



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Programa de Ingeniería Estructural

LM-PIE-32-2021

INFORME DE INSPECCIÓN

REVISIÓN DE LA LONGITUD DE ASIENTO DE LAS VIGAS PRINCIPALES DEL VIADUCTO DE CIRCUNVALACIÓN NORTE, RUTA NACIONAL N.º 39



San José, Costa Rica
24 de setiembre, 2021



Año de las Universidades Públicas
por la conectividad como
derecho humano universal
2021
BICENTENARIO DE LA
INDEPENDENCIA DE COSTA RICA



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Página intencionalmente dejada en blanco

Informe LM-PIE-32-2021	24 de setiembre, 2021	Página 2 de 45
------------------------	-----------------------	----------------



1. Informe: LM-PIE-32-2021		2. Copia N°: 1
3. Título: REVISIÓN DE LA LONGITUD DE ASIENTO DE LAS VIGAS PRINCIPALES DEL VIADUCTO DE CIRCUNVALACIÓN NORTE, RUTA NACIONAL N.º 39		4. Fecha del Informe: 24 de setiembre, 2021
5. Organización y dirección Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440		
6. Notas complementarias Ninguna		
7. Resumen Este informe presenta los resultados de la revisión de la longitud de asiento de las vigas principales del viaducto perteneciente a las Unidades Funcionales III y IV de Circunvalación Norte, Ruta Nacional n.º 39. Esta revisión se hizo con base en las dimensiones mostradas en los planos estructurales del proyecto, así como mediciones tomadas en sitio durante dos visitas al proyecto, realizadas el 27 de julio y el 19 de agosto de 2021. Primeramente, se presenta una descripción general del viaducto, así como información general con respecto a los sistemas de protección sísmica de la estructura. Estos sistemas de protección sísmica incluyen apoyos de aislamiento sísmico y llaves de cortante. Seguidamente, se presenta el valor de la longitud de asiento de las vigas principales en cada uno de los elementos de la subestructura (bastiones y pilas), de acuerdo con las dimensiones mostradas en los planos estructurales. También se presenta el valor de las mediciones realizadas en sitio en una muestra de los elementos de la subestructura, esto como verificación de las dimensiones indicadas en los planos. Por último, la longitud de asiento real se compara con la longitud de asiento mínima requerida según la norma <i>AASHTO LRFD Bridge Design Specifications</i> . El Programa de Ingeniería Estructural (PIE) preparó este informe ante la solicitud de información por parte de la Comisión Permanente de Estudio y Revisión del Código Sísmico de Costa Rica (CPCSCR) del Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA). Este trabajo es parte de las competencias de la fiscalización de la Red Vial Nacional asignadas al LanammeUCR por medio de la Ley 8114.		
8. Palabras clave Viaducto, paso a desnivel, Circunvalación Norte, Ruta 39, Unidad Funcional III, Unidad Funcional IV, longitud de asiento, aislamiento sísmico, llaves de cortante, sistema de protección sísmica, concreto presforzado, auditorías técnicas de puentes, informe de inspección		9. N° de páginas 45
10. Elaborado por: Ing. Daniel Johanning Cordero Programa de Ingeniería Estructural	11. Revisado y aprobado por: Ing. Rolando Castillo Barahona Coordinador Programa de Ingeniería Estructural	12. Revisión legal por: Licda. Nidia María Segura Jiménez Asesora Legal LanammeUCR



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Página intencionalmente dejada en blanco

Informe LM-PIE-32-2021	24 de setiembre, 2021	Página 4 de 45
------------------------	-----------------------	----------------

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. OBJETIVOS	10
2.1. OBJETIVO GENERAL	10
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
3. ALCANCE Y LIMITACIONES.....	10
4. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ESTRUCTURA.....	11
5. SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA DEL VIADUCTO	16
5.1. AISLAMIENTO SÍSMICO.....	16
5.2. LLAVES DE CORTANTE.....	19
5.3. LONGITUD DE ASIENTO.....	21
6. REVISIÓN DE LA LONGITUD DE ASIENTO	22
6.1. DEFINICIÓN DE LONGITUD DE ASIENTO	22
6.2. REVISIÓN DE LA LONGITUD DE ASIENTO EN LOS BASTIONES DEL VIADUCTO	25
6.2.1. <i>Longitud de asiento según los planos estructurales</i>	<i>25</i>
6.2.2. <i>Longitud de asiento medida en sitio.....</i>	<i>26</i>
6.2.3. <i>Longitud de asiento mínima requerida según AASHTO LRFD.....</i>	<i>27</i>
6.3. REVISIÓN DE LA LONGITUD DE ASIENTO EN LAS PILAS DEL VIADUCTO.....	28
6.3.1. <i>Revisión de la longitud de asiento en pilas sin sesgo.....</i>	<i>28</i>
6.3.2. <i>Revisión de la longitud de asiento en pilas sesgadas</i>	<i>33</i>
7. CONCLUSIONES.....	38
8. SOLICITUD DE ACLARACIÓN.....	39
9. REFERENCIAS	40
ANEXO 1. SOLICITUD DE INFORMACIÓN DE PARTE DE LA COMISIÓN PERMANENTE DE ESTUDIO Y REVISIÓN DEL CÓDIGO SÍSMICO DE COSTA RICA.....	41
ANEXO 2. RESULTADOS COMPLETOS DE LA REVISIÓN DE LA LONGITUD DE ASIENTO EN EL BASTIÓN 1 Y LAS PILAS 1 A 49 DEL VIADUCTO DE CIRCUNVALACIÓN NORTE .	43



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Página intencionalmente dejada en blanco

Informe LM-PIE-32-2021	24 de setiembre, 2021	Página 6 de 45
------------------------	-----------------------	----------------

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

RESUMEN EJECUTIVO

A continuación, se presenta un resumen de las principales conclusiones obtenidas a partir de la revisión de la longitud de asiento y los sistemas de protección sísmica del viaducto de Circunvalación Norte, Ruta Nacional n.º 39.

El aislamiento sísmico constituye el sistema de protección sísmica principal del viaducto. Este sistema está conformado por aisladores sísmicos de neopreno con núcleo de plomo (LRB) que se utilizan en conjunto con apoyos esféricos sobre todos los elementos de la subestructura. El viaducto cuenta además con llaves de cortante, las cuales corresponden a un sistema de protección sísmica secundario en el sentido transversal de la estructura.

Por medio de una longitud de asiento amplia se busca prevenir la pérdida de asiento de la superestructura ante solicitaciones sísmicas en el sentido longitudinal que excedan las demandas consideradas en el diseño. Por lo tanto, la longitud de asiento se puede considerar como un sistema de protección sísmica secundario en el sentido longitudinal de la estructura.

Se revisó si la longitud de asiento cumple con las disposiciones mínimas de la norma *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*. A partir de la revisión realizada, se concluye que, si la longitud de asiento se considera como la distancia medida desde el extremo de la viga principal de la superestructura hasta el borde de la viga cabezal del bastión o la pila, se cumple satisfactoriamente con la longitud de asiento mínima requerida según el Artículo 4.7.4.4 de AASHTO LRFD en todos los elementos de la subestructura del viaducto. Sin embargo, si la longitud de asiento se considera solamente hasta el borde del pedestal de concreto sobre el que se coloca la viga principal, no se cumple con la longitud de asiento mínima requerida en la mayoría de las pilas del viaducto. Aunque el hecho de que una viga se desmonte del pedestal durante un sismo no implica una pérdida de asiento en su totalidad, podría generarse un desnivel importante a nivel de tablero, ya que los pedestales presentan alturas de hasta 1.238 m.

Tomando en consideración las conclusiones anteriores, se solicita a la Comisión Permanente de Estudio y Revisión del Código Sísmico de Costa Rica que aclare cuál es su posición con respecto a la definición de la longitud de asiento, específicamente si la longitud de asiento se debe considerar como la longitud de traslape medida desde el extremo del elemento principal de la superestructura hasta el borde de la viga cabezal del bastión o la pila, o si se debe considerar hasta el borde del pedestal cuando este excede una altura preestablecida.



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Página intencionalmente dejada en blanco

Informe LM-PIE-32-2021	24 de setiembre, 2021	Página 8 de 45
------------------------	-----------------------	----------------

Tel.: +506 2511-2500 | direccion.lanamme@ucr.ac.cr | www.lanamme.ucr.ac.cr
Dirección: LanammeUCR, Ciudad de la Investigación, Universidad de Costa Rica.
Código Postal: 11501-2060, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

1. INTRODUCCIÓN

Este informe presenta los resultados de la revisión de la longitud de asiento de las vigas principales del viaducto perteneciente a las Unidades Funcionales III y IV de Circunvalación Norte, Ruta Nacional n.º 39. Esta revisión se hizo con base en las dimensiones mostradas en los planos estructurales del proyecto, así como mediciones tomadas en sitio durante dos visitas al proyecto, realizadas el 27 de julio y el 19 de agosto de 2021.

El Programa de Ingeniería Estructural (PIE) preparó este informe ante la solicitud de información por parte de la Comisión Permanente de Estudio y Revisión del Código Sísmico de Costa Rica (CPCSCR) del Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA), según consta en el oficio CPCS-002-2021 que se incluye en el Anexo 1 del presente informe. Este trabajo es parte de las competencias de la fiscalización de la Red Vial Nacional asignadas al LanammeUCR por medio de la Ley 8114.

Primeramente, en el informe se presenta una descripción general del viaducto, así como información general con respecto a los sistemas de protección sísmica de la estructura. Estos sistemas de protección sísmica incluyen apoyos de aislamiento sísmico y llaves de cortante.

Seguidamente, se presenta el valor de la longitud de asiento de las vigas principales en cada uno de los elementos de la subestructura (bastiones y pilas), de acuerdo con las dimensiones mostradas en los planos estructurales. También se presenta el valor de las mediciones realizadas en sitio en una muestra de los elementos de la subestructura, esto como verificación de las dimensiones indicadas en los planos. Por último, la longitud de asiento real se compara con la longitud de asiento mínima requerida según la norma *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*.

Informe LM-PIE-32-2021	24 de setiembre, 2021	Página 9 de 45
------------------------	-----------------------	----------------

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

El objetivo general de este informe es presentar el resultado de la revisión de la longitud de asiento de las vigas principales del viaducto de Circunvalación Norte, Ruta Nacional n.º 39.

2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos son los siguientes:

- a. Realizar una descripción general de la estructura del viaducto.
- b. Presentar información sobre los sistemas de protección sísmica del viaducto, específicamente los aisladores sísmicos y las llaves de cortante.
- c. Determinar la longitud de asiento real de las vigas principales en cada uno de los elementos de la subestructura del viaducto, según las dimensiones mostradas en los planos estructurales del proyecto.
- d. Verificar las longitudes de asiento indicadas en los planos por medio de mediciones en sitio de una muestra de los elementos de la subestructura del viaducto.
- e. Mostrar el cálculo de la longitud de asiento mínima requerida según la norma *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, considerando las propiedades estructurales y geométricas del viaducto.
- f. Comparar la longitud de asiento real de las vigas del viaducto con la longitud de asiento mínima requerida por la normativa.

3. ALCANCE Y LIMITACIONES

La información presentada en este informe con respecto a los sistemas de protección sísmica del viaducto de Circunvalación Norte, así como el análisis de la longitud de asiento, se basan únicamente en la información que se tiene a disposición, específicamente los planos estructurales del viaducto y las observaciones y mediciones realizadas durante visitas al sitio. Es importante mencionar que no se cuenta con la memoria de cálculo del diseño estructural del viaducto, por lo que se desconocen cuáles fueron las suposiciones y los procedimientos que se utilizaron para realizar el diseño por sismo de la estructura.

Informe LM-PIE-32-2021	24 de setiembre, 2021	Página 10 de 45
------------------------	-----------------------	-----------------

4. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ESTRUCTURA

El Proyecto de Diseño y Construcción del Corredor Vial Ruta Nacional n.º 39, comprende la sección norte de la carretera de Circunvalación entre La Uruca y Calle Blancos, la cual tiene una longitud total aproximada de 5.5 km. El proyecto se divide en cinco unidades funcionales, las cuales fueron definidas de modo que cada unidad funcional pueda ser puesta en operación una vez que se finalice, sin depender de las demás. La Figura 1 muestra la ubicación geográfica de las cinco unidades funcionales del proyecto.



