

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio Ciencias e Ingenierías**

**Diseño de apoyos para puentes de acuerdo a la  
Especificación AASHTO LRFD 6ta Edición  
Trabajo Experimental**

**Felipe Andrés Argüello Ordóñez**

**Ingeniería Civil**

Trabajo de titulación presentado como requisito  
para la obtención del título de  
Ingeniero Civil

Quito, 14 de diciembre de 2015

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ  
COLEGIO CIENCIA E INGENIERIAS

**HOJA DE CALIFICACIÓN  
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Diseño de apoyos para puentes de acuerdo a la Especificación AASHTO LRFD**

**6ta Edición**

**Felipe Andrés Argüello Ordóñez**

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Telmo Andrés Sánchez, Ph.D.

Firma del profesor

---

Quito, 14 de diciembre de 2015

## Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: \_\_\_\_\_

Nombres y apellidos: Felipe Andrés Argüello Ordóñez

Código: 00104093

Cédula de Identidad: 1718654468

Lugar y fecha: Quito, 14 de diciembre de 2015

## RESUMEN

El siguiente proyecto se basa en el diseño de apoyos para puentes con la Especificación AASHTO LRFD, 6ta Edición. Específicamente se utilizan los Métodos de Diseño A y B de la Especificación nombrada anteriormente. Estos Métodos permiten diseñar apoyos reforzados con acero y otras fibras.

Para empezar, se hace un análisis profundo de la Especificación para luego proceder al diseño de apoyos con cálculos a mano. Una vez realizado esto, se procede a desarrollar hojas de cálculo optimizadas en Excel con el diseño de diversos tipos de apoyos. En el Desarrollo del Tema se muestran dos ejemplos completos con los cálculos a mano para los dos métodos de diseño. Además se muestran capturas de pantalla de las hojas de cálculo con los mismos problemas resueltos en computadora.

**AASHTO (“American Association of State Highway and Transportation Officials”):**

es un organismo que establece normas y estudia protocolos del diseño de autopistas en Estados Unidos. Esta asociación también representa al diseño y construcción de transporte por aire y agua, transporte público y transporte ferroviario.

**“AASHTO LRFD Bridge Design Specifications”:** esta Especificación se utiliza para diseñar, evaluar y rehabilitar puentes. La Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos, requiere que todos los puentes que sean construidos por el gobierno, utilicen esta Especificación. La Especificación utiliza el diseño “LRFD” (“Load and Resistance Factor Design”) que emplea factores provenientes de información estadística conocida de cargas y desempeño estructural.

**Apoyo:** elemento estructural que transmite cargas facilitando movimientos de traslación y rotación.

**Apoyo de algodón reforzado (“CDP: Cotton-Duck Pad”):** almohadilla elaborada con capas de elastómero y algodón de pato unidos entre si.

**Apoyo de fibra de vidrio (“FGP: Fiberglass-Reinforced Pad”):** almohadilla elaborada con capas alternadas de elastómero y fibra de vidrio unidas entre si por vulcanización.

**Apoyo elastomérico (“PEP: Plain Elastomeric Pad”):** almohadilla elaborada exclusivamente de elastómero. Provee rotación y traslación limitada.

**Estado límite de servicio:** Límite de funcionalidad del componente que no afecta su integridad estructural, pero que compromete su uso o servicio.

**Estado último de resistencia:** Límite de capacidad estructural de un componente.

**Junta:** elementos estructural que facilita la traslación horizontal y rotación.

## ABSTRACT

The following Project is based in the design of bearings for bridges. For the design, The AASHTO LRFD Bridge Design Specification 6th Edition, is used. Specifically, two methods are used for design, Method A for elastomeric pads and steel-reinforced elastomeric bearings and Method B for steel-reinforced elastomeric bearings.

First of all, The Specification is analyzed to determine the main requirements of design. Later on, a design problem is calculated by hand using both methods. With the results, two design spreadsheets are completed using Excel. The spreadsheets and the hand calculations are attached at the end of the Project.

**AASHTO LRFD Bridge Design Specifications:** this specification is used to design, evaluate and rehabilitate bridges. The Federal Highway Administration of the United States requires that all bridges built by the government, must use this Specification. The design specification uses " LRFD " (Load and Resistance Factor Design) using factors from statistical information of loads and structural performance

**Bearing:** load transmitting structural element facilitating translation, rotation movements.

**Cotton-Duck Pad (CDP):** pad made with layers of elastomer and cotton duck bonded together.

**Fiberglass-Reinforced Pad (FGP):** pad made from alternating layers of elastomer and glass fiber bonded together by vulcanization.

**Plain Elastomeric Pad (PEP):** elastomer pad that provides limited rotation and translation.

**Service Limit State:** limit functionality of the component that does not affect its structural integrity, but compromises its service.

**Strength Limit State:** capacity limit of a structural component.

**Joint:** structural element that facilitates horizontal translation and rotation.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>Introducción.....</b>	<b>10</b>
<b>Capítulo I.....</b>	<b>12</b>
<b>1.1 Objetivos .....</b>	<b>12</b>
1.1.1 Objetivo General.....	12
1.1.2 Objetivos Específicos.....	12
<b>1.2 Justificación .....</b>	<b>12</b>
<b>Capítulo II.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 Tipos de Apoyo.....</b>	<b>13</b>
2.1.1 Apoyos tipo “Rocker”.....	13
2.1.2 Apoyos tipo “Roller”.....	14
2.1.3 Apoyos Deslizantes.....	15
2.1.4 Apoyos tipo “Pot”.....	15
2.1.5 Apoyos Elastoméricos.....	17
<b>Capítulo III .....</b>	<b>19</b>
<b>3.1 Requerimientos de Diseño:.....</b>	<b>19</b>
3.1.1 Requerimientos para Apoyos Elastoméricos Reforzados con Acero.....	20
3.1.2 Requerimientos para Apoyos tipo “Pot” y Apoyos Deslizantes Curvos.....	20
3.1.3 Requerimientos para Apoyos con Disco.....	20
<b>Capítulo IV.....</b>	<b>22</b>
<b>4.1 Diseño de Juntas .....</b>	<b>22</b>
<b>4.2 Requerimientos.....</b>	<b>22</b>
4.2.1 Diseño Estructural.....	22
4.2.2 Geometría.....	23
4.2.3 Materiales.....	23
4.2.4 Mantenimiento.....	23
<b>4.3 Selección .....</b>	<b>24</b>
4.3.1 Número de Juntas.....	24
4.3.2 Lugar de colocación de las Juntas.....	24
<b>4.4 Requerimientos de Diseño.....</b>	<b>25</b>
4.4.1 Movimientos durante construcción.....	25
4.4.2 Movimientos de Diseño.....	25
4.4.3 Protección.....	26
4.4.4 Placas de Unión.....	27
4.4.5 Armadura.....	27
4.4.6 Anclaje.....	27
4.4.7 Pernos.....	28
<b>4.5 Consideraciones específicas para cada tipo de junta .....</b>	<b>28</b>
4.5.1 Juntas abiertas.....	28
4.5.2 Juntas cerradas.....	29
4.5.3 Juntas a prueba de agua.....	29
4.5.4 Juntas selladas.....	30
<b>4.6 Sistema modular de juntas (MBS).....</b>	<b>30</b>
4.6.1 General.....	30
4.6.2 Requerimientos de funcionamiento.....	31
4.6.3 Requerimientos de cálculos y ensayos.....	33
4.6.4 Cargas y factores de carga.....	33

4.6.5 Distribución de cargas de las llantas.....	35
4.6.6 Requerimientos de diseño para el estado último de resistencia.....	36
4.6.7 Requerimientos de diseño para el estado límite de fatiga.....	37
<b>Capítulo V.....</b>	<b>44</b>
<b>5.1 Requerimientos para el diseño de apoyos.....</b>	<b>44</b>
<b>5.2 Características de los tipos de apoyo.....</b>	<b>45</b>
<b>5.3 Fuerzas resultantes en el apoyo.....</b>	<b>46</b>
5.3.1 Fuerza horizontal y movimientos.....	46
5.3.2 Momento.....	47
5.3.4 Eventos extremos.....	49
<b>Capítulo VI.....</b>	<b>52</b>
<b>6.1 Diseño de apoyos.....</b>	<b>52</b>
6.1.1 Apoyos tipo rocker y roller.....	52
6.1.2 Apoyos con superficies de politetrafluoroetileno (superficies PTFE).....	55
6.1.3 Apoyos con superficies deslizantes curvas.....	58
6.1.4 Apoyos tipo “pot”.....	62
6.1.5 Apoyos Elastoméricos Reforzados - Método B.....	68
6.1.6 Apoyos elastoméricos reforzados- Método A.....	79
6.1.7 Superficies deslizantes de bronce y aleaciones de cobre.....	87
6.1.8 Apoyos de disco.....	89
<b>Desarrollo del Tema.....</b>	<b>92</b>
<b>Método A.....</b>	<b>92</b>
<b>Método B.....</b>	<b>94</b>
<b>Conclusiones.....</b>	<b>97</b>
<b>Referencias bibliográficas.....</b>	<b>98</b>
<b>Anexo A: Diseño de apoyos elastoméricos reforzados- Método A - Cálculos a mano</b> .....	<b>99</b>
<b>Anexo B: Diseño de apoyos elastoméricos reforzados- Método B - Cálculos a mano</b> .....	<b>102</b>
<b>Anexo C: Diseño de apoyos elastoméricos reforzados - Método A - Hoja de cálculo</b> .....	<b>107</b>
<b>Anexo D: Diseño de apoyos elastoméricos reforzados- Método B- Hoja de cálculo</b> .....	<b>113</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1. Rango de movimientos mínimos adicionales para sistemas MBSJ .....</b>	<b>32</b>
<b>Tabla 2. Factor de carga dinámica .....</b>	<b>34</b>
<b>Tabla 3. Factor de distribución para la viga central.....</b>	<b>36</b>
<b>Tabla 4. Aplicaciones para cada tipo de apoyo.....</b>	<b>46</b>
<b>Tabla 5. Esfuerzo de contacto máximo para superficies PTFE en el estado límite de servicio (ksi).....</b>	<b>57</b>
<b>Tabla 6. Coeficientes de fricción de diseño- Estado límite de servicio .....</b>	<b>58</b>
<b>Tabla 7. Propiedades de materiales para determinar rigidez en Escala “Shore A” .....</b>	<b>78</b>
<b>Tabla 8. Esfuerzo en el apoyo en el Estado Límite de Servicio .....</b>	<b>89</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1. Componentes de un apoyo expansible tipo “roller” .....</b>	<b>14</b>
<b>Figura 2. Componentes de un apoyo deslizante.....</b>	<b>15</b>
<b>Figura 3. Componentes de un apoyo tipo “pot”.....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 4. Sistema modular de junta con múltiples barras soldadas de soporte.....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 5. Sistema modular de junta con barra simple de soporte.....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 6. Fuerzas asociadas al Tipo de Agrietamiento A.....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 7. Fuerzas asociadas al Tipo de Agrietamiento B.....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 8. Geometría resistencia a carga lateral para apoyos con superficies PTFE.....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 9. Elementos de los apoyos tipo “pot” .....</b>	<b>62</b>
<b>Figura 10. Curvas Esfuerzo-Deformación .....</b>	<b>83</b>
<b>Figura 11. Vista en planta del apoyo.....</b>	<b>95</b>
<b>Figura 12. Sección del apoyo .....</b>	<b>96</b>

## INTRODUCCIÓN

El diseño de juntas y apoyos en un puente debe satisfacer varios aspectos. Uno de ellos es resistir cargas y acomodar movimientos para cumplir con los estados límites. Otro factor que se debe tomar en cuenta es la deformación debido a cambios de temperatura. Adicionalmente existen cargas inducidas en estos elementos estructurales que dependen de las rigideces de los otros elementos y también de la tolerancia de fabricación. Todos estos factores son de suma importancia para el diseño de apoyos en un puente.

