, se concluye que para una propuesta óptima del puente se puede realizar un boceto preliminar para que el diseño estructural y final, el cual sea elaborado por un consultor estructural y especializado en Puentes.

Recomendaciones

A la Gobiernos Locales: tener una mayor apertura en la colaboración de las investigaciones tipo tesinas, pruebas de grado y tesis que realizan los estudiantes, con la finalidad de la obtención de niveles de grado, que además contribuyen a la comunidad y al país. Facilitando las herramientas e información al desarrollo investigativo y de resultados en los trabajos de grado.

A las Universidades: implementar herramientas que faciliten a estudiantes y docentes integrarse dentro de la institución para el desarrollo de la investigación con laboratorios, sala de reuniones y otros medios para el mejoramiento del desarrollo integral de las investigaciones.

A la Universidad Central: Implementación de convenios de colaboración entre instituciones gubernamentales y la Universidad Central, que faciliten la relación colaborativa para la realización de trabajos de graduación.

A las entidades Investigativas Internacionales: apertura a las comunidades estudiantiles a niveles internacionales, para facilitar la capacitación exitosa de los futuros profesionales, disminuyendo las limitantes que pueden presentarse en el desarrollo de nuevos profesionales.

Referencias bibliográficas

- Ameneiro, A. (10 enero 2022). *Así es la ampliación del puente del Centenario que necesita más de dos años de obras*. Diario de Sevilla. https://www.diariodesevilla.es/sevilla/obra-Puente-Centenario-ampliacion-desvios-trafico-Sevilla-video_0_1646236938.html
- Bautista, C. (9 febrero 2020). Nuevo impulso para la ampliación del puente de A Pasaxe de A Coruña. Cadena SER. https://cadenaser.com/emisora/2020/03/09/radio_coruna/1583757238_957475.html
- Carrillo, J. (2021). *Línea de Influencia en Puentes*. [Líneas de influencia en puentes - Ingeniería Civil y Administrativa \(ingenieriaconsultoria.com\)](http://www.ingenieriaconsultoria.com)
- Comentarios a los Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes. (2014).
- CR-2020 Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes. (2020).
- Escobar y Martínez. (2021) *Función de los apoyos estructurales para la construcción Soportes para estructuras, los pilares de la construcción | E&M (eymproductostecnicos.com)*
- Garofalo, F. (22 septiembre 2023) *Puentes e Ingeniería Geotécnica por MEF: 2 campos de simulación*. <https://www.inesa-tech.com/blog/puentes-y-geotecnica-por-mef/>
- Gómez, D. (15 septiembre 2021). *200 años de movilidad*. La República. <https://www.larepublica.net/noticia/200-anos-de-movilidad>
- Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes. Marzo 2013
- Manual técnico Holcim Modular Solutions.

Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana. (4 septiembre 2019). *Premiada la ampliación del Puente de Rande como la segunda mejor estructura del mundo.*

<https://www.mitma.gob.es/el-ministerio/sala-de-prensa/noticias/mie-04092019-1812>

Municipalidad de Alajuelita. (22 de mayo 2023). *Historia y generalidades de Alajuelita.*

<https://www.munialajuelita.go.cr/index.php/conozcanos/mn-micanton/historia>

Municipalidad de Heredia. (9 febrero 2022). *Municipalidad adjudicó la ampliación de puente sobre Río Pirro.* [https://www.heredia.go.cr/es/social-wellness/news/obra-](https://www.heredia.go.cr/es/social-wellness/news/obra-publica/municipalidad-adjudico-la-ampliacion-de-puente-sobre-rio-pirro)

[publica/municipalidad-adjudico-la-ampliacion-de-puente-sobre-rio-pirro](https://www.heredia.go.cr/es/social-wellness/news/obra-publica/municipalidad-adjudico-la-ampliacion-de-puente-sobre-rio-pirro)

Presidencia de la República. (19 abril 2016). *Nuevo puente sobre el río Virilla en Santa Ana y*

Ruta 32. <https://www.presidencia.go.cr/comunicados/2016/04/nuevos-puentes-sobre-el-rio-virilla-en-santa-ana-y-ruta-32/>

Presidencia de la República. (19 agosto 2020). *Inicia ampliación de puente sobre Río Alajuela.*

<https://www.presidencia.go.cr/comunicados/2020/08/inicia-ampliacion-de-puente-sobre-rio-alajuela/>