Figura 1. Ubicación geográfica de la carretera de Circunvalación Norte como se muestra en los planos del proyecto; la Unidad Funcional I se destaca en verde, la Unidad Funcional II en celeste, la Unidad Funcional III en amarillo, la Unidad Funcional IV en anaranjado y la Unidad Funcional V en morado.

Fuente: CONAVI, 2018a. Modificado por PIE, LanammeUCR

A continuación, se presenta una descripción breve de cada unidad funcional:

Unidad Funcional I: Consiste en una intersección a tres niveles entre la carretera de Circunvalación (Ruta Nacional n.º 39) y la Ruta Nacional n.º 108, en el sector de La Uruca.

Unidad Funcional II: Comprende el tramo a nivel de 1.31 km entre La Uruca y Colima de Tibás. Incluye dos estructuras: un puente sobre la Quebrada Rivera y un paso a desnivel sobre la futura radial a Heredia.

Informe LM-PIE-32-2021	24 de setiembre, 2021	Página 11 de 45
------------------------	-----------------------	-----------------

Unidad Funcional III: Abarca el tramo de 1.74 km entre Colima de Tibás y el antiguo Triángulo de la Solidaridad. Consiste principalmente en un viaducto elevado, así como una marginal en su parte inferior que conectará con las calles existentes de la zona.

Unidad Funcional IV: Consiste en una intersección a tres niveles entre el nuevo viaducto y la Ruta Nacional n.º 32. Incluye dos estructuras de rampas de acceso al viaducto.

Unidad Funcional V: Comprende el tramo entre la intersección con la Ruta Nacional n.º 32 y el sector de Calle Blancos. Incluye una intersección a dos niveles entre la carretera de Circunvalación (Ruta Nacional n.º 39) y la Ruta Nacional n.º 109.

El viaducto elevado que se analiza en este informe inicia en Colima de Tibás y termina en Calle Blancos de Goicoechea. Abarca la longitud completa de las Unidades Funcionales III y IV, así como una parte de la Unidad Funcional V. La Figura 2, adaptada de los planos del proyecto, muestra la ubicación geográfica del viaducto dentro del proyecto de Circunvalación Norte.



Figura 2. Ubicación geográfica del viaducto dentro del proyecto de Circunvalación Norte. La línea punteada corresponde a la sección del viaducto que aún no ha sido construida.

Fuente: CONAVI, 2018a. Modificado por PIE, LanammeUCR.

Como se puede observar en la figura anterior, el viaducto todavía se encuentra en proceso de construcción. Aunque la mayor parte del viaducto ya fue construida (Unidades Funcionales III y IV), todavía está pendiente construir una sección de aproximadamente 360 metros de longitud en el sector de Calle Blancos (perteneciente a la Unidad Funcional V). Una vez finalizado, el viaducto contará con una longitud total de 2238 metros.

Informe LM-PIE-32-2021	24 de setiembre, 2021	Página 12 de 45
------------------------	-----------------------	-----------------

El Cuadro 1, mostrado a continuación, resume las características básicas de la estructura del viaducto obtenidas a partir de los planos del proyecto. Los datos que se muestran en el cuadro corresponden únicamente a la parte del viaducto que ya fue construida, puesto que no se cuenta con los planos correspondientes a la parte restante.

Cuadro 1. Características generales de la estructura del viaducto de Circunvalación Norte.

Geometría	Longitud	1878.93 m
	Ancho total	Variable (23.30 m - 40.93 m)
	Número de tramos	49
	Longitud de tramos	40 m en la mayor parte del viaducto; 32 m para ciertos tramos
Superestructura	Tipo de tablero	Tablero de concreto reforzado colado en sitio / prefabricado (se usaron ambos sistemas en diferentes partes del viaducto)
	Número de superestructuras	10
	Tipo de superestructura (elementos principales) (ver Figura 3)	Vigas de concreto presforzado con acero pretensado. Todas las vigas del viaducto son simplemente apoyadas.
Subestructura	Número de elementos	Bastiones: 1 (el Bastión 2 aún no ha sido construido) Pilas: 49
	Tipo de bastiones (ver Figura 4a)	Bastión 1: Viga cabezal de concreto reforzado soportada por un muro de suelo mecánicamente estabilizado
	Tipo de pilas (ver Figura 4b)	Pilas 1-33, 40-43: Doble columna hueca de concreto reforzado Pilas 34-38, 47-49: Triple columna hueca de concreto reforzado Pila 39: Cuádruple columna hueca de concreto reforzado Pilas 44-46: Triple columna sólida de concreto reforzado
	Tipo de cimentación	Bastión 1: Placa corrida de concreto reforzado Pilas: Placa sobre pilotes circulares de concreto reforzado

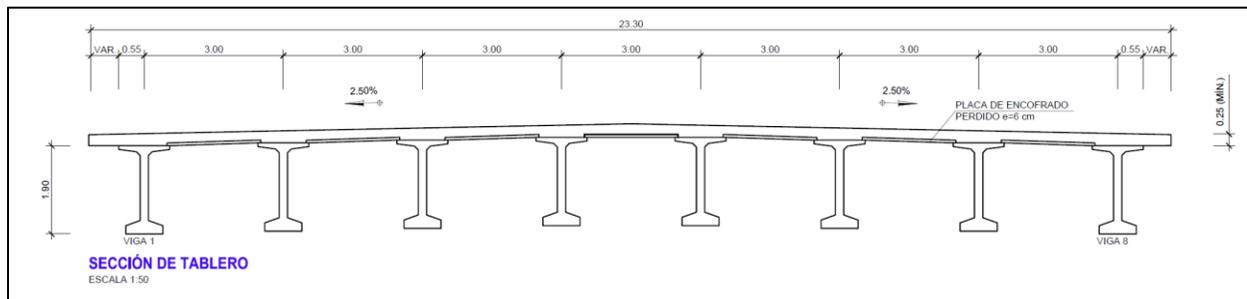


Figura 3. Sección transversal de la superestructura del viaducto.

Fuente: CONAVI, 2018a.

Informe LM-PIE-32-2021	24 de setiembre, 2021	Página 13 de 45
------------------------	-----------------------	-----------------

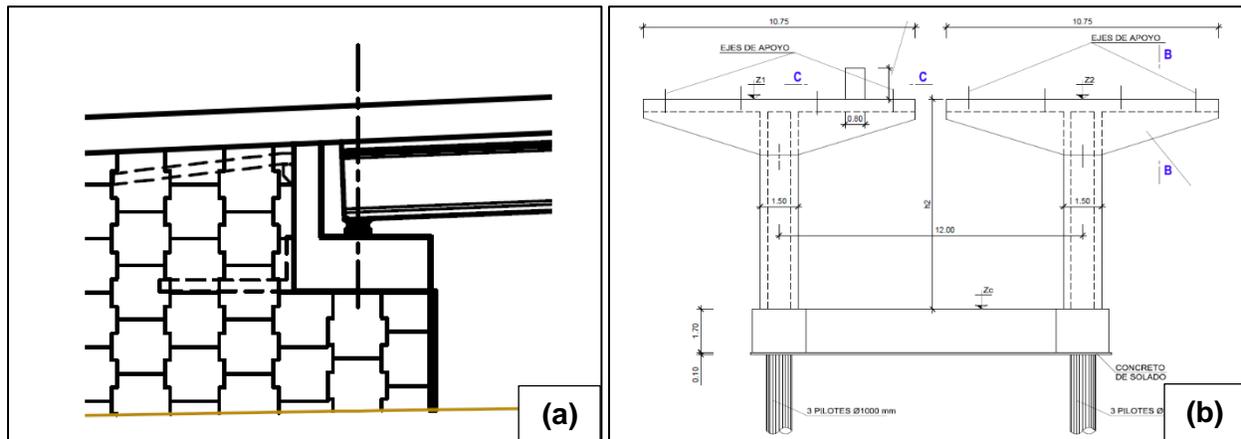


Figura 4. Tipología de bastiones y pilas del viaducto. **(a)** Vista lateral de bastión. **(b)** Vista frontal de pila.

Fuente: CONAVI, 2018a.

Como se muestra en el Cuadro 1, el viaducto cuenta con 10 superestructuras, las cuales están separadas por juntas de expansión colocadas aproximadamente cada cinco tramos, específicamente sobre el Bastión 1 (ubicado en Colima de Tibás) y sobre las Pilas 4, 9, 14, 19, 24, 30, 35, 39, 44 y 49. La Figura 5 muestra el detalle de las vigas principales sobre las pilas que presentan juntas de expansión. Como se puede observar, la separación longitudinal entre vigas de tramos adyacentes es de 0.50 m. Por otro lado, la Figura 6 muestra la junta de expansión que fue utilizada en el viaducto, que corresponde a una junta elastomérica modular.

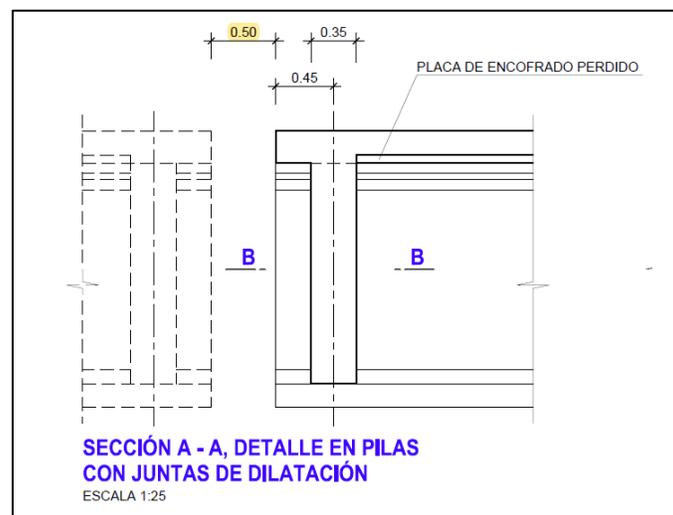


Figura 5. Detalle de las vigas principales colocadas sobre pilas que presentan junta de expansión.

Fuente: CONAVI, 2018a.



Figura 6. Junta de expansión elastomérica modular colocada en el viaducto.

De acuerdo con la ficha técnica del producto (FPC Italia, 2018), las juntas de expansión utilizadas en el viaducto cuentan con un movimiento admisible de $\pm 160 \text{ mm}$ para cargas de servicio (tanto en sentido transversal como longitudinal) y de $\pm 500 \text{ mm}$ para solicitaciones sísmicas (únicamente en el sentido longitudinal).

El tipo de junta que se utiliza sobre el resto de las pilas del viaducto (en aquellas pilas donde no existe junta de expansión) corresponde a una rótula de continuidad a nivel de tablero, la cual permite transmitir cortante y tensión de un tramo a otro sin restringir la rotación. El detalle de esta rótula de continuidad se muestra en la Figura 7. Se puede observar que en este caso existe continuidad a nivel de tablero, pero no existe continuidad a nivel de viga. Como se mencionó en el Cuadro 1, todas las vigas principales del viaducto son vigas simplemente apoyadas.

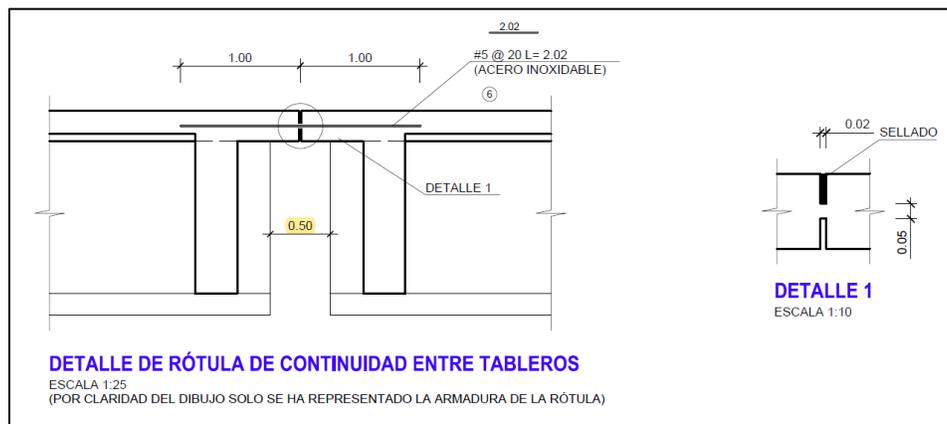


Figura 7. Detalle de la rótula de continuidad en aquellas pilas donde no se coloca junta de expansión.