Los apoyos de un puente son sistemas mecánicos que transmiten cargas de la superestructura a la subestructura, es decir, son la unión o interfaz entre la superestructura y la subestructura. Adicionalmente, los apoyos deben acomodar ciertos movimientos que se generan por expansión térmica, deflexiones de miembros del puente, frenado de carros y otros tipos de carga viva (Tonias & Zhao, 2006).

La importancia de los apoyos es incalculable. En algunos casos, los apoyos pueden obstruirse por acumulación de desechos, congelarse por exceso de corrosión o fallar en las funciones para las cuales fueron diseñadas, lo cual puede producir un incremento potencial de esfuerzos y por ende una falla de toda la estructura. La importancia del diseño de apoyos no es muy tomado en serio en algunos casos debido a que los diseñadores recaen en los fabricantes para el diseño. En muchos casos los diseñadores de puentes solo especifican las condiciones de carga y los movimientos que el puente pueda tener y dejan el resto del diseño a los fabricantes de apoyos. Este tipo de prácticas puede llevar a serios problemas estructurales en el futuro, por lo cual debe existir un cambio en el diseño de apoyos (Tonias & Zhao, 2006).

Como se mencionó anteriormente, los apoyos deben acomodar fuerzas y movimientos provenientes de la superestructura. Las fuerzas que pueden transmitirse son:

- Reacciones
- Fuerzas longitudinales
- Fuerzas transversales
- Fuerzas verticales de levantamiento

Estos tipos de cargas se producen por distintos factores. Las reacciones se producen debido al efecto que producen los miembros del puente que actúan directamente en el centro del apoyo. Las reacciones provienen debido al efecto de la carga muerta y carga viva del puente. Las cargas longitudinales y transversales se originan por el efecto de la carga viva, viento o terremotos. Las fuerzas transversales producen momentos en los apoyos que son igual a la fuerza multiplicado por la altura del apoyo.

# CAPÍTULO I

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo General.

Diseñar apoyos y elaborar hojas de cálculo con las provisiones de la Especificación “AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th Edition”

### 1.1.2 Objetivos Específicos.

- Identificar y conocer los diferentes tipos de apoyos y juntas.
- Determinar los requerimientos para el diseño de apoyos y juntas.
- Diseñar apoyos con el Método A para apoyos elastoméricos reforzados con acero y fibras.
- Diseñar apoyos con el Método B para apoyos elastoméricos reforzados con acero.

## 1.2 Justificación

Este proyecto se realizó en vista de que el diseño de juntas y apoyos es un factor primordial para el buen funcionamiento de un puente. En algunos casos el diseño de apoyos no es tomado en serio y los diseñadores simplemente delegan al constructor la selección de los mismos. Es decir, los diseñadores solo dan las cargas finales que se ejercerán sobre el puente y dejan el resto del problema a los fabricantes de apoyos. En estos casos se pueden dar serios problemas y fallas estructurales irreparables. Es por esto que nace la idea de concientizar en el diseño de apoyos. Este proyecto busca explicar el proceso de diseño y además elaborar una guía de diseño para apoyos reforzados con acero y otras fibras.

## CAPÍTULO II

### 2.1 Tipos de Apoyo

Existen varios y diversos tipos de apoyos con diferentes funcionalidades. Las aplicaciones varían dependiendo de las cargas y movimientos a las cuales esté sometido el puente. Originalmente se utilizaban apoyos mecánicos fabricados con acero para la mayoría de puentes, sin embargo con el paso del tiempo se empezaron a usar apoyos hechos con fibras sintéticas como son los apoyos elastoméricos. A continuación se discutirán a profundidad los distintos tipos de apoyo.

#### 2.1.1 Apoyos tipo “Rocker”.

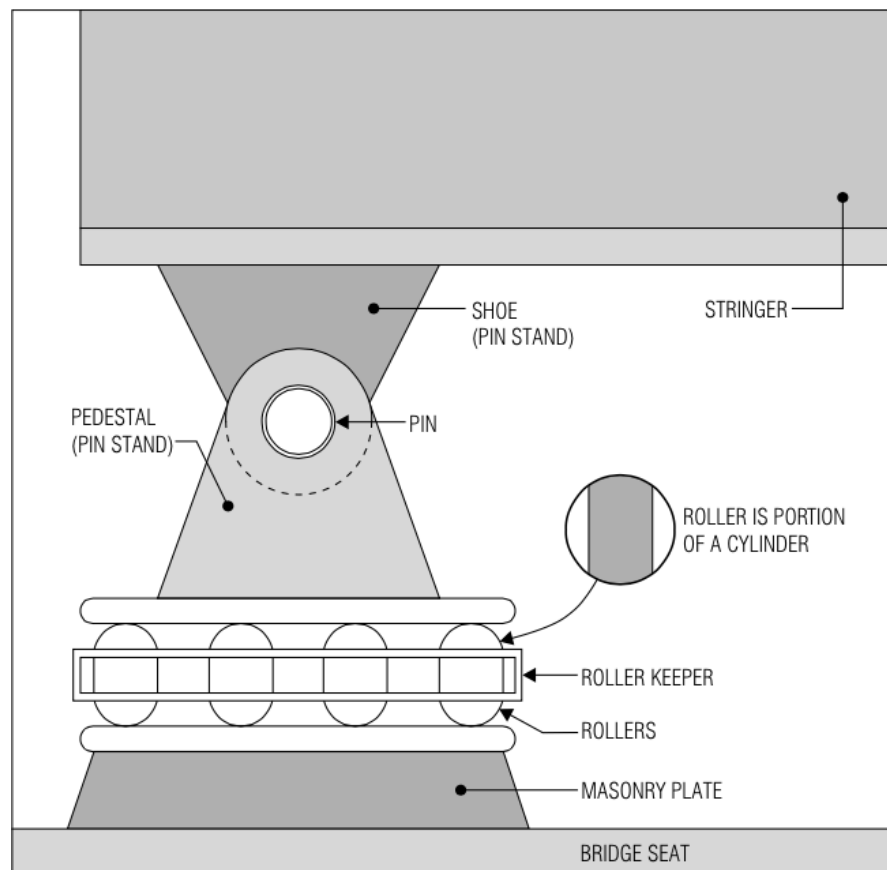
Los apoyos “rocker” son un tipo de apoyo fijo que acomoda grandes deflexiones provenientes de carga viva. Típicamente este tipo de apoyo se utiliza para puentes con luces de 15 metros en adelante. El apoyo es fabricado con acero y es conectado a la subestructura por medio de un bloque de hormigón con una placa de acero sujeta. La conexión a la superestructura se realiza con una placa de acero soldada o empernada al borde inferior del miembro que se tenga por encima del apoyo (Tonias & Zhao, 2006).

Para prevenir que el apoyo se mueva de su sitio se utilizan pivotes para resistir fuerzas longitudinales. Los pivotes son extrusiones trapezoidales provenientes de la placa inferior. En el apoyo se deja un pequeño hueco para que el pivote encaje. Para que el apoyo resista rotaciones se utiliza un pin circular que atraviesa el mecanismo. De esta forma el apoyo se comporta como una bisagra y puede resistir rotaciones. La fabricación de apoyos tipo “rocker” tiene tolerancias extremadamente pequeñas, por lo cual deben ser elaborados con un estricto control de calidad.

### 2.1.2 Apoyos tipo “Roller”.

Los apoyos tipo “roller” se parecen mucho a los apoyos tipo “rocker” ya que también utilizan un pin en su mecanismo. El pin ayuda a la estructura a acomodar rotaciones. Adicionalmente se utilizan rodillos para facilitar movimientos de traslación. Este tipo de apoyos son utilizados en puentes con luces medianas (Tonias & Zhao, 2006).

La Especificación AASHTO requiere que los apoyos tipo “roller” sean equipados con engranajes y barras estabilizadoras para evitar movimientos laterales, deformaciones y desgaste. También se debe proteger al apoyo para prevenir el ingreso de agua y suciedad en el mecanismo.

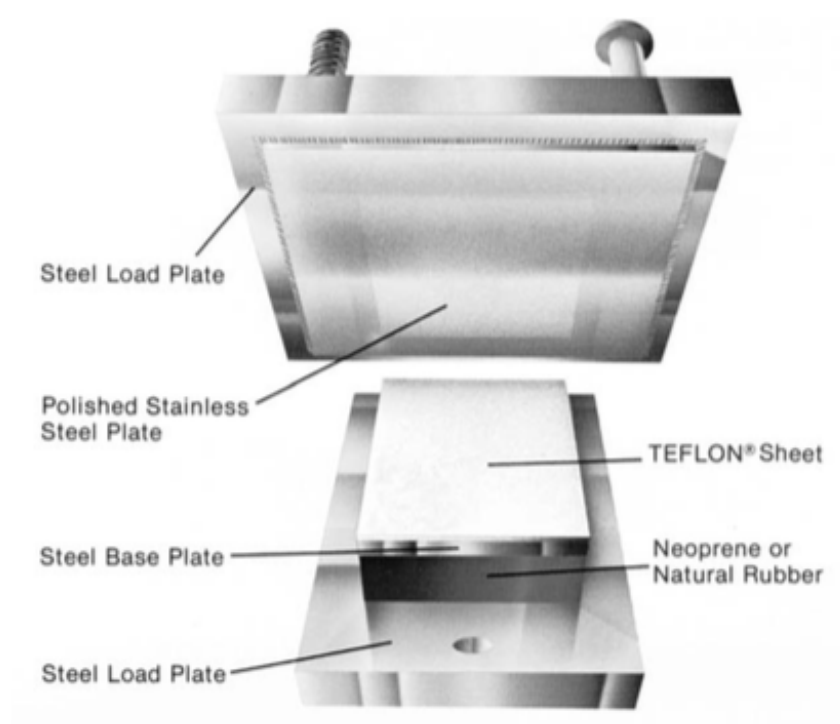


**Figura 1. Componentes de un apoyo expansible tipo “roller”**

Fuente: Tonias D., Zhao J. (2006). Design, Rehabilitation and Maintenance of Modern Highway Bridges. Estados Unidos: McGraw-Hill.