Fuente: CONAVI, 2018a.

Informe LM-PIE-32-2021	24 de setiembre, 2021	Página 15 de 45
------------------------	-----------------------	-----------------

5. SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA DEL VIADUCTO

5.1. Aislamiento sísmico

El sistema de protección sísmica principal del viaducto de Circunvalación Norte corresponde al aislamiento sísmico. En todos los elementos de la subestructura se utilizan dos tipos de apoyos: aisladores sísmicos con núcleo de plomo (LRB) y apoyos esféricos con superficie deslizante plana (ver Figuras 8a y 8b, respectivamente). La Figura 9 muestra la vista en planta de una pila típica del viaducto y la distribución de los dispositivos de apoyo sobre la pila. Se puede observar que los apoyos de aislamiento sísmico se colocan en los costados de la viga cabezal de cada columna, mientras que los apoyos esféricos se colocan en la parte central.

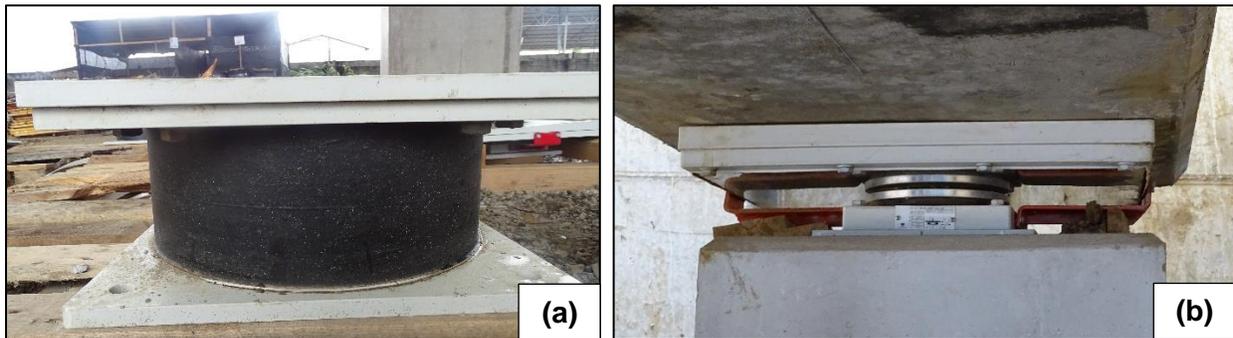


Figura 8. Dispositivos de apoyo utilizados en el viaducto. **(a)** Apoyo de aislamiento sísmico de neopreno con núcleo de plomo. **(b)** Apoyo esférico con superficie deslizante plana.

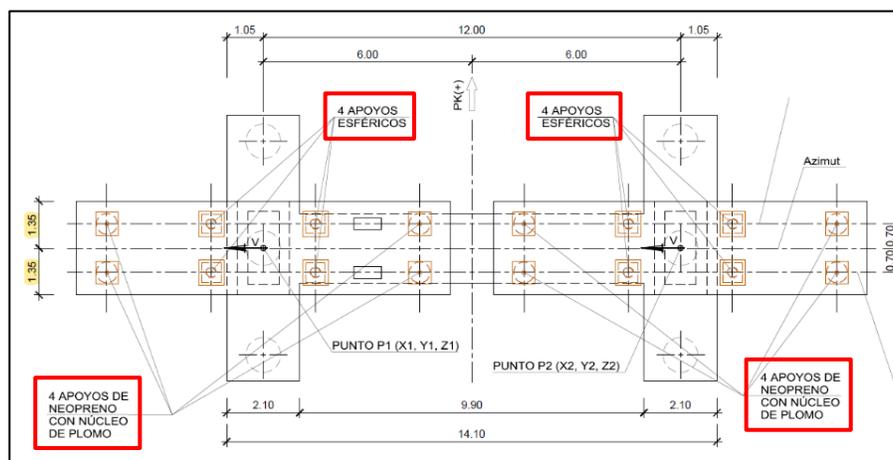


Figura 9. Vista en planta de una pila típica del viaducto y distribución de los dispositivos de apoyo.

Fuente: CONAVI, 2018a.

Informe LM-PIE-32-2021	24 de setiembre, 2021	Página 16 de 45
------------------------	-----------------------	-----------------

La Figura 10 muestra la disposición de los dispositivos de apoyo en una de las pilas del viaducto, la cual coincide con la disposición mostrada en los planos estructurales (ver Figura 9).



Figura 10. Tipos de apoyo que se utilizan en las pilas del viaducto.

De acuerdo con la información mostrada en los planos estructurales del proyecto, se emplearon tres tipos de apoyos de aislamiento sísmico con tamaños y capacidades distintos. El Cuadro 2 muestra las dimensiones y capacidades de cada tipo de aislador, así como los elementos de la subestructura donde cada uno fue utilizado. Se puede observar que los aisladores de mayor capacidad ($\pm 288 \text{ mm}$) se colocaron en aquellos elementos donde existe junta de expansión, mientras que los de menor capacidad ($\pm 200 \text{ mm}$ y $\pm 192 \text{ mm}$) se colocaron en aquellas pilas donde existe rótula de continuidad, a las cuales llegan vigas principales de 40 m y 32 m de longitud, respectivamente.

En lo que respecta a los apoyos esféricos con superficie deslizante plana, se utiliza el mismo dispositivo en todos los elementos de la subestructura del viaducto. De acuerdo con la información mostrada en los planos del proyecto, este apoyo cuenta con una capacidad de desplazamiento de $\pm 210 \text{ mm}$, tanto en el sentido longitudinal como en el sentido transversal.

Cuadro 2. Dimensiones y capacidades de los apoyos de aislamiento sísmico de neopreno con núcleo de plomo (LRB) utilizados en el viaducto, según la información mostrada en planos.

Tipo aislador	Diámetro	Altura	Desplazamiento máximo admisible	Elementos donde se utiliza
1	600 mm	311 mm	± 288 mm	Bastión 1 y pilas donde hay juntas de expansión
2	500 mm	244 mm	± 200 mm	Pilas donde hay rótula de continuidad, tramos de 40 m
3	450 mm	221 mm	± 192 mm	Pilas donde hay rótula de continuidad, tramos de 32 m

En la Figura 10 también es posible observar que todos los dispositivos de apoyo (tanto aisladores LRB como apoyos esféricos) están colocados sobre un pedestal de concreto construido sobre la viga cabezal de la pila. La altura de los pedestales es variable, ya que estos se utilizan para compensar las diferencias en la dimensión vertical de los apoyos, así como ajustar la posición de las vigas principales a la superelevación y pendiente longitudinal del viaducto. De acuerdo con la información mostrada en los planos del proyecto, la altura de los pedestales varía entre **0.050 m y 1.238 m**. La Figura 11 muestra el detalle típico del acero de refuerzo del pedestal que se incluye en los planos estructurales del viaducto.

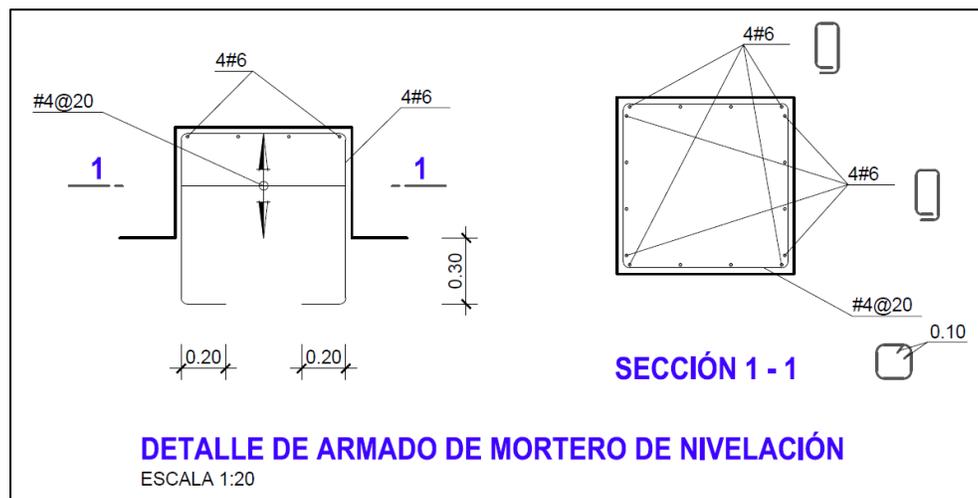


Figura 11. Detalle del refuerzo del pedestal como se muestra en los planos estructurales.

Fuente: CONAVI, 2018a.

5.2. Llaves de cortante

Como sistema de protección sísmica en el sentido transversal, el viaducto cuenta con llaves de cortante sobre todos los elementos de la subestructura (ver Figura 12). De acuerdo con el detalle mostrado en los planos estructurales, estos elementos cuentan con **0.80 m** de ancho y 0.35 m de espesor (ver Figura 13). Sin embargo, a partir de mediciones realizadas en sitio se pudo determinar que el espesor real es más bien de **0.50 m**. Por otro lado, la altura de la llave de cortante varía de una pila a otra dentro de un rango de **1.00 m a 1.66 m**.



Figura 12. Llave de cortante construida en las pilas del viaducto.

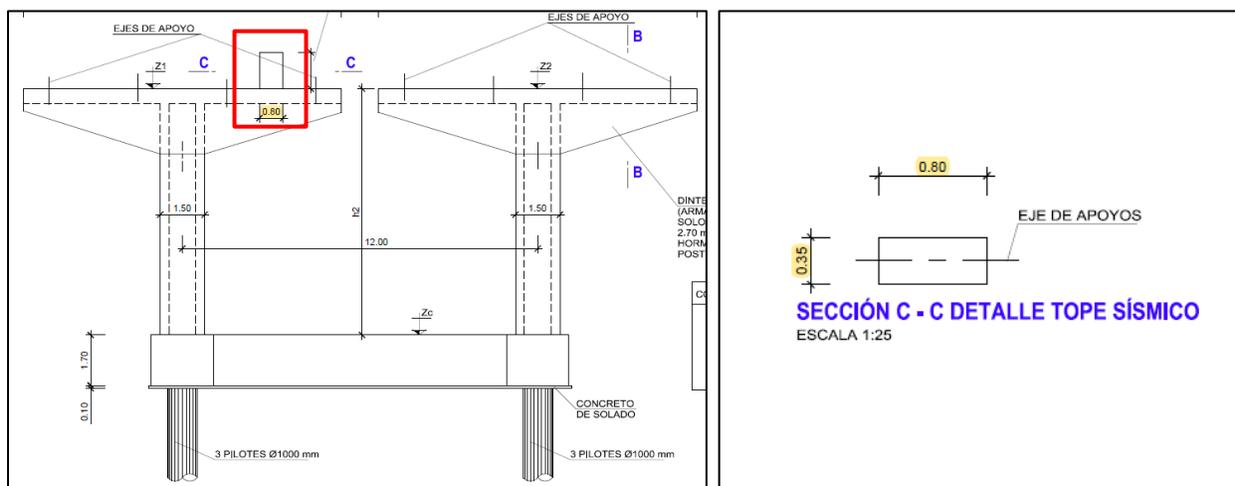


Figura 13. Detalle de la geometría de la llave de cortante como se muestra en los planos estructurales.

Fuente: CONAVI, 2018a.

Informe LM-PIE-32-2021	24 de setiembre, 2021	Página 19 de 45
------------------------	-----------------------	-----------------

El detalle típico del acero de refuerzo de la llave de cortante que se incluye en los planos estructurales del viaducto se muestra a continuación, en la Figura 14.

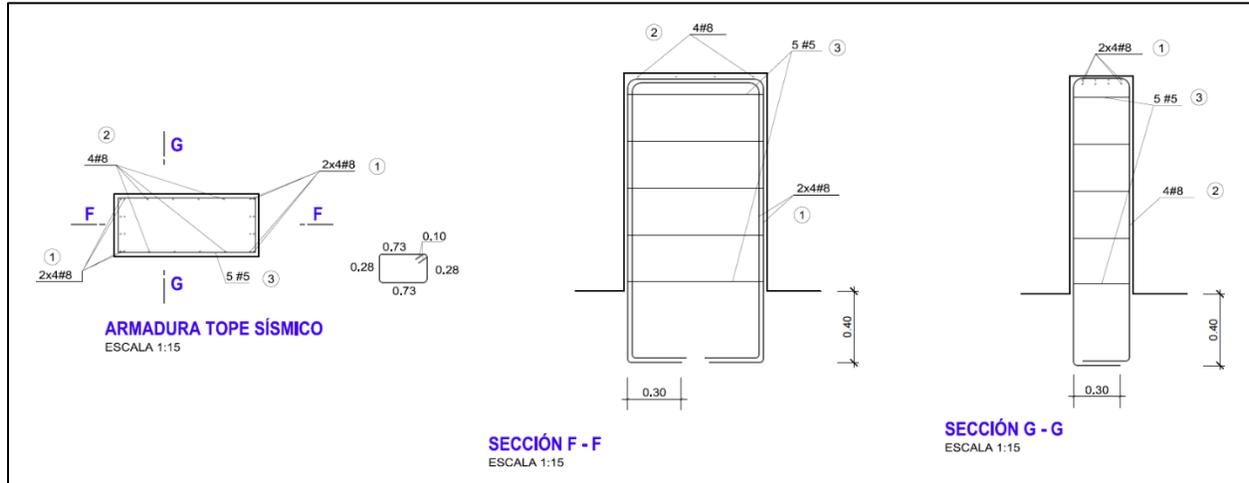


Figura 14. Detalle del refuerzo de la llave de cortante como se muestra en los planos estructurales.

Fuente: CONAVI, 2018a.

En la Figura 12 se puede observar que la viga diafragma construida sobre la pila cuenta con un espacio libre en la zona donde se coloca la llave de cortante, esto para poder acomodar cierto desplazamiento antes de que la llave de cortante entre en funcionamiento. El detalle correspondiente de los planos se muestra a continuación, en la Figura 15, donde se puede observar que el espacio libre en la viga diafragma mide 1.60 m de ancho.

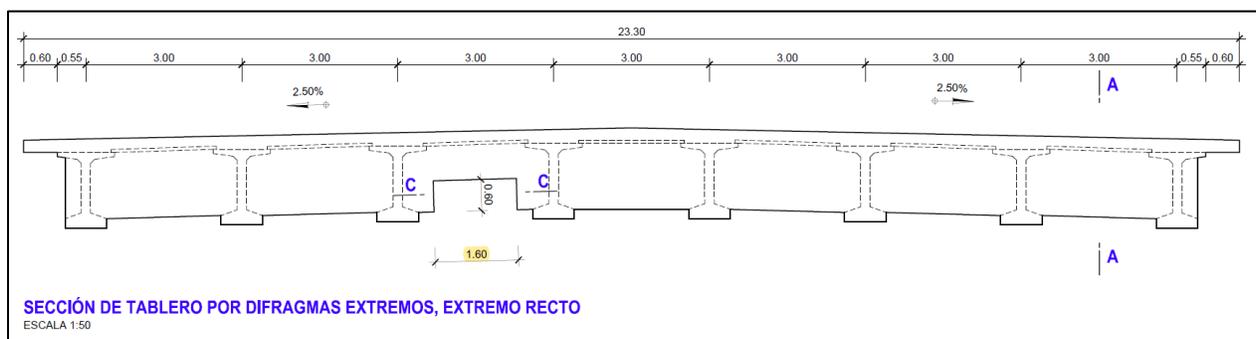


Figura 15. Sección transversal de la superestructura del viaducto a través de la viga diafragma, como se muestra en los planos estructurales.

Fuente: CONAVI, 2018a.

Tomando en consideración las dimensiones mostradas en la Figura 13 y en la Figura 15, se tiene que el espacio disponible para acomodar los desplazamientos en el sentido transversal del viaducto es de $(1.60 \text{ m} - 0.80 \text{ m}) / 2 = 0.4 \text{ m} = \mathbf{400 \text{ mm}}$, a ambos lados de la llave de cortante. Este espacio disponible es mayor en comparación con el desplazamiento máximo admisible de los aisladores sísmicos ($\pm 288 \text{ mm}$ el de mayor capacidad, ver Sección 5.1) por lo que, para que la llave de cortante entre en funcionamiento, primero se tiene que exceder la capacidad de desplazamiento de los aisladores. Esto convierte a las llaves de cortante en un sistema de protección sísmica **secundario** en el sentido transversal del viaducto.

5.3. Longitud de asiento

Como se mencionó en la Sección 5.1, el viaducto de Circunvalación Norte es un puente que presenta aislamiento sísmico como sistema de protección sísmica principal. Para el caso de puentes aislados sísmicamente, el Departamento de Transporte de California, o CalTrans (2018), establece que la pérdida de asiento de la superestructura debe prevenirse o mitigarse ante el evento poco probable de que las demandas reales de desplazamiento en los aisladores excedan su capacidad. Asimismo, establece que una estrategia de prevención consiste en proveer asientos amplios.

Tomando lo anterior en consideración, se revisó si el viaducto cumple con la longitud de asiento mínima requerida según la normativa de la *American Association of State Highway and Transportation Officials*, o AASHTO. Al tratarse de un puente con aislamiento sísmico, se tiene la siguiente normativa aplicable:

- **AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. 9th Edition. (AASHTO, 2020).** Es la norma general para el diseño de estructuras de puentes vehiculares. En el Artículo 4.7.4.4 de esta norma se establecen las disposiciones mínimas con respecto a la longitud de asiento.
- **AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design. 2nd Edition. (AASHTO, 2011).** Es una norma específica para el diseño por sismo de estructuras de puentes. En el Artículo 4.12.2 de esta norma se establecen las disposiciones mínimas con respecto a la longitud de asiento, las cuales son equivalentes a las del Artículo 4.7.4.4 de la especificación general de diseño (AASHTO, 2020). En el Artículo 4.12.3 también se incluye

una ecuación adicional que permite un cálculo más riguroso de la longitud de asiento en zonas sísmicas muy alta, la cual considera las demandas de desplazamiento por sismo.

- **Guide Specifications for Seismic Isolation Design. 4th Edition. (AASHTO, 2014).** Es un documento suplementario a las dos normas anteriores, el cual establece los lineamientos específicos para el diseño del aislamiento sísmico de estructuras de puentes. Este documento no incluye disposiciones con respecto a la longitud de asiento.

Dado que la norma específica para diseño de puentes con aislamiento sísmico (AASHTO, 2014) no incluye disposiciones con respecto a la longitud de asiento, la revisión de la longitud de asiento del viaducto se realizó con base en la normativa de diseño para puentes convencionales. Específicamente, se utilizó el Artículo 4.7.4.4 de la norma *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. 9th Edition.* (AASHTO, 2020). El detalle y los resultados de esta revisión se presentan a continuación, en la Sección 6.

6. REVISIÓN DE LA LONGITUD DE ASIENTO

En esta sección se presenta el detalle de la revisión de la longitud de asiento de las vigas principales del viaducto de Circunvalación Norte. Primeramente, se presenta la definición de la longitud de asiento según la norma de diseño *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 9th Edition* (AASHTO, 2020), abreviada de ahora en adelante como AASHTO LRFD, así como el método para calcular la longitud de asiento mínima requerida. Seguidamente, se revisa si la longitud de asiento real en los bastiones y las pilas del viaducto (según las dimensiones mostradas en los planos estructurales del proyecto, así como mediciones tomadas en sitio) es mayor a la longitud de asiento mínima requerida según el Artículo 4.7.4.4 de AASHTO LRFD.

6.1. Definición de longitud de asiento

De acuerdo con el comentario C4.7.4.4 de AASHTO LRFD, la longitud de asiento N se define como la longitud del traslape entre la viga de la superestructura y el asiento, como se muestra en la Figura 16 (AASHTO, 2020). La Figura 17 muestra el caso de una pila del viaducto de Circunvalación Norte, donde se puede observar que la longitud de asiento se consideró como la longitud medida desde el extremo de la viga principal hasta el borde de la viga cabezal de la pila. Sin embargo, es importante notar que las vigas principales están apoyadas directamente sobre pedestales de concreto construidos sobre la viga cabezal de la pila, los cuales son de altura

Informe LM-PIE-32-2021	24 de setiembre, 2021	Página 22 de 45
------------------------	-----------------------	-----------------

variable que en algunos casos es significativa (0,050 m – 1,238 m, ver Sección 5.1). Queda la duda si la longitud de asiento se debe considerar más bien como la longitud desde el extremo de la viga principal hasta el borde del pedestal, y no hasta el borde de la viga cabezal. Por lo tanto, el análisis se realizó para ambas interpretaciones de la definición de la longitud de asiento.

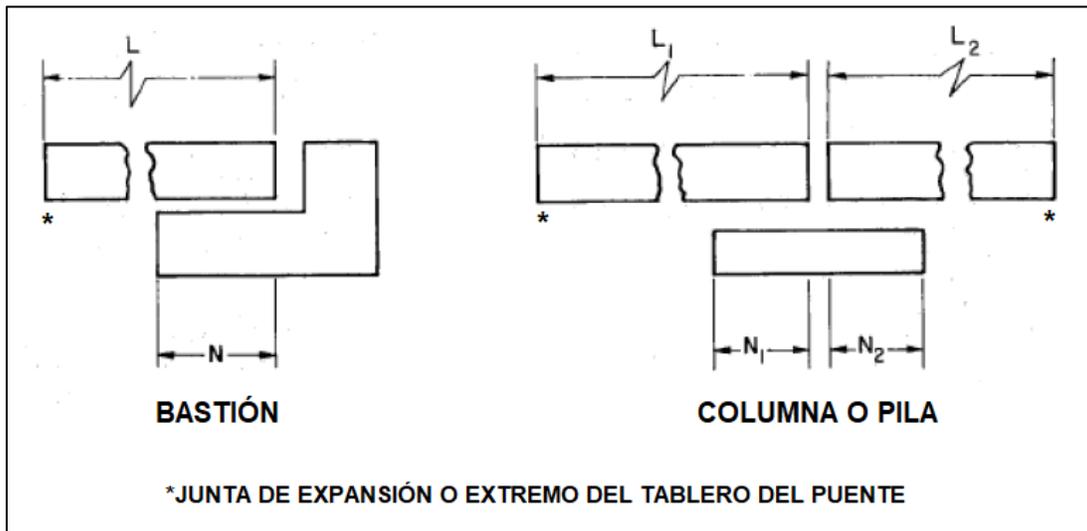


Figura 16. Definición de longitud de asiento N y longitud del tablero L a considerar en el cálculo.

Fuente: AASHTO, 2020 (Fig. C4.7.4.4-1). Modificado por PIE, LanammeUCR.

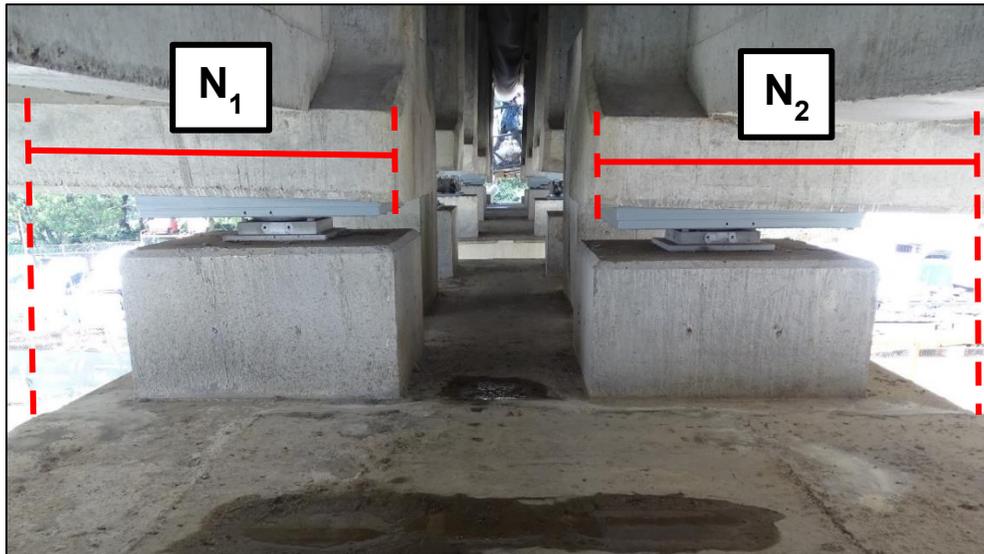


Figura 17. Vigas principales apoyadas sobre pila del viaducto de Circunvalación Norte.