### 2.1.3 Apoyos Deslizantes.

Este tipo de apoyos utiliza una placa que se desliza sobre otra para acomodar movimientos de traslación. Las rotaciones pueden ser acomodadas dependiendo de la magnitud anticipada de las mismas. Para puentes con luces de 15 metros o menos, AASHTO permite obviar las deflexiones. De esta manera, los apoyos deslizantes serán más aptos para puentes con luces dentro de este rango. Estos apoyos pueden ser fabricados con acero, Teflón o bronce (Tonias & Zhao, 2006). A continuación se muestra una figura con los elementos de un apoyo deslizante:



**Figura 2. Componentes de un apoyo deslizante**

Fuente: Tonias D., Zhao J. (2006). Design, Rehabilitation and Maintenance of Modern Highway Bridges. Estados Unidos: McGraw-Hill.

### 2.1.4 Apoyos tipo "Pot".

Los apoyos tipo "pot" pueden acomodar grandes rotaciones y cargas verticales. Estos apoyos están conformados por un cilindro de acero vertical, un disco de neopreno, anillos de

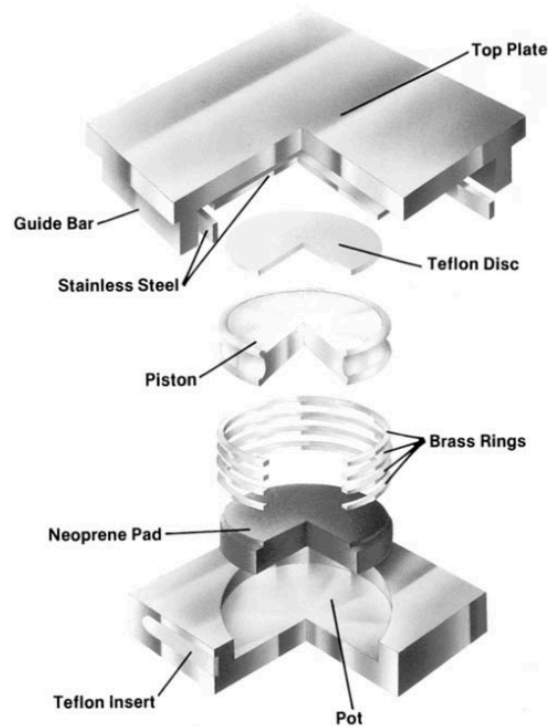
bronce y un pistón. El disco de neopreno se confina dentro del cilindro con la ayuda de los anillos de bronce. De esta forma el pistón transmite presión y se genera un esfuerzo hidrostático en el elastómero. Un estado hidrostático es aquel donde el esfuerzo en cualquier dirección tiene la misma magnitud y el esfuerzo cortante es igual a cero (Tonias & Zhao, 2006).

El cilindro de confinamiento permite que el elastómero soporte mayores cargas de las que pudiera resistir por si solo. Si el disco estuviera solo, se deformaría incontrolablemente. Sin embargo existen casos en los que el elastómero puede salirse del cilindro. Esto puede ser causado por demasiado espacio libre entre el pistón y el cilindro o por deformación del anillo de confinamiento. Para evitar estos problemas se debe mantener una estricta tolerancia al momento de fabricación de los elementos que conforman el apoyo.

Los apoyos “pot” también son equipados con placas deslizantes para soportar movimientos de traslación. Estas placas pueden ser fabricadas de Teflón, acero inoxidable u otro material.

Otro factor muy importante que interviene en el funcionamiento de este tipo de apoyos es el diseño del soporte o pedestal del apoyo que se utiliza para unir el apoyo con la subestructura. Este soporte debe ser diseñado en concreto reforzado para soportar grandes esfuerzos provocados por las reacciones del apoyo. Se debe evitar completamente el uso de placas u otros dispositivos para ajustar la altura final del pedestal. Estos elementos pueden causar elevados esfuerzos localizados y pueden llevar al fallo del apoyo. A continuación se muestra una figura con todos los elementos que conforman los apoyos “pot”:





**Figura 3. Componentes de un apoyo tipo “pot”**

Fuente: Tonias D., Zhao J. (2006). Design, Rehabilitation and Maintenance of Modern Highway Bridges. Estados Unidos: McGraw-Hill.

### 2.1.5 Apoyos Elastoméricos.

Los apoyos elastoméricos pueden ser de dos tipos: reforzados o no reforzados. Los reforzados son aquellos que tienen láminas de acero pegadas alternadamente al elastómero. El elastómero y el acero conforman un bloque sólido libre de orificios. El refuerzo ayuda al apoyo a evitar abultamiento y también acomoda movimientos verticales y horizontales.

Los apoyos elastoméricos son relativamente nuevos inventos que brindan varios beneficios al diseño de carreteras. Uno de sus puntos a favor es que no necesitan mayor mantenimiento ya que sus componentes no presentan mucho desgaste al no estar constantemente moviéndose. Como se vio anteriormente, los apoyos con sistemas mecánicos necesitan mayor cuidado y mantenimiento. Sin embargo, los elastómeros

también pueden sufrir fallas como deformaciones exageradas, cortes o fisura. Estos problemas deben ser correctamente atendidos por personal competente (Tonias & Zhao, 2006).

Entre los factores que pueden provocar daños y fallos en apoyos elastoméricos están:

- Tamaño insuficiente
- Mala fabricación
- Refuerzo insuficiente
- Exposición a agentes corrosivos
- Condiciones extremas de carga

## CAPÍTULO III

### 3.1 Requerimientos de Diseño:

- Los movimientos mínimos debido a cambios de temperatura deben ser obtenidos de la temperatura máxima especificada en el Artículo 3.12.2 de la Especificación "AASHTO LRFD *Bridge Design Specifications 6th Edition*"
- Las cargas de diseño deben ser calculadas basándose en las combinaciones de carga y factores de carga de la Sección 3 de la Especificación AASHTO.
- La rotación en apoyos debe ser considerada para los estados último y de servicio.
- Los apoyos deben acomodar movimientos de la estructura para soportar cargas.
- Las rotaciones debidas a carga viva por lo general no superan los 0.005 radianes, sin embargo las rotaciones durante fabricación y ensamblaje son mayores y deben ser tomadas en cuenta.
- El Artículo 14.8.2 de la Especificación "AASHTO LRFD *Bridge Design Specifications 6th Edition*" especifica en qué circunstancias se debe utilizar una placa cónica si la rotación debido a carga viva y carga muerta se vuelve excesiva.
- El fallo de elementos deformables como juntas y apoyos, debe ocurrir por deterioro y no por una falla brusca debido a la aplicación de cargas. El deterioro se da por varios ciclos de carga y descarga.

- Los componentes de concreto o metal son susceptibles a daños frente a una sola rotación, es por esto que los elementos fabricados con estos materiales deben ser diseñados con el estado último de resistencia.

### **3.1.1 Requerimientos para Apoyos Elastoméricos Reforzados con Acero.**

La máxima rotación en el estado límite de servicio debe ser tomada en cuenta como la sumatoria de:

- Las rotaciones debido a la combinación de cargas de servicio de la Tabla 3.4.1-1
- Tolerancia de 0.005 radianes por incertidumbres a menos que se tenga un control de calidad que justifique una menor rotación

### **3.1.2 Requerimientos para Apoyos tipo "Pot" y Apoyos Deslizantes Curvos.**

La máxima rotación en el estado último de resistencia debe ser tomada en cuenta como la suma de:

- Las rotaciones debido a la combinación de cargas últimas de la Tabla 3.4.1-1
- Tolerancia de 0.005 radianes por incertidumbres a menos que se tenga un control de calidad que justifique una menor rotación
- La rotación máxima causada por fabricación e instalación que se toma en cuenta como 0.005 radianes.

### **3.1.3 Requerimientos para Apoyos con Disco.**

La máxima rotación en el estado último de resistencia debe ser tomada en cuenta como la suma de:

- Las rotaciones debido a la combinación de cargas últimas de la Tabla 3.4.1-1

- Tolerancia de 0.005 radianes por incertidumbres a menos que se tenga un control de calidad que justifique una menor rotación

## CAPÍTULO IV

### 4.1 Diseño de Juntas

Las juntas deben consistir de componentes arreglados de tal forma para que se puedan acomodar traslaciones y rotaciones de la estructura. Los movimientos y rotaciones son provocados por el movimiento y frenado de vehículos, motocicletas, bicicletas y cruce peatonal. La junta no puede sufrir daños para poder asegurar un normal flujo de vehículos en el puente. Adicionalmente la junta debe tener protección al agua, agentes químicos y también al desgaste.

Las juntas deben ser utilizadas cuando se tenga la necesidad de acomodar los efectos de movimientos diferenciales laterales y ó verticales entre la superestructura y la subestructura del puente. También se pueden usar apoyos elastoméricos para soportar movimientos laterales cuando sea posible.

### 4.2 Requerimientos

#### 4.2.1 Diseño Estructural.

Las juntas deben ser diseñadas para soportar las fuerzas provocadas por los estados límite apropiados. Los siguientes factores deben ser tomados en cuenta al momento de determinar los efectos de las cargas y los movimientos:

- Propiedades de los materiales en la estructura, incluyendo el coeficiente de expansión térmica, módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson
- Efectos de temperatura, expansión y contracción
- Tamaño de los componentes estructurales
- Tolerancias de construcción

- Métodos y secuencias de construcción
- Resistencia de las juntas a movimientos
- Movimientos de la subestructura por movimiento de tierra
- Movimientos en los cimientos por estabilización y consolidación de subsuelos
- Respuestas estructurales dinámica y estática

#### **4.2.2 Geometría.**

Las superficies móviles de las juntas deben ser diseñadas para trabajar en conjunto con los apoyos. De esta manera se evitarán desuniones en las juntas; las cuales provocan fuerzas adicionales en los apoyos. Adicionalmente, es preferible que las juntas estén alineadas verticalmente y horizontalmente para simplificar movimientos que perjudiquen a la estructura.

#### **4.2.3 Materiales.**

Los materiales deben ser seleccionados para asegurar que sean compatibles elásticamente, térmicamente y químicamente. Cuando existan diferencias substanciales, se utilizarán interfaces de materiales para proveer un sistema funcional compatible. Se debe dar preferencia a materiales que no necesiten mayor mantenimiento y que no sean afectados por las variables de instalación. También se debe dar prioridad a materiales que se encuentren disponibles en el mercado una vez que se necesite mantenimiento o reemplazamiento de elementos.

#### **4.2.4 Mantenimiento.**

Las juntas deben ser diseñadas de tal forma que puedan operar con el menor mantenimiento posible a lo largo de la vida útil del puente. Para esto, se debe proveer

acceso a las juntas por abajo del “deck” del puente para dar el mantenimiento deseado. Los componentes mecánicos y elastoméricos de las juntas deben ser reemplazables en cualquier situación. Adicionalmente las juntas deben ser diseñadas para facilitar extensión vertical para acomodar una posible superposición en la carretera.

La posición de los apoyos, componentes estructurales , juntas y la configuración superior de los pilares deben elegirse a fin de proporcionar suficiente espacio y acceso a las juntas por debajo de la cubierta del puente . Para puentes donde no se pueda acceder a las juntas desde el suelo, se deben instalar escotillas de control , escaleras , plataformas o pasarelas.