El Artículo 4.7.4.4 de AASHTO LRFD establece las disposiciones mínimas en lo que respecta a la longitud de asiento de las vigas principales de un puente. La longitud de asiento mínima requerida se obtiene a partir de una longitud de asiento empírica, la cual se calcula por medio de la siguiente ecuación (se muestra la versión de la ecuación correspondiente a unidades del Sistema Internacional):

$$N_{emp} = (200 + 1.7 \cdot L + 6.7 \cdot H)(1 + 0.000125 \cdot S^2) \quad (1)$$

Donde:

N_{emp} = longitud de asiento empírica medida normal a la línea de centro del apoyo [mm]

L = longitud del tablero hasta la junta de expansión adyacente o el extremo del tablero, como se muestra en la Figura 16 [m]

H = para bastiones, la altura promedio de las columnas que soportan el tablero del puente desde el bastión hasta la siguiente junta de expansión; para pilas, la altura de la pila [m]

S = ángulo de sesgo medido con respecto a la línea normal a la línea de centro del puente [°]

En las Figuras 16 y 17 se puede observar que, en el caso de las pilas, se deben calcular dos valores de longitud de asiento, puesto que sobre una misma pila se apoyan vigas de dos tramos distintos. Asimismo, como se observa en la Figura 16, el cálculo de la longitud de asiento mínima requerida se debe realizar en las pilas donde el tablero es discontinuo, es decir, en las pilas donde existe una junta de expansión a nivel de tablero.

Adicionalmente, el Artículo 4.7.4.4 de AASHTO LRFD establece que la longitud de asiento real debe ser mayor a un porcentaje de la longitud de asiento empírica, el cual se asigna dependiendo de la zona sísmica donde se ubique la estructura. En el caso específico de un puente ubicado en zonas con alta sismicidad, la longitud de asiento mínima requerida debe tomarse como el 150% de la longitud de asiento empírica. Por lo tanto, la ecuación a utilizar para determinar la longitud de asiento mínima requerida es la siguiente:

$$N_{min} = 1.50 \cdot N_{emp} \quad (2)$$

Donde:

N_{min} = longitud de asiento mínima requerida, medida normal a la línea de centro del apoyo [mm]

N_{emp} = longitud de asiento empírica, calculada por medio de la ecuación (1) [mm]

Informe LM-PIE-32-2021	24 de setiembre, 2021	Página 24 de 45
------------------------	-----------------------	-----------------

6.2. Revisión de la longitud de asiento en los bastiones del viaducto

Al momento de preparar este informe, únicamente se ha completado la construcción del Bastión 1 del viaducto, el cual está ubicado en el sector de Colima de Tibás. El Bastión 2 del viaducto (sector de Calle Blancos) aún no ha sido construido, y tampoco se cuenta con los planos estructurales correspondientes. Por lo tanto, solamente fue posible revisar la longitud de asiento en el Bastión 1. En las siguientes secciones se presentan los resultados de esta revisión.

6.2.1. Longitud de asiento según los planos estructurales

Primeramente, se obtiene la longitud de asiento de las vigas principales colocadas sobre el Bastión 1 con base en las dimensiones mostradas en los planos estructurales del proyecto.

La Figura 18 muestra la vista lateral del Bastión 1. En la Figura 18a se puede observar que la parte superior de la viga cabezal del bastión tiene un ancho de 3.026 m. Por otro lado, en la Figura 18b se observa que la separación entre la viga y la pared de cabezal es de 0.576 m. Por lo tanto, de acuerdo con la información mostrada en planos, la longitud de asiento de las vigas colocadas sobre el Bastión 1 es de $3.026 \text{ m} - 0.576 \text{ m} = 2.45 \text{ m}$.

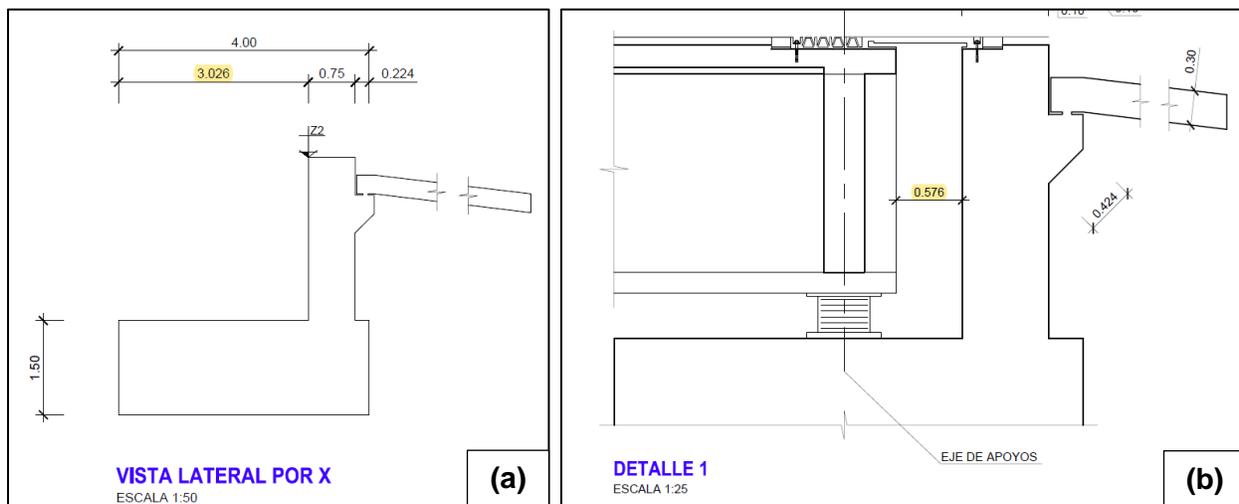


Figura 18. Vista lateral del Bastión 1. **(a)** Longitud de la viga cabezal. **(b)** Separación entre la viga y la pared de cabezal.

Fuente: CONAVI, 2018a.

6.2.2. Longitud de asiento medida en sitio

El 19 de agosto del 2021 se realizó una visita al viaducto en construcción, durante la cual fue posible medir de forma directa la longitud de asiento real de algunas de las vigas principales colocadas sobre el Bastión 1. La Figura 19 muestra una de estas vigas, así como la longitud N que fue medida en sitio.

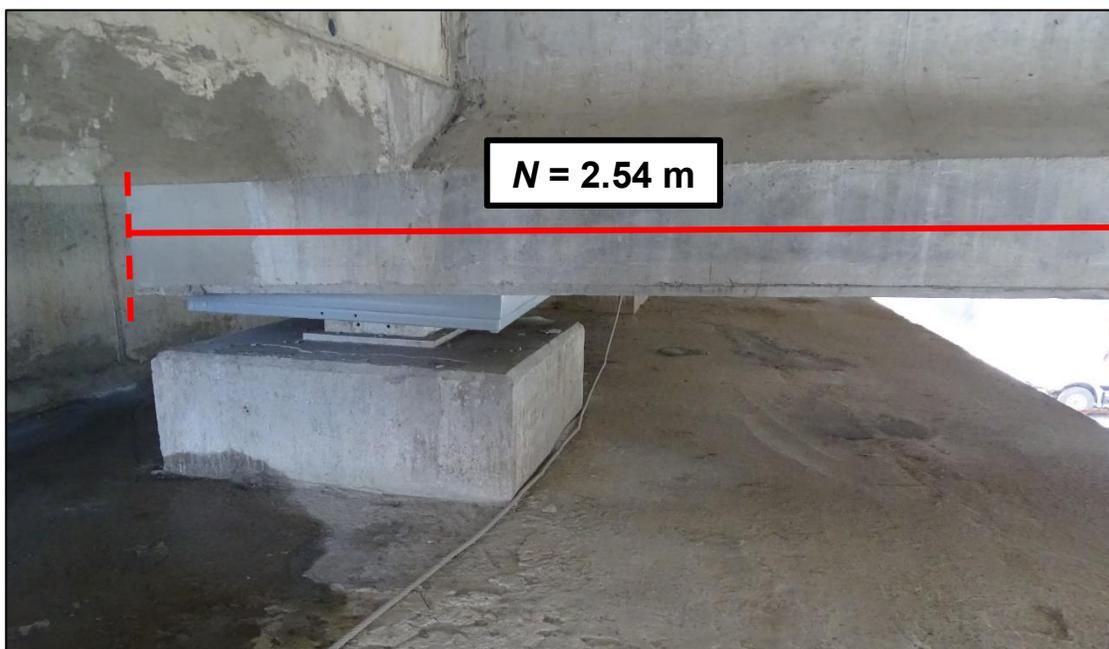


Figura 19. Viga principal apoyada sobre el Bastión 1. Se muestra la longitud que fue medida en sitio.

Como se puede observar en la figura, la longitud de asiento N medida en sitio (la cual se consideró hasta el borde de la viga cabezal del bastión) fue de **2.54 m**. Por lo tanto, la longitud de asiento real de las vigas colocadas sobre el Bastión 1 es ligeramente mayor en comparación con la longitud de asiento que se indica en los planos estructurales del viaducto (2.45 m, ver Sección 6.2.1).

En la Figura 19 también se puede notar que, al igual que en las pilas, las vigas principales están apoyadas directamente sobre pedestales de concreto construidos sobre la viga cabezal del bastión. En sitio se pudo medir que los pedestales presentan dimensiones en planta de **0.80 m x 0.80 m**.

6.2.3. Longitud de asiento mínima requerida según AASHTO LRFD

El cálculo de la longitud de asiento mínima requerida en el Bastión 1 se realiza por medio de las ecuaciones establecidas en el Artículo 4.7.4.4 de la norma AASHTO LRFD, las cuales se presentaron en la Sección 6.1 del informe.

A partir de los planos estructurales del viaducto, se obtiene que la longitud total desde la junta de expansión del Bastión 1 hasta la junta de expansión adyacente (colocada sobre la Pila 4) es de 160.15 m. Asimismo, la altura promedio de las Pilas 1, 2, 3 y 4 es de 7.292 m. La estructura no presenta sesgo en este sector. Por lo tanto, sustituyendo los valores $L = 160.15$ m, $H = 7.292$ m y $S = 0^\circ$ en las ecuaciones (1) y (2), se obtiene:

$$N_{\min} = 1.50 \cdot N_{emp} = 1.50 \cdot (200 + 1.7 \cdot L + 6.7 \cdot H)(1 + 0.000125 \cdot S^2)$$

$$N_{\min} = 1.50 \cdot (200 + 1.7 \cdot 160.15 + 6.7 \cdot 7.292)(1)$$

$$N_{\min} = 782 \text{ mm} = 0.782 \text{ m}$$

La longitud de asiento mínima requerida sobre el Bastión 1 del viaducto según AASHTO LRFD es de **0.782 m**. Por otro lado, como se vio en las secciones 6.2.1 y 6.2.2 del informe, la longitud de asiento **medida hasta el borde de la viga cabezal del bastión** es de 2.45 m según planos y de 2.54 m de acuerdo con las mediciones tomadas en sitio. En ambos casos se supera la longitud de asiento mínima requerida y, por lo tanto, se cumplen las disposiciones mínimas establecidas en la norma AASHTO LRFD.

Adicionalmente, se consideró importante evaluar la longitud de asiento **medida hasta el borde de pedestal de concreto** sobre el que se apoya cada una de las vigas principales, ya que, si una viga se desmonta del pedestal, se generaría un desnivel al inicio del puente igual a la altura del pedestal. De acuerdo con los planos estructurales, la altura de los pedestales construidos sobre el Bastión 1 varía entre 0.050 m y 0.381 m. Además, como se vio en la sección 6.2.2, en sitio se pudo medir que los pedestales sobre los que se apoyan las vigas principales presentan una longitud de 0.80 m. Por lo tanto, si la longitud de asiento se considera hasta el borde del pedestal ($N = 0.80$ m) y no hasta el borde de la viga cabezal del bastión ($N = 2.45$ m), también se cumple con la longitud de asiento mínima requerida según la norma AASHTO LRFD.

6.3. Revisión de la longitud de asiento en las pilas del viaducto

Como se mencionó en el Cuadro 1 presentado en la Sección 4 del informe, el viaducto de Circunvalación Norte cuenta con 49 pilas. En 10 de estas pilas existe una junta de expansión a nivel de tablero, mientras que en las 39 pilas restantes existe una rótula de continuidad a nivel de tablero. Independientemente del tipo de junta (de expansión o de continuidad), todas las vigas principales del viaducto son vigas simplemente apoyadas, es decir, no existe continuidad en las vigas. Por lo tanto, se consideró que todas las vigas principales del viaducto son vulnerables a la pérdida de asiento ante sollicitaciones sísmicas y, consecuentemente, la longitud de asiento se revisó en todas las pilas del viaducto.

En las siguientes secciones se presenta con mayor detalle los cálculos y las verificaciones realizadas. En la Sección 6.3.1 se presenta el caso de las pilas sin sesgo, mientras que en la Sección 6.3.2 se presenta el caso de las pilas sesgadas.

6.3.1. Revisión de la longitud de asiento en pilas sin sesgo

De las 49 pilas del viaducto, 47 corresponden a pilas sin sesgo. La totalidad de las 10 pilas donde existe junta de expansión a nivel de tablero corresponden a pilas sin sesgo. A continuación, se presenta el proceso de la revisión de la longitud de asiento para este tipo de pilas.

6.3.1.1. Longitud de asiento según los planos estructurales

Primeramente, se obtiene la longitud de asiento de las vigas principales colocadas sobre las pilas sin sesgo con base en las dimensiones mostradas en los planos estructurales. La Figura 20a muestra una vista lateral típica de una pila del viaducto, mientras que la Figura 20b muestra la vista en planta correspondiente. En ambas vistas se puede observar que tanto la columna como la viga cabezal de la pila presentan un ancho de 2.70 m. Esto aplica para todas las pilas sin sesgo del viaducto.

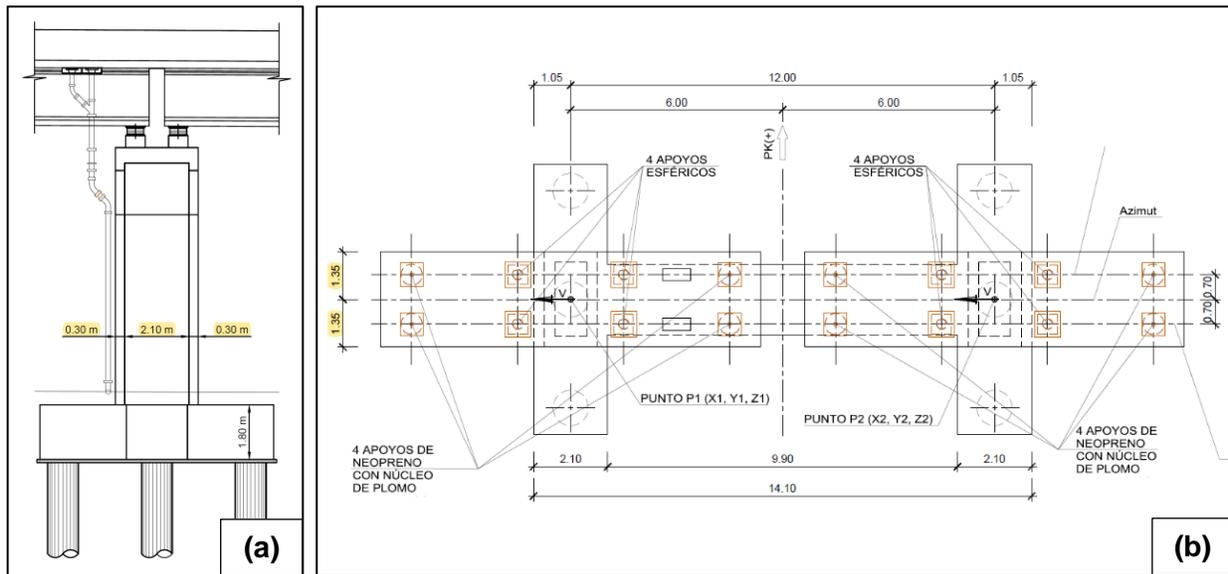


Figura 20. Geometría de las pilas sin sesgo del viaducto. **(a)** Vista lateral. **(b)** Vista en planta.

Fuente: CONAVI, 2018a.

Por otro lado, la separación longitudinal entre las vigas principales de tramos adyacentes que se colocan sobre cada una de las pilas del viaducto es de 0.50 m, independientemente de si sobre la pila existe una junta de expansión (ver Figura 5) o una rótula de continuidad (ver Figura 7) a nivel de tablero. Por lo tanto, de acuerdo con la información mostrada en planos, y considerando que se tienen dos líneas de apoyo por pila, la longitud de asiento de las vigas principales sobre cada una de las pilas sin sesgo del viaducto es de $(2.70 \text{ m} - 0.50 \text{ m}) / 2 = 1.10 \text{ m}$.

6.3.1.2. Longitud de asiento medida en sitio

Se realizaron dos visitas al viaducto en construcción, específicamente el 27 de julio y el 19 de agosto del 2021, durante las cuales fue posible medir de forma directa la longitud de asiento real en seis pilas sin sesgo del viaducto. La Figura 21 muestra una de las pilas inspeccionadas, así como la longitud N que fue medida en sitio.

En cada pila se midió la longitud de asiento de al menos 4 vigas, 2 por cada línea de apoyo. Además de la longitud de asiento, en cada pila también se midió el ancho de la base de la columna, ya que esta presenta el mismo ancho que la viga cabezal sobre la que se colocan las vigas principales (ver Figura 20a).

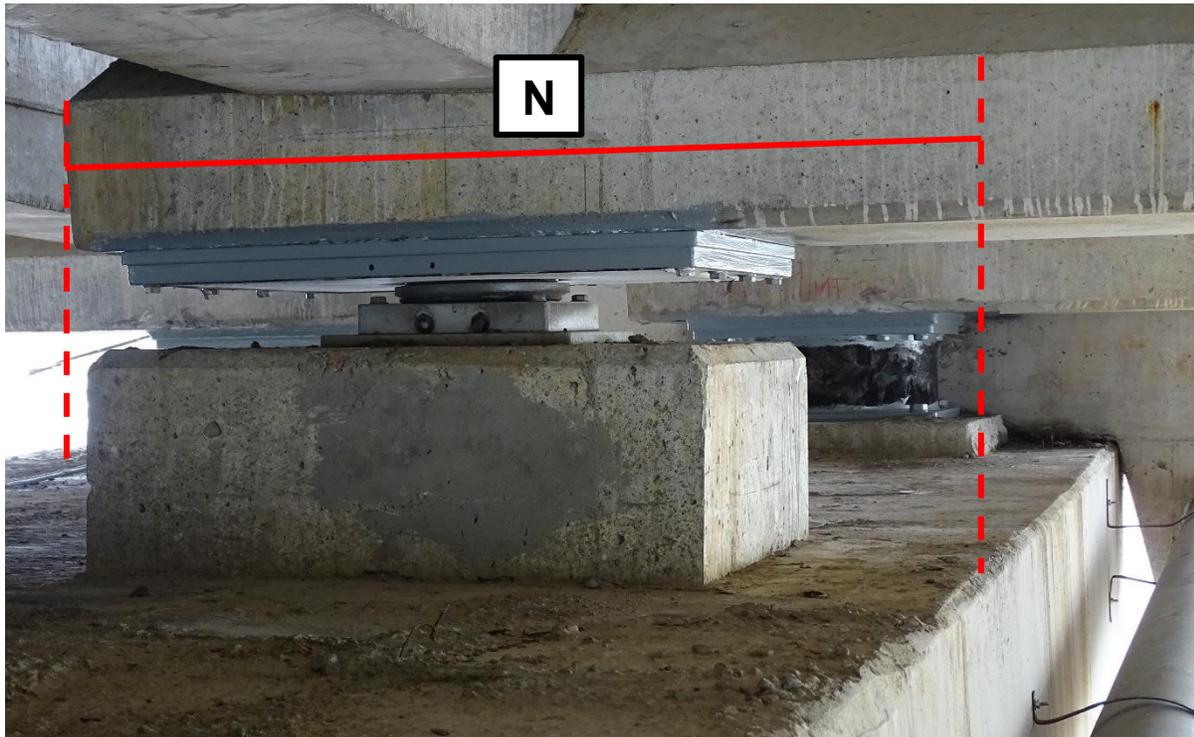


Figura 21. Viga principal apoyada sobre una pila sin sesgo. Se muestra la longitud de asiento N que fue medida en sitio.

En el Cuadro 3 se muestran las mediciones tomadas en las seis pilas sin sesgo que fueron inspeccionadas. Asimismo, se indica el tipo de junta que existe a nivel de tablero sobre cada una de estas pilas. En lo que respecta a la medición de la longitud de asiento N , se presenta el rango de los valores medidos.

Cuadro 3. Mediciones en sitio realizadas en pilas sin sesgo.

Pila	Tipo de junta	Ancho de viga cabezal	Longitud de asiento N
Pila 4	Junta de expansión	2.70 m	1.06 m – 1.11 m
Pila 9	Junta de expansión	2.71 m	1.10 m
Pila 10	Rótula de continuidad	2.70 m	1.06 m
Pila 14	Junta de expansión	2.70 m	1.08 m – 1.11 m
Pila 23	Rótula de continuidad	2.71 m	1.08 m – 1.12 m
Pila 30	Junta de expansión	2.70 m	1.09 m – 1.11 m

Informe LM-PIE-32-2021	24 de setiembre, 2021	Página 30 de 45
------------------------	-----------------------	-----------------

Como se puede observar en el cuadro anterior, el ancho de la viga cabezal medido en sitio fue prácticamente igual en comparación con el valor mostrado en los planos estructurales (2.70 m, ver Sección 6.3.1.1). Por otro lado, los valores de la longitud de asiento medidos en sitio presentan una ligera variación entre **1.06 m y 1.12 m**, sin embargo, son valores muy cercanos en comparación con la longitud de asiento que se indica en los planos estructurales (1.10 m, ver Sección 6.3.1.1). La longitud de asiento mínima medida en sitio fue de **1.06 m**, por lo que este fue el valor que se utilizó en la comparación con la longitud de asiento mínima requerida.

En la Figura 21 también se puede notar que las vigas principales están apoyadas directamente sobre pedestales de concreto construidos sobre la viga cabezal de la pila. En sitio se pudo medir que los pedestales presentan dimensiones en planta de **0.80 m × 0.80 m**.

6.3.1.3. Longitud de asiento mínima requerida según AASHTO LRFD

Se calculó la longitud de asiento mínima requerida para cada una de las pilas del viaducto donde existe junta de expansión a nivel de tablero, aplicando las ecuaciones de AASHTO LRFD que se presentaron en la Sección 6.1 del informe. Los resultados obtenidos para cada una de las pilas que presentan junta de expansión se muestran a continuación, en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Cálculo de la longitud de asiento mínima requerida en las pilas con junta de expansión.

Pila	L ₁ [m]	L ₂ [m]	H [m]	S [°]	N _{min,1} [mm]	N _{min,2} [mm]
Pila 4	160.148	193.398	8.278	0	792	876
Pila 9	193.398	176.658	8.963	0	883	841
Pila 14	176.658	201.575	8.332	0	834	898
Pila 19	201.575	204.105	8.659	0	901	907
Pila 24	204.105	203.583	9.485	0	916	914
Pila 30	203.583	203.867	8.838	0	908	909
Pila 35	203.867	164.575	9.562	0	916	816
Pila 39	164.575	199.803	18.882	0	909	999
Pila 44	199.803	202.021	7.489	0	885	890
Pila 49	202.021	NA	14.588	0	962	NA

En lo que respecta a las pilas donde existe rótula de continuidad a nivel de tablero, se revisó que estas tuvieran una longitud de asiento suficiente para acomodar la longitud mínima calculada en las pilas más cercanas que presentan junta de expansión (valores mostrados el Cuadro 4). Es decir, se consideró que la longitud de asiento mínima requerida calculada en una pila donde hay junta de expansión también aplica para el resto de las pilas que soportan la misma superestructura.

A continuación, se muestra el detalle del cálculo de la longitud de asiento mínima requerida más crítica de todo el viaducto. Como se puede observar en el Cuadro 4, esta longitud crítica se obtuvo para la Pila 39, la cual corresponde a la pila de mayor altura del viaducto.