### **4.3 Selección**

#### **4.3.1 Número de Juntas.**

El número de juntas en una estructura debe ser minimizado. Se debe dar preferencia a puentes con sistemas continuos de cubierta y también a superestructuras con puentes integrales.

En el caso de puentes con luz simple, es necesario proveer juntas a la altura de los pilares para acomodar asentamientos diferenciales. Se deben considerar juntas intermedias para puentes con varias luces donde los asentamientos diferenciales puedan resultar en sobreesfuerzos. Los puentes que poseen vigas secundarias de acero pueden soportar asentamientos diferenciales substanciales sin producir esfuerzos secundarios significantes.

#### **4.3.2 Lugar de colocación de las Juntas.**

Las juntas deben ser evitadas en autopistas, líneas férreas, calzadas, otros espacios públicos y en el punto más bajo de puentes cóncavos. Las juntas abiertas deben ser colocadas solamente cuando el drenaje pueda descargar el agua lejos del apoyo.



Las juntas a prueba de agua deben ser utilizadas cuando las juntas pasen por elementos estructurales del puente o por los apoyos. De esta forma se evita el desgaste de los elementos estructurales y la acumulación de escombros. Del mismo modo cuando las juntas estén expuestas a agentes químicos, se debe usar juntas cerradas.

Los sistemas modulares de juntas deben ser instalados paralelos al eje longitudinal del puente. En la medida de lo posible, estos sistemas deben ser instalados a una distancia considerable de señales de tráfico y de peajes para evitar fuerzas excesivas de frenado.

#### **4.4 Requerimientos de Diseño**

##### **4.4.1 Movimientos durante construcción.**

Las juntas deben acomodar movimientos provenientes de los pilares y los cimientos del puente. Cuando se necesite acomodar este tipo de movimientos antes de la instalación de juntas, se pueden utilizar las siguientes técnicas de construcción:

- Acelerar la consolidación de suelos
- Soportar los pilares con rellenos de tierra para evitar movimientos
- Bloquear los movimientos de la losa de hormigón para permitir la colocación de la mayor parte de carga muerta antes de la instalación de las juntas

##### **4.4.2 Movimientos de Diseño.**

Un espacio hueco,  $W$ , medido en la dirección del tráfico para una junta transversal; debe cumplir lo siguiente:

- Para un espacio hueco simple:

$$W \leq 4.0 \text{ in.}$$

- Para espacios huecos múltiples:

$$W \leq 3.0 \text{ in.}$$

Para estructuras fabricadas en acero y madera, el espesor mínimo de los espacios huecos para una junta transversal es de 1.0 in. Para superestructuras fabricadas en hormigón, también se debe dejar un espesor mínimo de espacio hueco de 1.0 in. para soportar expansión y encogimiento del hormigón.

Para juntas longitudinales, el espesor máximo de espacio hueco no debe exceder 1.0 in. en el estado último de resistencia.

En el mayor valor de movimiento, la abertura entre “fingers” y el “finger plate”, no debe exceder:

- 2.0 in. para aberturas longitudinales mayores a 8.0 in.
- 3.0 in. para aberturas longitudinales de 8.0 in. o menores

Los espesores máximos están diseñados para salvaguardar el tráfico de motocicletas.

En caso de existir bicicletas en el tráfico, se debe considerar el uso de placas que cubran el piso.

#### **4.4.3 Protección.**

Las juntas deben ser diseñadas para acomodar efectos del tráfico vehicular, efectos de maquinaria pavimentadora y también efectos a largo plazo provocados por cambios ambientales.

Las juntas en cubiertas de concreto, deben ser diseñadas con armaduras de acero, piezas fundidas o piezas soldadas. Estas armaduras deben ser empotradas bajo la carpeta de rodadura.

Las juntas instaladas en pavimento, deben ser provistas con alivio de presión y/o anclajes de pavimento.

#### **4.4.4 Placas de Unión.**

Las juntas tipo placa y las “finger plates” deben ser diseñadas como elementos en voladizo para que sean capaces de soportar cargas de vehículos en el estado último de resistencia.

Los asentamientos diferenciales entre los dos lados de una junta tipo placa debe ser investigado. Si el asentamiento no puede ser reducido a valores aceptables, se debe utilizar otro tipo de junta.

No se deben utilizar placas tipo junta rígidas en apoyos elastoméricos a menos que sean diseñadas como miembros en voladizo y que el contrato especifique que se requieren para evitar desunión en la junta provocada por movimientos horizontal y verticales en el apoyo.

#### **4.4.5 Armadura.**

Las armaduras de junta que se encuentre embebidas en concreto deben tener agujeros de ventilación con 0.75 in. de diámetro espaciados no más de 18.0 in. entre centros. Los agujeros de ventilación son necesarios para expeler aire atrapado.

Las superficies de metal que sean más anchas de 12.0 in. expuestas a tráfico vehicular, deben ser provistas con un tratamiento antideslizante.

#### **4.4.6 Anclaje.**

El anclaje de armaduras y conectores de corte deben ser provistos para asegurar un comportamiento compuesto entre el substrato de concreto y la junta. Para prevenir corrosión en la superficie de la junta se debe sellar los límites entre la armadura y el substrato de concreto.

Los anclajes para armaduras de juntas en carreteras, deben ser conectados directamente a apoyos estructurales. También pueden ser extendidos para acoplarse con el substrato de concreto reforzado.

Los bordes libres de los anclajes, apartados más de 3.0 in. de otro anclajes, deben ser provistos conectores soldados de 0.5 in. de diámetro que posean una longitud de no menos de 4.0 in. espaciados a no más de 12.0 in. de los demás anclajes.

#### **4.4.7 Pernos.**

Los pernos utilizados para sellamiento, unión y anclaje de juntas, deben ser de alta resistencia y resistentes a torque. En una construcción nueva, se deben utilizar anclajes fundidos en el sitio. Adicionalmente, no se deben utilizar pernos y anclajes de expansión en construcciones nuevas.

### **4.5 Consideraciones específicas para cada tipo de junta**

#### **4.5.1 Juntas abiertas.**

Las juntas abiertas son aquellas que permiten flujo libre de agua a través de la junta. Este tipo de juntas no debe ser utilizado cuando se aplican productos químicos para deshielo. Los pilares que se encuentran bajo juntas abiertas, deben cumplir los requerimientos del Artículo 2.5.2 de la Especificación AASHTO LRFD 6ta Edición, para prevenir la acumulación de agua y escombros.

Bajo ciertas circunstancias, las juntas abiertas pueden ser una solución muy efectiva y económica. En general, las juntas cerradas son aplicables para carreteras de segundo orden donde exista poca exposición a sales y arena. Por otro lado, no son aplicables para áreas urbanas donde el costo de drenajes es elevado.

El rendimiento de la junta depende principalmente de un sistema de drenaje efectivo. Es esencial que el drenaje no permita la acumulación de agua o escombros en ningún punto de la estructura.

#### **4.5.2 Juntas cerradas.**

Las juntas cerradas deben sellar la superficie del “deck” incluyendo las aceras, barreras, drenajes etc. Se debe prevenir la acumulación de agua y escombros ya que pueden intervenir en el normal funcionamiento de la junta. Las juntas deben ser impermeables y deben extrudir escombros al cerrarse.

Cuando los movimientos de una junta son acomodados por un cambio en geometría de membranas elastoméricas, las membranas no pueden estar expuestas a contacto directo con las ruedas de los vehículos.

#### **4.5.3 Juntas a prueba de agua.**

La protección al agua para un sistema de juntas, debe ser diseñado para recolectar, conducir y descargar fuera de la estructura el agua proveniente del “deck”. En el diseño del drenaje se debe dar consideración a:

- Pendientes de los drenajes no menores a 1.0 in/ft
- Drenajes con aberturas grandes de descarga
- Drenajes prefabricados
- Canales fabricados con acero inoxidable u otro metal con revestimiento
- Canales reemplazables por debajo de la junta
- Juntas de metal soldadas y empalmes elastoméricos vulcanizados

#### **4.5.4 Juntas selladas.**

Este tipo de juntas debe acomodar movimientos anticipados. Para escoger el tipo de sellamiento se deben considerar a las juntas que:

- Sean prefabricadas o preformadas
- Se puedan reemplazar sin mayor modificación de la junta
- No soportan cargas vehiculares
- Puedan ser instaladas en una sola pieza
- Son instaladas bajo armaduras
- Son ancladas mecánicamente
- Responden a cambios en el ancho de junta sin mayor resistencia

El material elastomérico para las juntas deber ser:

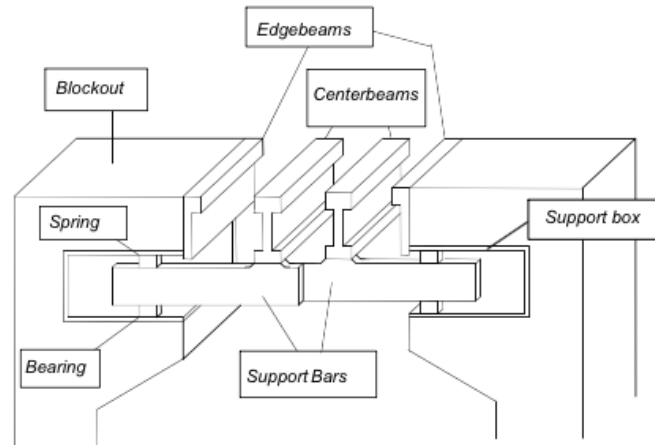
- Durable, de neopreno virgen o caucho natural y reforzado con acero
- Vulcanizado
- Verificadas para carga cíclica prolongada
- Conectado con adhesivos curados químicamente

### **4.6 Sistema modular de juntas (MBSJ)**

#### **4.6.1 General.**

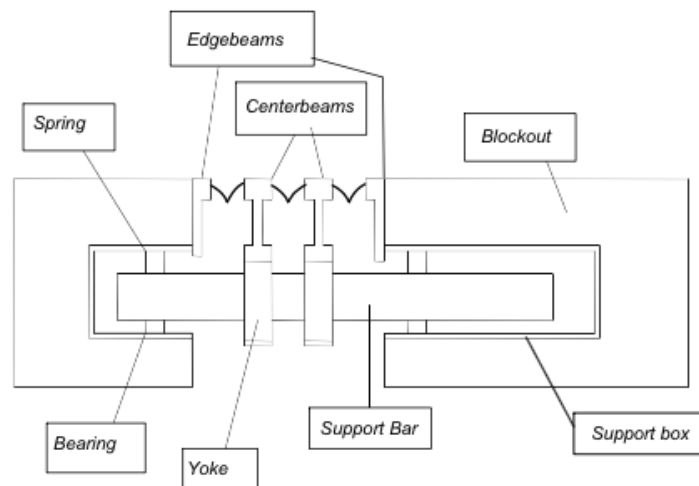
Este artículo especifica los requerimientos necesarios de diseño para el estado último de resistencia y el estado límite de fatiga para los sistemas modulares de juntas (MBSJ). Esta especificación es aplicable para los dos tipos de MBSJ, con barra de soporte simple y con barra de soporte múltiple.

Estas especificaciones ofrecen un método racional y conservativo para el diseño de la carga total que soporta el sistema de componentes MBS. A continuación se muestra un tipo común de un sistema MBS:



**Figura 4. Sistema modular de junta con múltiples barras soldadas de soporte**

Fuente: American Association of State Highway and Transportation Officials (2012). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th Ed. Washington, D.C.



**Figura 5. Sistema modular de junta con barra simple de soporte**

Fuente: American Association of State Highway and Transportation Officials (2012). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th Ed. Washington, D.C.

#### 4.6.2 Requerimientos de funcionamiento.

Los movimientos mínimos requeridos para los 6 posibles grados de libertad para sistemas MBS deben ser añadidos a los movimientos y rotaciones calculados para la

combinación de carga aplicable. La Tabla 14.5.6.9.2-1 de la Especificación "AASHTO LRFD *Bridge Design Specifications 6th Edition*" muestra los movimientos mínimos que deben ser añadidos. A continuación se muestra la Tabla 14.5.6.9.2-1:

**Tabla 1. Rango de movimientos mínimos adicionales para sistemas MBS**

Type of Movement	Minimum Design Movement Range*
Longitudinal Displacement	Estimated Movement + 1.0 in.
Transverse Movement	1.0 in.
Vertical Movement	1.0 in.
Rotation around Longitudinal Axis	1°
Rotation Around Transverse Axis	1°
Rotation Around Vertical Axis	0.5°

\* Total movement ranges presented in the table are twice the plus or minus movement.

Fuente: American Association of State Highway and Transportation Officials (2012). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th Ed. Washington, D.C.

Los sistemas MBS deben ser diseñados y detallados de forma que se minimice el ruido y vibración excesivo con el paso de tráfico.

Un problema típico de estos sistemas es que las juntas pueden llenarse con escombros. El tráfico que pasa sobre la junta compacta todos los escombros. Los sistemas MBS pueden expulsar esta suciedad a los carriles si las juntas están abiertas cerca de su apertura máxima. Es por esto que es prudente proveer una capacidad de movimiento mayor en la junta.

Los sistemas MBS deben permitir movimientos en los 6 grados de libertad. Adicionalmente se deben permitir traslaciones en 3 direcciones y rotaciones a lo largo de 3 ejes. Si bien es obligatoria proporcionar al menos un movimiento de 1.0 in. en la dirección



longitudinal , como se muestra en la Tabla 14.5.6.9.2-1 , no se debe proporcionar más de 2.0 in. en adición al movimiento máximo calculado.

Además, los sistemas MBSJ también deben proporcionar el movimiento máximo calculado en los 5 grados de libertad exceptuando la dirección longitudinal. Se debe proveer los rangos mínimos de movimiento mostrados en la Tabla 14.5.6.9.2-1 de la Especificación AAHSTO LRFD 6ta Edición. Se supondrá que la mitad del rango de movimiento se producirá en cada dirección en relación a la posición media. Algunos puentes pueden requerir valores mayores que los valores mínimos especificados en la Tabla.

#### **4.6.3 Requerimientos de cálculos y ensayos.**

Los sistemas MBSJ deben satisfacer todos los ensayos detallados en el Apéndice A de la Especificación “AASHTO LRFD *Bridge Design Specifications*” Cada configuración de MBSJ debe ser diseñada para los estados límite de resistencia, fatiga y fractura.

#### **4.6.4 Cargas y factores de carga.**

Las vigas borde, anclajes, vigas centrales, barras de soporte, conexiones entre vigas centro y barras de soporte, y las conexiones en general, deben ser diseñadas para los estados límite de resistencia, fatiga y fractura para carga simultánea vertical y horizontal. Las vigas borde y los anclajes de sistemas MBSJ que estén expuestos a nieve, deben ser diseñados también para cargas de remoción de nieve definidas en el Artículo 14.5.1.2 de la Especificación “AASHTO LRFD *Bridge Design Specifications*”.

Las cargas de las llantas de cada eje deben estar apartadas 72 in. transversalmente. Cada carga de las llantas debe ser distribuida a las vigas borde y a las vigas centro. La fracción de carga de las llantas que se aplicada a cada miembro, deben ser cargas lineales aplicadas en el centro cada miembro y sobre un espesor de 20.0 in.

Las cargas verticales de los ejes para el estado límite de fatiga, son la mitad de la carga del camión de diseño, es decir 16.0 kips. (Artículo 3.6.1.2.2, AASHTO LRFD *Bridge Design Specifications*). Esta reducción se realiza para reconocer que el eje principal del camión de diseño, es una simplificación de un eje del tándem de diseño. Esta simplificación no es satisfactoria para los sistemas MBS y otros tipos de juntas de expansión debido a que este tipo de juntas experimentan ciclos de esfuerzos separados para cada eje individual.

En el estado último de resistencia existen dos combinaciones de carga que pueden ser consideradas. Sin embargo, como se reconoció que cada eje del camión de diseño debe ser tratado como un tándem de 32.0 kips., es claro que el tándem de diseño de 50 kips. que no se utiliza para diseño de fatiga, gobernará el diseño último de resistencia.

Para el estado último de resistencia, las cargas verticales deben ser las del tándem de diseño especificado en el Artículo 3.6.1.2.3; las cargas del camión de diseño del Artículo 3.6.1.2.2, también deben ser consideradas para el diseño último de resistencia para los sistemas MBS. Los dos ejes del tándem deben ser considerados si la junta tiene una abertura de más de 4.0 ft. La carga vertical de las llantas deberá ser incrementada por el factor de carga dinámica, especificado en la Tabla 3.6.2.1-1 de la Especificación “AASHTO LRFD *Bridge Design Specifications*” que se muestra a continuación:

**Tabla 2. Factor de carga dinámica**

Component	IM
Deck Joints—All Limit States	75%
All Other Components:	
• Fatigue and Fracture Limit State	15%
• All Other Limit States	33%

Fuente: American Association of State Highway and Transportation Officials (2012). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th Ed. Washington, D.C.

La carga horizontal para el estado último de resistencia debe ser el 20 por ciento de la carga vertical vehicular (LL+IM), aplicada sobre la misma línea en la superficie superior de las vigas borde o vigas centro. Para sistemas MBS con grados de inclinación mayores al 5 por ciento, se debe tomar en cuenta la componente horizontal adicional.

El rango de carga vertical para el estado límite de fatiga debe ser el mayor de las tres cargas del camión de diseño. La carga del eje debe ser considerada como la carga total del tándem, es decir, la carga total debe ser dividida en dos cargas de eje separadas 4.0 ft. Estas dos cargas de eje del tándem, deben ser tomadas en cuenta que la abertura de la junta excede 4.0 ft. El rango de carga vertical debe ser incrementado por el factor de carga dinámica. Los factores de carga a considerar deben ser los de la Tabla 3.4.1-1 para el Caso de Fatiga I.

Los rangos de carga horizontal para el estado límite de fatiga deben ser al menos el 20 por ciento de las cargas verticales de las llantas (LL+IM). Para sistemas MBS con grados de inclinación mayores al 5 por ciento, se debe tomar en cuenta la componente horizontal adicional.

#### **4.6.5 Distribución de cargas de las llantas.**

Cada viga borde debe ser diseñada para el 50 por ciento de carga vertical y horizontal de las llantas. La Tabla 14.5.6.9.5-1 de la Especificación "AASHTO LRFD *Bridge Design Specifications*" especifica el factor de distribución para las vigas centrales. Los factores de distribución de carga deben ser interpolados para vigas centrales con espesores de patín superiores no especificados en la tabla. En ningún caso el factor de distribución de carga

puede ser menor al 50 por ciento. La carga sobrante debe ser dividida en la mitad para las dos vigas adyacentes. A continuación se muestra la Tabla 14.5.6.9.5-1:

**Tabla 3. Factor de distribución para la viga central**

Width of Centerbeam Top Flange	Distribution Factor
2.5 in. (or less)	50%
3.0 in.	60%
4.0 in.	70%
4.75 in.	80%

Fuente: American Association of State Highway and Transportation Officials (2012). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th Ed. Washington, D.C.

Para facilitar el diseño de fatiga, la carga vertical del eje con impacto para una viga central de 2.5 in. o menos, puede ser tomada como 21.0 kips. En la viga central, cada fracción de la carga de las llantas de 10.5 kips, están espaciadas 72.0 in. sobre un espesor de 20.0 in. con una magnitud de 0.525 kips/in.

#### **4.6.6 Requerimientos de diseño para el estado último de resistencia.**

Cuando el sistema MBS es analizado para el estado último de resistencia, se debe asumir que el espacio libre entre vigas centrales es el mayor posible, típicamente 3.0 in.

El sistema MBS debe ser diseñado para soportar los efectos del estado último de resistencia especificados en el Artículo 6.5.4. Además los sistemas MBS deben ser diseñados para soportar la combinación de cargas para Resistencia I de la Tabla 3.4.1-1 para la aplicación simultánea de cargas verticales y horizontales especificada en el Artículo 14.5.6.9.4 de la Especificación "AASHTO LRFD *Bridge Design Specifications 6th Edition*". Las cargas muertas deben ser añadidas en el diseño. Las cargas deben ser distribuidas como se especifica en el Artículo 14.5.6.9.5.

Los anclajes deben ser analizados en el estado último de resistencia sólo bajo cargas verticales y no horizontales como se especifica en el Artículo 6.10.10.4.3. Los anclajes deben ser chequeados por un método separado para cargas horizontales. En regiones con nieve, se debe realizar un estudio adicional que se especifica en el Artículo 14.5.1.2. El punzonamiento en el estado último de resistencia debe ser investigado con el Código ACI 318 (*“Building Code Requirements for Structural Concrete”*) utilizando los siguientes factores de resistencia:

- Para anclajes gobernados por acero:

$$\phi_{tensión} = 0.80$$

$$\phi_{corte} = 0.75$$

- Para anclajes gobernados por concreto, Condición A: refuerzo adicional en el área de falla:

$$\phi_{tensión} = 0.85$$

$$\phi_{corte} = 0.85$$

- Para anclajes gobernados por concreto, Condición B: sin refuerzo adicional en el área de falla:

$$\phi_{tensión} = 0.75$$

$$\phi_{corte} = 0.75$$

#### **4.6.7 Requerimientos de diseño para el estado límite de fatiga.**

##### **4.6.7.1 General.**

Los elementos estructurales que componen los sistemas MBS como vigas, barras de soporte, conexiones y juntas soldadas o empernadas, deben cumplir con los requerimientos

del Artículo 6.6.2 de la Especificación “AASHTO LRFD *Bridge Design Specifications*”. Los pernos sujetos a fatiga por tracción deben satisfacer las provisiones del Artículo 6.13.2.10.3.