A partir de los planos estructurales del proyecto, se obtiene que la longitud total desde la junta de expansión de la Pila 39 hasta la junta de expansión posterior (colocada sobre la Pila 44) es de 199.803 m. Asimismo, la altura máxima de la pila medida desde la parte superior de la placa de cimentación hasta la parte superior de la viga cabezal es de 18.882 m. La estructura no presenta sesgo en este sector. Por lo tanto, sustituyendo los valores $L = 199.803$ m, $H = 18.882$ m y $S = 0^\circ$ en las ecuaciones (1) y (2), se obtiene:

$$N_{\min} = 1.50 \cdot N_{emp} = 1.50 \cdot (200 + 1.7 \cdot L + 6.7 \cdot H)(1 + 0.000125 \cdot S^2)$$

$$N_{\min} = 1.50 \cdot (200 + 1.7 \cdot 199.803 + 6.7 \cdot 18.882)(1)$$

$$N_{\min} = 999 \text{ mm} = 0.999 \text{ m}$$

La longitud de asiento mínima requerida sobre la Pila 39 del viaducto según AASHTO LRFD es de **0.999 m**. Como se mencionó anteriormente, este fue el valor más crítico obtenido después de realizar el cálculo correspondiente en cada una de las pilas del viaducto que presentan junta de expansión. Por otro lado, como se vio en las secciones 6.3.1.1 y 6.3.1.2 del informe, la longitud de asiento en todas las pilas sin sesgo (independientemente de si presentan junta de expansión o rótula de continuidad a nivel de tablero) **medida hasta el borde de la viga cabezal de la pila** es de 1.10 m según los planos del proyecto, y de al menos 1.06 m de acuerdo con las mediciones tomadas en sitio. En ambos casos se supera la longitud de asiento mínima requerida más crítica de 0.999 m y, por lo tanto, se cumplen las disposiciones mínimas establecidas en la norma AASHTO LRFD.

Adicionalmente, se consideró importante evaluar la longitud de asiento **medida hasta el borde del pedestal de concreto** sobre el que se apoya cada una de las vigas principales, ya que, si una viga se desmonta del pedestal, se generaría un desnivel igual a la altura del pedestal a nivel del tablero. De acuerdo con los planos estructurales, la altura de los pedestales construidos sobre las pilas sin sesgo varía entre 0.050 m y 1.238 m. Además, como se vio en la Sección 6.3.1.2, en sitio se pudo medir que los pedestales presentan una longitud de 0.80 m. Como se puede observar en el Cuadro 4, solamente la longitud mínima requerida $N_{min,1}$ calculada para la Pila 4 resultó ser menor a 0.80 m. Por lo tanto, si la longitud de asiento se considera hasta el borde del pedestal ($N = 0.80$ m) y no hasta el borde de la viga cabezal de la pila ($N = 1.10$ m), no se cumpliría con la longitud de asiento mínima requerida en la mayoría de las pilas del viaducto.

Los resultados completos de la revisión de la longitud de asiento en todos los elementos de la subestructura del viaducto de Circunvalación Norte se pueden consultar en el Anexo 2 del informe.

6.3.2. Revisión de la longitud de asiento en pilas sesgadas

De las 49 pilas del viaducto, 2 corresponden a pilas sesgadas, específicamente las Pilas 7 y 8 (ver Figura 22).



Figura 22. Pilas sesgadas del viaducto de Circunvalación Norte.

Las pilas sesgadas están ubicadas en el sector donde la carretera de Circunvalación Norte cruza la línea del tren existente. De acuerdo con los planos estructurales del viaducto, el ángulo de sesgo en ambas pilas es de 25° . A continuación, se presenta el proceso de la revisión de la longitud de asiento para el caso de las pilas sesgadas.

6.3.2.1. Longitud de asiento según los planos estructurales

Primeramente, se obtiene la longitud de asiento de las vigas principales colocadas sobre las pilas sesgadas con base en las dimensiones mostradas en los planos estructurales. La Figura 23a muestra el detalle del extremo de una viga principal sobre una pila sesgada, donde se indica que la distancia desde el extremo de la viga hasta el eje de los apoyos (medida a lo largo de la línea de centro de la viga) es de 0.45 m. Por otro lado, a partir de las dimensiones mostradas en la Figura 23b se puede deducir que la distancia desde el borde de la viga cabezal de la pila hasta el eje de la línea de apoyos es de 0.65 m. Por lo tanto, de acuerdo con la información mostrada en planos, la longitud de asiento de las vigas principales sobre cada una de las pilas sesgadas del viaducto es de $0.45 \text{ m} + 0.65 \text{ m} = 1.10 \text{ m}$.

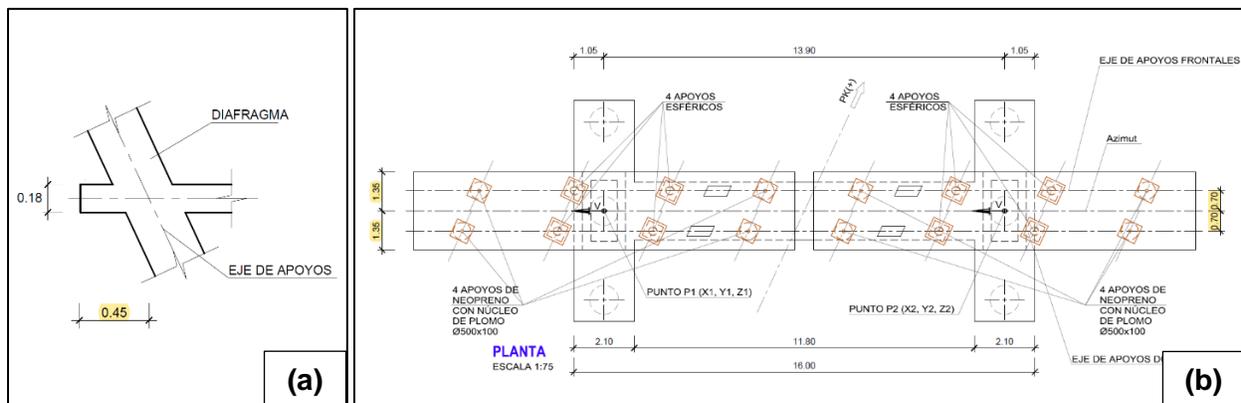


Figura 23. Geometría de los tramos sesgados del viaducto. **(a)** Detalle del extremo de la viga principal y la viga diafragma. **(b)** Vista en planta de la pila.

Fuente: CONAVI, 2018a.

6.3.2.2. Longitud de asiento medida en sitio

Se realizó una visita al viaducto en construcción el 19 de agosto del 2021, durante la cual fue posible tomar mediciones en la Pila 8 del viaducto para obtener la longitud de asiento real. Al tratarse de una pila sesgada, se tiene la particularidad de que la cara del extremo de la viga no

Informe LM-PIE-32-2021	24 de setiembre, 2021	Página 34 de 45
------------------------	-----------------------	-----------------

es paralela al borde exterior de la pila (ver Figura 24). Por lo tanto, la longitud de asiento no es uniforme en todo el ancho de la viga, sino que ésta varía linealmente desde un mínimo en uno de los costados de la viga, hasta un máximo en el otro costado.

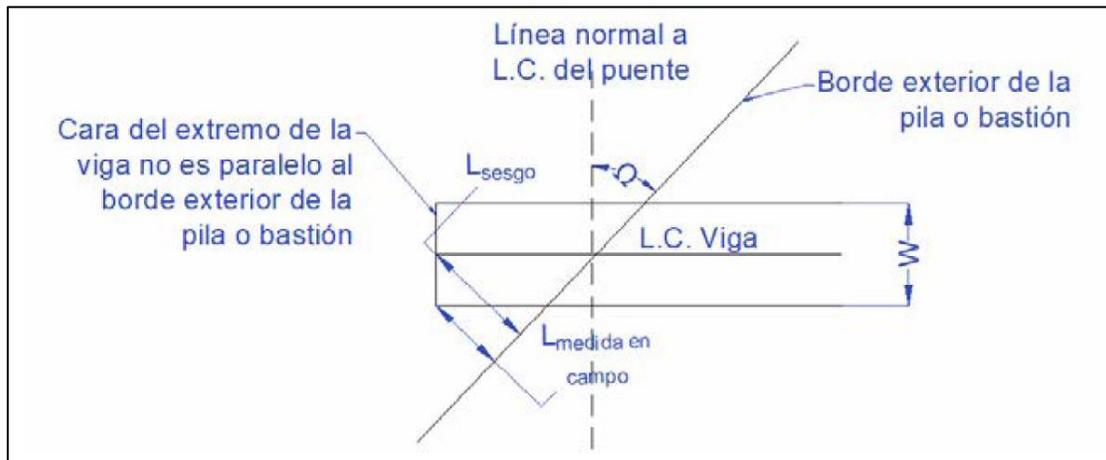


Figura 24. Longitud de asiento para el caso de una pila sesgada.

Fuente: Borrador del MP-2020 (pendiente de oficializar).

Para este caso, se aplicaron las disposiciones indicadas en el borrador del Manual de Puentes de Costa Rica, o MP-2020, el cual está en proceso de oficialización por parte del Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Este manual establece que se debe medir en campo la longitud perpendicular desde el borde exterior de la pila hasta el vértice más cercano del elemento principal, como se muestra en la Figura 24. A partir de esta longitud medida en campo, se debe calcular la longitud de asiento con respecto a la línea de centro de la viga, por medio de la siguiente ecuación:

$$N = \frac{1}{2} \cdot w \cdot \text{sen}(\Omega) + L \quad (3)$$

Donde:

N = longitud de asiento con respecto a la línea de centro de la viga [m]

w = ancho del ala inferior de la viga [m]

Ω = ángulo de sesgo medido con respecto a la línea normal a la línea de centro del puente [°]

L = distancia perpendicular desde el borde exterior de la pila hasta el vértice más cercano de la viga, ver Figura 24 [m]

En el Cuadro 5 se muestran las mediciones realizadas en la Pila 8 del viaducto, la cual presenta una rótula de continuidad a nivel de tablero. Además de la longitud de asiento, se midió el ancho de la base de la columna, el cual es equivalente al ancho de la viga cabezal sobre la que se colocan las vigas principales. Este valor fue muy similar al que se muestra en los planos estructurales del viaducto (2.70 m).

Cuadro 5. Mediciones en sitio realizadas en una de las pilas sesgadas

Pila	Tipo de junta	Ancho de viga cabezal	Longitud L medida en campo	Longitud de asiento N asociada
Pila 8	Rótula de continuidad	2.71 m	0.85 m	1.02 m

Como se puede observar en el cuadro, la longitud L medida en campo fue de 0.85 m. A partir de los planos estructurales del viaducto, se obtiene que el ancho del ala inferior de las vigas principales es de 0.80 m, y que el ángulo de sesgo es de 25° . Por lo tanto, sustituyendo los valores $w = 0.80$ m, $\Omega = 25^\circ$ y $L = 0.85$ m en la ecuación (3), se obtiene la longitud de asiento N asociada, como se muestra a continuación:

$$N = \frac{1}{2} \cdot w \cdot \text{sen}(\Omega) + L = \frac{1}{2} \cdot (0.80 \text{ m}) \cdot \text{sen}(25^\circ) + 0.85 \text{ m} = \mathbf{1.02 \text{ m}}$$

Por lo tanto, el valor de la longitud de asiento N obtenido a partir de mediciones en sitio en la Pila 8 fue de **1.02 m**. Este valor es ligeramente menor en comparación con la longitud de asiento que se indica en los planos estructurales (1.10 m, ver Sección 6.3.2.1).

6.3.2.3. Longitud de asiento mínima requerida según AASHTO LRFD

Las dos pilas sesgadas del viaducto (Pilas 7 y 8) presentan una rótula de continuidad a nivel de tablero. Como se mencionó en la Sección 6.3.1.3, para revisar la longitud de asiento en este tipo de pilas, se consideró que la longitud de asiento mínima requerida calculada en una pila donde hay junta de expansión también aplica para las pilas donde hay rótula de continuidad y que soportan la misma superestructura. Por lo tanto, se revisó que las Pilas 7 y 8 tuvieran una longitud de asiento suficiente para acomodar la longitud mínima requerida calculada en las pilas más cercanas que presentan junta de expansión, específicamente las Pilas 4 y 9.

De acuerdo con los datos mostrados en el Cuadro 4, la longitud de asiento mínima requerida $N_{min,2}$ calculada para la Pila 4 es de 0.876 m, mientras que la longitud de asiento mínima requerida $N_{min,1}$ calculada para la Pila 9 es de 0.883 m. Para efectos de la revisión de la longitud de asiento en las pilas intermedias que presentan rótula de continuidad, se utiliza el valor más crítico de 0.883 m, correspondiente a la Pila 9.