Todos estos elementos deben ser diseñado para el estado límite de fatiga especificado en el Artículo 6.6.1.2 con las siguientes modificaciones:

Cada detalle debe cumplir:

$$\Delta f \leq (\Delta F)_{TH}$$

donde:

$\Delta f$  =rango de esfuerzo de diseño para carga viva debido a la aplicación simultánea de carga vertical y horizontal especificadas en el Artículo 14.5.6.9.4, distribuidas como se especifica en el Artículo 14.5.6.9.5 y calculado como se especifica en el Artículo 14.5.6.9.7b (ksi)

$\Delta F_{TH}$  = umbral de fatiga de amplitud constante obtenido de la Tabla 6.6.1.2.5-3 para a categoría en cuestión

#### **4.6.7.2 Rango del esfuerzo de diseño.**

El rango del esfuerzo de diseño,  $\Delta f$  , debe ser obtenido de un análisis estructural del sistema de junta. Se debe analizar los efectos de la aplicación simultánea de carga vertical y horizontal como se especifica en el Artículo 14.5.6.9.4. Para cada detalle del sistema, se debe incluir el peor escenario que maximice el esfuerzo de diseño.

El rango de esfuerzo de diseño se calcula de la siguiente forma para casos específicos de sistemas MBJS:

- **Sistema simple de barra de soporte.**

Viga Central: el rango de esfuerzo,  $\Delta f$ , en una sección crítica de la viga central, es igual a la suma de los rangos de esfuerzo resultantes por flexión horizontal y vertical en la sección crítica. Para sistemas empernados se debe calcular el rango de esfuerzo sobre la sección neta.

Estribo: el rango de esfuerzo en el estribo debe considerar los efectos de la fuerza vertical entre la viga borde y la barra de soporte. El rango de esfuerzo debe ser calculado asumiendo un rango de carga en el estribo mayor o igual al 30 por ciento de la carga total vertical. Los efectos de la carga horizontal pueden ser obviados en el diseño por fatiga para los estribos.

- **Sistema múltiple de barras de soporte soldadas**

Agrietamiento del pie soldado en la viga central (Agrietamiento Tipo A): en este tipo de agrietamiento se debe incluir los efectos concurrentes de los esfuerzos de flexión verticales y horizontales en la viga central,  $S_{RB}$ , y los esfuerzos verticales en la parte superior de la soldadura,  $S_{RZ}$ . El rango de esfuerzo de diseño se calcula de la siguiente forma:

$$\Delta f = \sqrt{S_{RB}^2 + S_{RZ}^2}$$

donde:

$$S_{RB} = \frac{M_V}{S_{xcb}} + \frac{M_H}{S_{ycb}}$$

$$S_{RZ} = \frac{M_{OT}}{S_{Wtop}} + \frac{R_V}{A_{Wtop}}$$

$$M_{OT} = R_H d_{cb}$$

donde:

$$S_{RB} = \text{esfuerzo combinado de flexión en la viga central (ksi)}$$

$M_V$  = momento vertical por flexión en la viga central en la sección crítica (kip-in.)

$M_H$  = momento horizontal por flexión en la viga central en la sección crítica (kip-in.)

$M_{OT}$  = momento de volcamiento por la reacción horizontal (kip-in.)

$S_{xcb}$  = módulo de sección vertical hasta la parte inferior de la viga central ( $in.^3$ )

$S_{Ycb}$  = módulo de sección horizontal de la viga central ( $in.^3$ )

$S_{RZ}$  = rango de esfuerzo vertical en la parte superior de la soldadura entre la viga central y la barra de soporte (ksi)

$R_V$  = reacción vertical en la conexión (kip)

$R_H$  = reacción horizontal en la conexión (kip)

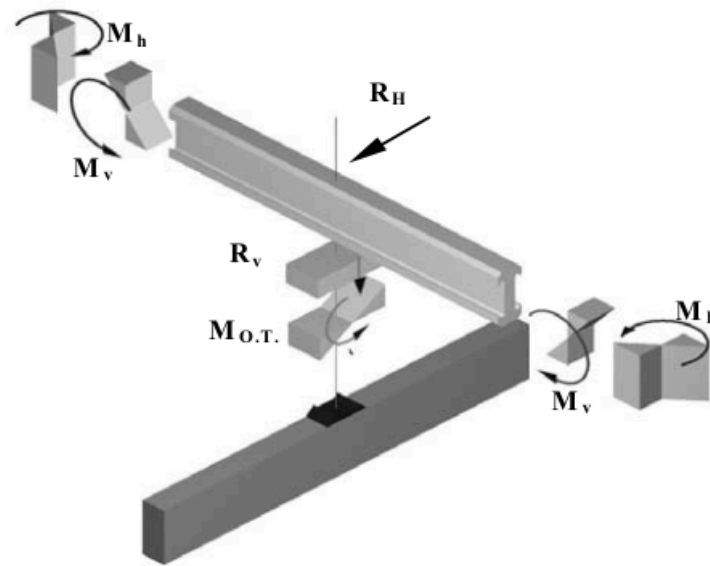
$d_{cb}$  = profundidad de la viga central (in.)

$S_{Wtop}$  = módulo de sección de la soldadura en la parte superior para flexión, en dirección normal al eje de la viga central ( $in.^3$ )

$A_{Wtop}$  = área de la soldadura en la parte superior ( $in.^2$ )

A continuación se muestra una figura mostrando las fuerzas asociadas al tipo de agrietamiento:





**Figura 6. Fuerzas asociadas al Tipo de Agrietamiento A**

Fuente: American Association of State Highway and Transportation Officials (2012). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th Ed. Washington, D.C.

Agrietamiento de la soldadura entre la barra de soporte y el pie (Agrietamiento Tipo B): el rango de esfuerzo para el agrietamiento Tipo B debe incluir los efectos de flexión vertical en la barra de soporte,  $S_{RB}$ , y los esfuerzos verticales en la parte inferior de la soldadura,  $S_{RZ}$ . El rango del esfuerzo de diseño se determina de la siguiente manera:

$$\Delta f = \sqrt{S_{RB}^2 + S_{RZ}^2}$$

donde:

$$S_{RB} = \frac{M_V}{S_{Xsb}} + \frac{1}{2} \frac{R_H (d_{cb} + h_w + \frac{1}{2} d_{sb})}{S_{Xsb}}$$

$$S_{RZ} = \frac{R_H (d_{cb} + h_w)}{S_{Wbot}} + \frac{R_V}{A_{Wbot}}$$

donde:

$S_{RB}$  = rango de esfuerzo en la barra de soporte debido a momento máximo, incluyendo el momento por reacción vertical y el momento de volcamiento en la conexión (ksi)

$M_V$  = componente vertical de momento en la barra de soporte debido a la reacción vertical en la conexión localizada en la sección crítica en la soldadura del pie

$S_{Xsb}$  = módulo de sección vertical de la barra de soporte hasta la parte superior de la barra de soporte ( $in.^3$ )

$h_w$  = espesor de la soldadura (in.)

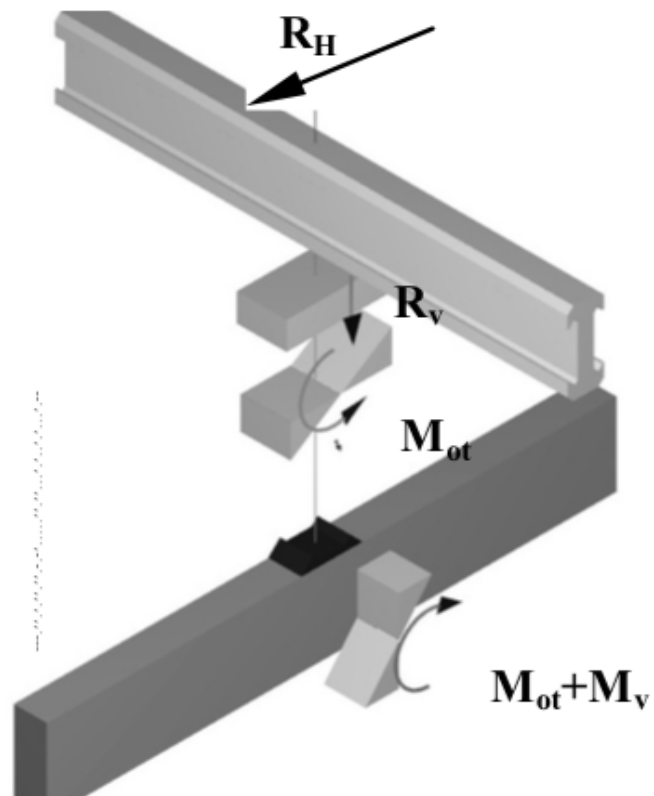
$d_{sb}$  = profundidad de la barra de soporte (in.)

$S_{RZ}$  = rango de esfuerzo vertical en la parte inferior de la soldadura entre la viga central y la barra de soporte (ksi)

$S_{Wbot}$  = módulo de sección de la soldadura en la parte inferior para flexión, en dirección al eje de la barra de soporte ( $in.^3$ )

$A_{Wbot}$  = área de la soldadura en la parte inferior ( $in.^2$ )

A continuación se muestra una figura mostrando las fuerzas asociadas al tipo de agrietamiento:



**Figura 7. Fuerzas asociadas al Tipo de Agrietamiento B**

Fuente: American Association of State Highway and Transportation Officials (2012). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th Ed. Washington, D.C.

## CAPÍTULO V

### 5.1 Requerimientos para el diseño de apoyos

Básicamente existen dos tipos de apoyo: apoyo fijo y móvil. Los apoyos móviles poseen guías para controlar la dirección de la traslación que sufrirá el apoyo al ser sometido a cargas. Ambos tipos de apoyo deben ser diseñados para resistir cualquier combinación de cargas y además deben restringir traslaciones no deseadas. El factor de resistencia para apoyos,  $\varphi$ , debe ser tomado en cuenta como 1 a menos que se diga lo contrario para casos especiales.

Adicionalmente se debe cumplir:

- No deben usarse apoyos multirotacionales donde las cargas verticales sean menores al 20% de la capacidad vertical del apoyo.
- Existe una gran variabilidad en el comportamiento de apoyos y además existen muy pocos experimentos que definan precisamente el factor de resistencia  $\varphi$ . Es por esto que para la gran mayoría de casos este factor es tomado como 1.
- Los apoyos pueden proveer resistencia a cargas laterales hasta cierto punto. Esto se logra limitando el radio de la superficie esférica. Sin embargo, la habilidad para soportar cargas laterales se produce debido a las cargas verticales que mantienen fijo al puente. Las cargas verticales pueden disminuir considerablemente en casos extremos de carga como en terremotos, de este modo se reduciría también la resistencia a cargas laterales. En general, los apoyos no son recomendados cuando existe una proporción del 40 por ciento entre fuerzas horizontales y verticales.

## 5. 2 Características de los tipos de apoyo

El tipo de apoyo escogido para un tipo de estructura debe cumplir con ciertas características como capacidad de carga, movimiento y rotación. Para comparar las aplicaciones de los diferentes tipos de apoyo se puede hacer uso de la Tabla 14.6.2-1 y la Figura 14.6.2-1 de la Especificación AASHTO que se muestran a continuación:

La terminología que se utiliza en la Tabla 14.6.2-1 es la siguiente:

<b>S ("Suitable") =</b>	Adecuado
<b>U ("Unsuitable") =</b>	No adecuado
<b>L ("Suitable for limited applications") =</b>	Adecuado para aplicaciones limitadas
<b>R ("May be suitable") =</b>	Puede ser adecuado si se utiliza con guías
<b>Long. =</b>	Eje longitudinal
<b>Trans.=</b>	Eje transversal
<b>Vert. =</b>	Eje vertical

**Tabla 4. Aplicaciones para cada tipo de apoyo**

Type of Bearing	Movement		Rotation about Bridge Axis Indicated			Resistance to Loads		
	Long.	Trans.	Long.	Trans.	Vert.	Long.	Trans.	Vert.
Plain Elastomeric Pad	S	S	S	S	L	L	L	L
Fiberglass-Reinforced Pad	S	S	S	S	L	L	L	L
Cotton-Duck-Reinforced Pad	U	U	U	U	U	L	L	S
Steel-Reinforced Elastomeric Bearing	S	S	S	S	L	L	L	S
Plane Sliding Bearing	S	S	U	U	S	R	R	S
Curved Sliding Spherical Bearing	R	R	S	S	S	R	R	S
Curved Sliding Cylindrical Bearing	R	R	U	S	U	R	R	S
Disc Bearing	R	R	S	S	L	S	S	S
Double Cylindrical Bearing	R	R	S	S	U	R	R	S
Pot Bearing	R	R	S	S	L	S	S	S
Rocker Bearing	S	U	U	S	U	R	R	S
Knuckle Pinned Bearing	U	U	U	S	U	S	R	S
Single Roller Bearing	S	U	U	S	U	U	R	S
Multiple Roller Bearing	S	U	U	U	U	U	U	S

Fuente: American Association of State Highway and Transportation Officials (2012). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th Ed. Washington, D.C.

Nota: la información mostrada en la Tabla esta basada en observación y prácticas, por lo cual existirán ciertas excepciones.

## 5.3 Fuerzas resultantes en el apoyo

### 5.3.1 Fuerza horizontal y movimientos.

En el estado último de resistencia y en eventos extremos, las fuerzas horizontales transmitidas por los apoyos a la superestructura y subestructura,  $H_{bu}$ , son aquellas producidas por fricción por deslizamiento, fricción por laminación o deformación por corte de algún elemento flexible del apoyo.

La fricción por deslizamiento se calcula de la siguiente manera:

$$H_{bu} = \mu P_u$$

donde:

$H_{bu}$  = fuerza lateral transmitida a la superestructura y a la subestructura por los apoyos (kip)

$\mu$  = coeficiente de fricción

$P_u$  = fuerza de compresión (kip)

La fuerza debido a deformación de un elemento elastomérico se calcula de la siguiente forma:

$$H_{bu} = GA \frac{\Delta_u}{h_{rt}}$$

donde:

$G$  = módulo a corte del elastómero(ksi)

$A$  = área plana del elastómero(in.<sup>2</sup>)

$\Delta_u$  = deformación por corte (in.)

$h_{rt}$  = espesor total del elastómero (in.)

### 5.3.2 Momento.

En el estado último de resistencia y en estados extremos de carga, se debe diseñar la superestructura y la subestructura con el mayor momento,  $M_u$ , transferido por el apoyo.

Para apoyos deslizantes curvos sin superficie deslizante,  $M_u$ , debe ser calculado de la siguiente forma:

$$M_u = \mu P_u R$$

Para apoyos deslizantes curvos con superficie deslizante,  $M_u$ , debe ser calculado de la siguiente forma:

$$M_u = 2\mu P_u R$$

donde:

$M_u$  = momento transmitido a la superestructura y subestructura por el apoyo(kip-in.)

$R$  = radio de la superficie curva deslizante (in.)

Para elastómeros que no posean confinamiento,  $M_u$ , debe ser calculado de la siguiente forma:

$$M_u = 1.60 (0.5 E_c I) \frac{\theta_s}{h_{rt}}$$

donde:

$I$  = momento de inercia de la forma plana del apoyo ( $in.^4$ )

$E_c$  = módulo efectivo del apoyo elastomérico a compresión (ksi)

$\theta_s$  = ángulo de rotación máximo de diseño en el estado límite de servicio (rad.)

$h_{rt}$  = espesor total del elastómero (in.)

La curva carga- deflexión para un apoyo elastomérico es no lineal, por lo cual,  $E_c$ , es dependiente de la carga. Un valor aceptable para aproximar el módulo efectivo es:

$$E_c = 4.8 GS^2$$

donde:

$G$  = módulo a corte del elastómero (ksi)

$S$  = factor de forma de una capa de elastómero(ksi)

Cuando se diseñan apoyos elastoméricos, se debe tomar en cuenta el aumento del módulo a corte,  $G$ , para temperaturas bajo los 23° C.

Para apoyos tipo CDP,  $M_u$ , debe ser calculado de la siguiente forma:

$$M_u = 1.25 (4.5 - 2.2S + 0.6 \sigma_s) \frac{E_c I}{\xi_p} \theta_s$$



donde:

$E_c$  = rigidez uniaxial a compresión del capa de CDP. Puede ser tomada como 30 ksi en lugar de obtener el valor por experimentación(ksi)

$t_p$  = espesor total de la capa de CDP (in.)

$S$  = factor de forma del CDP basado en el espesor total del pad

$\sigma_s$  = esfuerzo promedio a compresión debido a carga total (ksi)

$\theta_s$  = ángulo de rotación máximo del CDP (rad.)

#### **5.3.4 Eventos extremos.**

Esta provisión aplica para eventos extremos como sismos, colisión de vehículos, colisión de barcos, vientos con altas velocidades entre otros. Así mismo, esta provisión aplica para apoyos tipo rocker, roller, apoyos elastoméricos, apoyos de bronce deslizantes, apoyos tipo pot y apoyos con discos.

##### ***5.3.4.1 Criterio de diseño bajo cargas sísmicas.***

Los apoyos tienen un efecto muy significativo en la respuesta sísmica de un puente. Los apoyos proveen la unión y transferencia de cargas entre la superestructura y la subestructura. Ambas, la superestructura y la subestructura, son elementos muy grandes y rígidos. Por resultado, se genera una gran concentración de cargas y esfuerzos en los apoyos. Adicionalmente las cargas resultantes son difíciles de predecir. Es por esto que se deben realizar un buen diseño de los apoyos para mejorar la respuesta sísmica de un puente.

La función primaria de los apoyos es resistir cargas verticales debido a carga muerta y carga viva y también permitir movimientos en la superestructura debido a cambios de temperatura y carga viva. Para permitir movimientos de la superestructura, se utilizan

apoyos tipo “roller” o “rocker”, apoyos elastoméricos que se deforman por corte, o una superficie deslizante de bronce o de PTFE. Para soportar rotaciones, se utilizan bisagras, elastómeros confinados o no confinados y también superficies esféricas deslizantes “AASHTO LRFD *Bridge Design Specifications*”.

Históricamente, los apoyos han sido muy susceptibles a sufrir daños bajo cargas sísmicas. Cargas desiguales o cargas mucho más altas de las esperadas, han producido daños irreparables en estructuras de puentes. Es por esto que los apoyos deben ser fabricados con elementos que sean vulnerables a grandes cargas e impactos.

El criterio sísmico de diseño de apoyos debe tomar en consideración la resistencia y rigidez de la superestructura y de la subestructura. Se debe permitir un cierto grado de disipación de energía en los apoyos mediante movimientos o deformación plástica para minimizar daños en la estructura.

Los apoyos pueden ser divididos en cuatro categorías dependiendo de su rigidez horizontal:

- Apoyos rígidos: transmiten cargas sísmicas sin movimientos ni deformaciones.
- Apoyos deformables: transmiten carga sísmica por medio de deformaciones plásticas y deslizamiento controlado de los elementos del apoyo.
- Apoyo con aislamiento sísmico: transmiten cargas sísmicas muy reducidas, limitadas por disipación de energía
- Apoyos diseñados para fallar a determinada carga para salvaguardar la integridad del puente

En los apoyos deformables, se esperan daños limitados y reparables para el sismo de diseño. Los apoyos con aislante sísmico, no están dentro del alcance de la provisión AASHTO LRFD.

## CAPÍTULO VI

### 6.1 Diseño de apoyos

#### 6.1.1 Apoyos tipo rocker y roller.

El eje de rotación de este tipo de apoyos debe estar alineado con el eje que tenga mayor rotación en el diseño. Se debe asegurar que la alineación del apoyo no cambie durante toda la vida útil del puente. Así mismo, cuando se usen apoyos de rodillo múltiples, se deben utilizar engranajes para mantener la misma distancia entre apoyos y para que siempre estén paralelos.

El mantenimiento es esencial para que los apoyos trabajen de la mejor manera. La suciedad y el polvo retiene humedad y genera corrosión en el acero. Los apoyos de acero deben ser diseñados para que puedan ser mantenidos fácilmente.

##### 6.1.1.1 Materiales.

Los apoyos tipo rocker y roller deben ser fabricados con acero inoxidable cumpliendo la Norma ASTM 420. Las propiedades de estos aceros pueden ser obtenidos de la Tabla 6.4.1-1 y 6.4.2-1 de la Especificación "AASHTO LRFD *Bridge Design Specifications*".

El acero carbono ha sido uno de los materiales más utilizados para la construcción de apoyos debido a sus excelentes propiedades mecánicas. El endurecimiento de la superficie debe ser considerado al igual que la corrosión.

##### 6.1.1.2 Requerimientos Geométricos.

- Las dimensiones del apoyo deben ser escogidas tomando en cuenta los esfuerzos de contacto y el movimiento del punto de contacto ocasionado por los rodillos.

- Cada superficie de contacto debe tener un radio constante. Los apoyos con más de una superficie curva deben ser simétricos a una línea que pasa por los centros de las dos superficies.
- Si el apoyo tiene dos caras cilíndricas separadas, se debe garantizar la estabilidad espaciando ambas caras con una distancia no mayor a la suma de los radios de las superficies cilíndricas.
- El dimensión del radio de la superficie curva es un factor clave en el diseño. Un radio grande resultará en esfuerzos de contacto menores pero incrementará las rotaciones en el punto de contacto.

### 6.1.1.3 Esfuerzos.

En el estado límite de servicio, la carga de contacto,  $P_s$ , debe satisfacer lo siguiente:

- Para superficies cilíndricas:

$$P_s \leq \frac{WD_1}{1 - \frac{D_1}{D_2}} \left( \frac{F_y^2}{E_s} \right)$$

- Para superficies esféricas:

$$P_s \leq 40 \left( \frac{D_1}{1 - \frac{D_1}{D_2}} \right)^2 \left( \frac{F_y^3}{E_s^2} \right)$$

donde:

$D_1$  = diámetro de la superficie del apoyo (in.)

$D_2$  = diámetro de la superficie de acoplamiento (in.) tomado en cuenta como:

- Positivo si la curvaturas tienen el mismo signo
- Infinito si la superficie de acoplamiento es plana

$F_y$  = valor mínimo de los esfuerzos de fluencia del acero más débil en la superficie de contacto (ksi)

$E_s$  = Módulo de Young del acero (ksi)

$W$  = ancho del apoyo (in.)