Adicionalmente, se aplicó el factor de corrección por sesgo que está incorporado en la ecuación (1) presentada en la Sección 6.1 del informe, ya que este factor no fue considerado en el cálculo de la longitud de asiento mínima requerida para la Pila 9. Por lo tanto, la longitud de asiento mínima requerida que se consideró para las pilas sesgadas (Pilas 7 y 8) se obtuvo de la siguiente manera:

$$N_{min} = (0.883 \text{ m})(1 + 0.000125 \cdot S^2)$$

$$N_{min} = (0.883 \text{ m})(1 + 0.000125 \cdot 25^2)$$

$$N_{min} = 952 \text{ mm} = 0.952 \text{ m}$$

La longitud de asiento mínima requerida sobre la Pila 8 del viaducto según AASHTO LRFD es de **0.952 m**. Por otro lado, como se vio en las secciones 6.3.2.1 y 6.3.2.2 del informe, la longitud de asiento en las pilas sesgadas **medida hasta el borde de la viga cabezal de la pila** es de 1.10 m según los planos del proyecto, y de 1.02 m de acuerdo con las mediciones tomadas en sitio. En ambos casos se supera la longitud de asiento mínima requerida y, por lo tanto, se cumplen las disposiciones mínimas establecidas en la norma AASHTO LRFD.

Al igual que en el caso de los bastiones y las pilas sin sesgo, se consideró importante evaluar la longitud de asiento **medida hasta el borde del pedestal de concreto** sobre el que se apoya cada una de las vigas principales, ya que, si una viga se desmonta del pedestal, se generaría un desnivel igual a la altura del pedestal a nivel del tablero. De acuerdo con los planos estructurales, la altura de los pedestales construidos sobre las pilas sesgadas varía entre 0.050 m y 0.824 m. Además, como se vio en la Sección 6.3.1.2, en sitio se pudo medir que los pedestales presentan una longitud de 0.80 m. Por lo tanto, si la longitud de asiento se considera hasta el borde del pedestal ($N = 0.80 \text{ m}$) y no hasta el borde de la viga cabezal de la pila ($N = 1.02 \text{ m}$), no se cumpliría con la longitud de asiento mínima requerida en las pilas sesgadas del viaducto.

Informe LM-PIE-32-2021	24 de setiembre, 2021	Página 37 de 45
------------------------	-----------------------	-----------------

7. CONCLUSIONES

A partir de la información presentada con respecto a los sistemas de protección sísmica, así como la revisión de la longitud de asiento del viaducto de Circunvalación Norte, se llegó a las siguientes conclusiones:

- El aislamiento sísmico constituye el sistema de protección sísmica **principal** del viaducto de Circunvalación Norte. Este sistema está conformado por aisladores sísmicos de neopreno con núcleo de plomo (LRB) que se utilizan en conjunto con apoyos esféricos sobre todos los elementos de la subestructura del viaducto.
- El viaducto cuenta además con llaves de cortante, las cuales corresponden a un sistema de protección sísmica **secundario** en el sentido **transversal** de la estructura. Se considera un sistema secundario ya que para que las llaves de cortante entren en funcionamiento, primero tiene que excederse la capacidad de desplazamiento de los aisladores sísmicos.
- Por medio de una longitud de asiento amplia, se busca prevenir la pérdida de asiento de la superestructura ante sollicitaciones sísmicas en el sentido longitudinal que excedan las demandas consideradas en el diseño. Por lo tanto, la longitud de asiento se puede considerar como un sistema de protección sísmica **secundario** en el sentido **longitudinal** de la estructura.
- A partir de la revisión de la longitud de asiento, se concluye lo siguiente:
 - Si la longitud de asiento se considera como la distancia medida desde el extremo de la viga principal de la superestructura hasta el borde de la viga cabezal del bastión o pila, **se cumple satisfactoriamente** con la longitud de asiento mínima requerida según el Artículo 4.7.4.4 de AASHTO LRFD en todos los elementos de la subestructura del viaducto.
 - Si la longitud de asiento se considera como la distancia medida desde el extremo de la viga principal de la superestructura hasta el borde del pedestal de concreto sobre el que se coloca esta viga, **no se cumple** con la longitud de asiento mínima requerida según el Artículo 4.7.4.4 de AASHTO LRFD en la mayoría de las pilas del viaducto. Aunque el hecho de que una viga se desmonte del pedestal durante un sismo no implica una pérdida de asiento en su totalidad, podría generarse un desnivel importante a nivel de tablero, ya que los pedestales presentan alturas de hasta 1.238 m (según los planos del viaducto).

Informe LM-PIE-32-2021	24 de setiembre, 2021	Página 38 de 45
------------------------	-----------------------	-----------------

8. SOLICITUD DE ACLARACIÓN

Tomando en consideración las conclusiones obtenidas a partir de la revisión de la longitud de asiento del viaducto de Circunvalación Norte, se solicita a la Comisión Permanente de Estudio y Revisión del Código Sísmico de Costa Rica aclarar lo siguiente:

Cuál es la posición de la Comisión con respecto a la definición de la longitud de asiento de las vigas principales de un puente (sea este un puente convencional o un puente con aislamiento sísmico), específicamente si la longitud de asiento se debe considerar como la longitud de traslape medida desde el extremo del elemento principal de la superestructura hasta el borde de la viga cabezal del bastión o la pila, o si se debe considerar hasta el borde del pedestal sobre el que se apoyan las vigas principales cuando este excede una altura preestablecida.

9. REFERENCIAS

American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO. (2020). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. 9th Edition*. Washington D.C.: AASHTO.

American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO. (2014). *Guide Specifications for Seismic Isolation Design. 4th Edition*. Washington D.C.: AASHTO.

American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO. (2011). *AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design. 2nd Edition*. Washington D.C.: AASHTO.

California Department of Transportation, Caltrans. (2018). *20-22 Seismic Design of Ordinary Bridges with Isolation Bearings*. Documento recuperado de <https://dot.ca.gov/-/media/dot-media/programs/engineering/documents/memotodesigner/mtd-20-22-final-v6.pdf>

Consejo Nacional de Vialidad, CONAVI (2018a). *Unidad Funcional III: Tramo Viaducto. Planos estructurales*. Proyecto Diseño y Construcción del Corredor Vial Ruta Nacional N° 39 Sección La Uruca – Calle Blancos. Consorcio Estrella – H. Solís.

Consejo Nacional de Vialidad, CONAVI (2018b). *Unidad Funcional IV: Intercambio Ruta 32. Planos estructurales*. Proyecto Diseño y Construcción del Corredor Vial Ruta Nacional N° 39 Sección La Uruca – Calle Blancos. Consorcio Estrella – H. Solís.

FPC Italia. (2018). *Algaflex TX. Rubber Expansion Joints*. Documento recuperado de: [http://www.fpcitalia.it/freyssinet/fpc-italia_it.nsf/0/2ACC8A83A363FEA9C125826E00592646/\\$file/FPC%20-%20ALGAFLEX.pdf](http://www.fpcitalia.it/freyssinet/fpc-italia_it.nsf/0/2ACC8A83A363FEA9C125826E00592646/$file/FPC%20-%20ALGAFLEX.pdf)

Anexo 1.

**Solicitud de información de parte de la Comisión Permanente de
Estudio y Revisión del Código Sísmico de Costa Rica**

Informe LM-PIE-32-2021	24 de setiembre, 2021	Página 41 de 45
------------------------	-----------------------	-----------------



Comisión Permanente
de Estudio y Revisión del
Código Sísmico de Costa Rica

San José, 7 de julio, 2021
CPCS-002-2021

Ingeniero
Alejandro Navas Carro
Director Ejecutivo
LANAMME

Estimado Ing. Navas:

Reciba un cordial saludo de la Comisión permanente de estudio y revisión del Código Sísmico.

Por este medio, la comisión solicita, se le pueda brindar información de las revisiones estructurales sísmicas que esta institución realizó sobre los puentes de circunvalación norte.

Agradecemos la información suministrada.

Sin otro particular, muy atentamente,

MIGUEL
FRANCISCO
CRUZ AZOFEIFA
(FIRMA)

Digitally signed by
MIGUEL FRANCISCO
CRUZ AZOFEIFA
(FIRMA)
Date: 2021.07.08
16:25:17 -06'00'

Ing. Miguel F. Cruz Azofeifa, Dr. Sc.
Presidente
Comisión Permanente de Estudio y Revisión del
Código Sísmico de Costa Rica

c Archivo

Anexo 2.

**Resultados completos de la revisión de la longitud de asiento en el
Bastión 1 y las Pilas 1 a 49 del viaducto de Circunvalación Norte**

Informe LM-PIE-32-2021	24 de setiembre, 2021	Página 43 de 45
------------------------	-----------------------	-----------------



Cuadro A.1. Resultados obtenidos de la revisión de la longitud de asiento en cada uno de los elementos de la subestructura del viaducto de Circunvalación Norte. Los elementos de la subestructura que presentan junta de expansión se muestran en color azul.

Pila	S [°]	N _{min,1} [mm]	N _{min,2} [mm]	Hasta borde de pila		Hasta borde de pedestal	
				N _{real, pila} [mm]	Cumple	N _{real, pedestal} [mm]	Cumple
Bastión 1	0	NA	782	2540	SI	800	SI
Pila 1	0	792	782	1060	SI	800	SI
Pila 2	0	792	782	1060	SI	800	SI
Pila 3	0	792	782	1060	SI	800	SI
Pila 4	0	792	876	1060	SI	800	NO
Pila 5	0	883	876	1060	SI	800	NO
Pila 6	0	883	876	1060	SI	800	NO
Pila 7	25	952	944	1020	SI	800	NO
Pila 8	25	952	944	1020	SI	800	NO
Pila 9	0	883	841	1060	SI	800	NO
Pila 10	0	834	841	1060	SI	800	NO
Pila 11	0	834	841	1060	SI	800	NO
Pila 12	0	834	841	1060	SI	800	NO
Pila 13	0	834	841	1060	SI	800	NO
Pila 14	0	834	898	1060	SI	800	NO
Pila 15	0	901	898	1060	SI	800	NO
Pila 16	0	901	898	1060	SI	800	NO
Pila 17	0	901	898	1060	SI	800	NO
Pila 18	0	901	898	1060	SI	800	NO
Pila 19	0	901	907	1060	SI	800	NO
Pila 20	0	916	907	1060	SI	800	NO
Pila 21	0	916	907	1060	SI	800	NO
Pila 22	0	916	907	1060	SI	800	NO
Pila 23	0	916	907	1060	SI	800	NO
Pila 24	0	916	914	1060	SI	800	NO



Cuadro A.1 (cont.). Resultados obtenidos de la revisión de la longitud de asiento en cada uno de los elementos de la subestructura del viaducto de Circunvalación Norte. Los elementos de la subestructura que presentan junta de expansión se muestran en color azul.

Pila	S [°]	N _{min,1} [mm]	N _{min,2} [mm]	Hasta borde de pila		Hasta borde de pedestal	
				N _{real, pila} [mm]	Cumple	N _{real, pedestal} [mm]	Cumple
Pila 25	0	908	914	1060	SI	800	NO
Pila 26	0	908	914	1060	SI	800	NO
Pila 27	0	908	914	1060	SI	800	NO
Pila 28	0	908	914	1060	SI	800	NO
Pila 29	0	908	914	1060	SI	800	NO
Pila 30	0	908	909	1060	SI	800	NO
Pila 31	0	916	909	1060	SI	800	NO
Pila 32	0	916	909	1060	SI	800	NO
Pila 33	0	916	909	1060	SI	800	NO
Pila 34	0	916	909	1060	SI	800	NO
Pila 35	0	916	816	1060	SI	800	NO
Pila 36	0	909	816	1060	SI	800	NO
Pila 37	0	909	816	1060	SI	800	NO
Pila 38	0	909	816	1060	SI	800	NO
Pila 39	0	909	999	1060	SI	800	NO
Pila 40	0	885	999	1060	SI	800	NO
Pila 41	0	885	999	1060	SI	800	NO
Pila 42	0	885	999	1060	SI	800	NO
Pila 43	0	885	999	1060	SI	800	NO
Pila 44	0	885	890	1060	SI	800	NO
Pila 45	0	962	890	1060	SI	800	NO
Pila 46	0	962	890	1060	SI	800	NO
Pila 47	0	962	890	1060	SI	800	NO
Pila 48	0	962	890	1060	SI	800	NO
Pila 49	0	962	NA	1060	SI	800	NO