Las cargas en el estado límite de servicio están limitadas de tal forma que el esfuerzo de corte no sea mayor a  $0.55 F_y$  y que el esfuerzo de compresión no supere  $1.65F_y$ . Estas fórmulas fueron derivadas del valor teórico para el esfuerzo de contacto entre dos cuerpos elásticos (Roark and Young, 1976). Esta teoría se basa en que el ancho del área de contacto es mucho menor que el diámetro de la superficie curva.

Si dos superficies tienen curvaturas de signo contrario, el valor de  $D_2$  será negativo. Esto sería una situación muy inusual, sin embargo se da la posibilidad.

Se puede realizar una evaluación para determinar si los apoyos están trabajando de manera correcta; para ello el esfuerzo lineal en los apoyos no debe ser mayor a los obtenidos por las siguientes fórmulas:

Para diámetros de hasta 25 in.

$$p = \frac{F_y - 13}{20} (0.6d)$$

Diámetros de 25 a 125 in.

$$p = \frac{F_y - 13}{20} 3\sqrt{d}$$

donde:

$p$  = esfuerzo lineal admisible en el estado límite de servicio (kip/in.)

$d$  = diámetro del apoyo (in.)

$F_y$  = valor mínimo de los esfuerzos de fluencia del acero más débil en la superficie de contacto (ksi)

### **6.1.2 Apoyos con superficies de politetrafluoroetileno (superficies PTFE).**

Las superficies de Politetrafluoroetileno o PTFE deben ser fabricadas con resina pura de PTFE que cumpla los requerimientos de la Norma ASTM D4894 o D4895. También se pueden utilizar hojas de PTFE que contengan fibras de vidrio o de carbono. Las fibras de vidrio no pueden exceder el 15 por ciento del compuesto, mientras las fibras de carbono no pueden exceder el 25 por ciento. Adicionalmente se pueden agregar fibras adicionales a la mezcla de PTFE para reducir la fluencia y el desgaste del material.

La hojas de PTFE pueden tener pequeños agujeros que actúan como reservorios para lubricante. Estos agujeros deben tener un diámetro máximo de 0.32 in. y una profundidad mínima de 0.08 in.. Los reservorios deben estar esparcidos uniformemente en la superficie y deben cubrir al menos el 20 por ciento de la superficie. Adicionalmente los agujeros no pueden cubrir un área mayor al 30 por ciento de la superficie.

#### **6.1.2.1 Superficie de acoplamiento:**

Los apoyos de PTFE funcionan en conjunto con superficies de acoplamiento. Estas superficies deben ser fabricadas con acero inoxidable si son planas o aluminio anodizado si son superficies curvas. El acero inoxidable debe ser de Tipo 304 y debe cumplir la Norma ASTM A167 o A264. La superficie terminada debe tener un espesor de  $8.0 \mu - in.$  Por otro lado las superficies curvas no deben exceder un espesor de  $16.0 \mu - in.$  El detalle y terminación de la superficie es de suma importancia ya que afectará considerablemente el coeficiente de fricción.

#### **6.1.2.2 Espesor mínimo de la superficie de PTFE.**

Se debe especificar un espesor mínimo en las superficies de PTFE para asegurar un apoyo uniforme y un correcto desgaste. Las superficies de PTFE deben tener un espesor mínimo de 0.0625 in. para cualquier aplicación después de sufrir fuerzas de compresión. Cuando se utilizan láminas de PTFE empotradas y su mayor dimensión es menor o igual a 24 in., se debe usar un espesor de 0.1875 in. Para el caso cuando una de las dimensiones de una lámina empotrada es mayor a 24 in., se debe usar un espesor mínimo de 0.25 in. Finalmente para láminas de PTFE tejidas en fábrica, se debe utilizar un espesor mínimo de 0.0625 in. y un espesor máximo de 0.125 in.

#### **6.1.2.3 Espesor mínimo de la superficie de acoplamiento.**

Se debe utilizar un espesor mínimo en la superficie de acoplamiento para evitar pandeo o arrugas en el material. Por lo general las superficies de acoplamiento son delgadas para minimizar costos. El espesor de la superficie de acoplamiento fabricada en acero inoxidable, debe ser al menos galga 16 cuando la dimensión máxima de la superficie sea igual o menor que 12 in. Cuando la superficie tenga una dimensión mayor a 12 in. se debe usar un espesor de galga 13.

#### **6.1.2.4 Esfuerzo en el apoyo.**

El esfuerzo entre el PTFE y la superficie de acoplamiento se calcula dividiendo la fuerza para el área perpendicular de la dirección de la fuerza. El esfuerzo de contacto debe ser controlado y limitado para evitar deformaciones y fluencia en la superficie de PTFE. Las deformaciones en la superficie de PTFE pueden ocasionar separación o fallas en la unión. Los esfuerzos no deben ser mayores a los mostrados en la Tabla 14.7.2.4-1 de la Especificación AASHTO que se muestra a continuación:



**Tabla 5. Esfuerzo de contacto máximo para superficies PTFE en el estado límite de servicio (ksi)**

Material	Average Contact Stress (ksi)		Edge Contact Stress (ksi)	
	Permanent Loads	All Loads	Permanent Loads	All Loads
Unconfined PTFE: Unfilled Sheets	1.5	2.5	2.0	3.0
Filled Sheets with Maximum Filler Content	3.0	4.5	3.5	5.5
Confined Sheet PTFE	3.0	4.5	3.5	5.5
Woven PTFE Fiber over a Metallic Substrate	3.0	4.5	3.5	5.5
Reinforced Woven PTFE over a Metallic Substrate	4.0	5.5	4.5	7.0

Fuente: American Association of State Highway and Transportation Officials (2012). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th Ed. Washington, D.C.

#### **6.1.2.5 Coeficiente de fricción.**

El coeficiente de fricción debe ser adecuado para el correcto funcionamiento del apoyo. Se debe tomar en cuenta que el coeficiente de fricción puede cambiar por diversos factores como la temperatura, rigidez y fuerzas dinámicas. La fricción aumenta con el incremento de rigidez y con caídas de temperatura. Por otro lado la fricción estática es mayor que la fricción dinámica. Además el coeficiente dinámico de fricción es mayor para el primer ciclo que para los siguientes.

Los coeficientes de fricción para el estado límite de servicio deben ser obtenidos de la Tabla 14.7.2.5-1 de la Especificación AASHTO LRFD 2012. Si se necesitan valores intermedios se pueden obtener por interpolación. El coeficiente de fricción debe ser determinado utilizando el nivel de esfuerzo asociado a la combinación de cargas en la Tabla 3.4.1-1 de la Especificación.

Los coeficientes de la Tabla 14.7.2.5-1 están basados en superficies de acoplamiento con un terminado de  $8.0 \mu - in$ . En el caso de utilizar superficies más ásperas se deberán

realizar pruebas en acuerdo con la Especificación “AASHTO LRFD *Bridge Design Specifications*” para poder determinar los coeficientes de fricción.

Los coeficientes de fricción de la Tabla 14.7.2.5-1 no son aplicables para movimientos de altas velocidades como es el caso de eventos sísmicos. En estos casos se debe utilizar la Especificación “AASHTO *Guide Specifications for Seismic Isolation Design*” para determinar los coeficientes.

A continuación se muestra la Tabla 14.7.2.5-1 de la Especificación:

**Tabla 6. Coeficientes de fricción de diseño- Estado límite de servicio**

	Pressure (ksi)	Coefficient of Friction			
		0.5	1.0	2.0	>3.0
Type PTFE	Temperature (°F)				
Dimpled Lubricated	68	0.04	0.030	0.025	0.020
	-13	0.06	0.045	0.040	0.030
	-49	0.10	0.075	0.060	0.050
Unfilled or Dimpled Unlubricated	68	0.08	0.070	0.050	0.030
	-13	0.20	0.180	0.130	0.100
	-49	0.20	0.180	0.130	0.100
Filled	68	0.24	0.170	0.090	0.060
	-13	0.44	0.320	0.250	0.200
	-49	0.65	0.550	0.450	0.350
Woven	68	0.08	0.070	0.060	0.045
	-13	0.20	0.180	0.130	0.100
	-49	0.20	0.180	0.130	0.100

Fuente: American Association of State Highway and Transportation Officials (2012). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th Ed. Washington, D.C.

### 6.1.3 Apoyos con superficies deslizantes curvas

Este tipo de apoyos pueden ser cilíndricos o esféricos con una superficie deslizante de bronce o PTFE. Básicamente consisten de dos partes metálicas con superficies curvas que se acoplan. Ambas superficies deben tener el mismo radio para que encajen.

La distancia mínima vertical libre entre la parte rotante y la parte no rotante está gobernada por las siguientes fórmulas:

- Para apoyos esféricos rectangulares:

$$c = 0.7 D \theta_u + 0.125$$

- Para apoyos esféricos redondos:

$$c = 0.5 D \theta_u + 0.125$$

donde:

$\theta_u$  = rotación de diseño de la combinación de cargas de la Tabla 3.4.1-1

La distancia libre no puede ser menor que 0.125 in., en caso de obtener un menor valor con las ecuaciones se utiliza 0.125 in.

#### **6.1.3.1 Resistencia del apoyo.**

La geometría de un apoyo esférico controla la habilidad para resistir cargas laterales. La geometría influye en el comportamiento rotacional y también en el coeficiente de fricción. Sin embargo el esfuerzo puede variar a lo largo de la superficie de contacto. Es de suma importancia que los radios de las superficies cóncava y convexa estén dentro de ciertos límites para evitar fisuras, deformaciones y desgaste en el material.

El radio de la superficie curva debe ser suficientemente grande para asegurar que la fuerza de compresión en el estado límite de servicio sea menor o igual a la carga admisible obtenida de la Tabla 14.7.2.4-1.

- Para apoyos cilíndricos:

$$P_s \leq \phi D W \sigma_{ss}$$

- Para apoyos esféricos:

$$P_s \leq \phi \frac{\pi D^2 \sigma_{ss}}{4}$$

donde:

$P_s$  = carga total de compresión de la Tabla 3.4.1-1 (kip)

$D$  = diámetro horizontal proyectado de la superficie cargada (in.)

$\sigma_{SS}$  = esfuerzo máximo en el estado límite de servicio para PTFE de la Tabla 14.7.2.4-1 o para bronce de la Tabla 14.7.7.3-1 (ksi)

$W$  = longitud del cilindro (in.)

$\phi$  = factor de resistencia tomado como 1.0

### **6.1.3.2 Resistencia a carga lateral.**

La resistencia a carga lateral de un apoyo se logra combinando la geometría y las cargas gravitacionales. Adicionalmente se pueden usar restricciones externas al puente para resistir grandes cargas laterales. Cuando los apoyos deban resistir fuerzas laterales en el estado límite de servicio, se debe cumplir lo siguiente:

- Para superficies cilíndricas, la fuerza horizontal debe cumplir:

$$H_s \leq 2 R W \sigma_{SS} \text{sen}(\psi - \beta - \theta_u) \text{sen} \beta$$

- Para superficies esféricas, la fuerza horizontal debe cumplir:

$$H_s \leq \pi R^2 \sigma_{SS} \text{sen}(\psi - \beta - \theta_u) \text{sen} \beta$$

donde:

$$\beta = \tan^{-1} \left( \frac{H_s}{P_D} \right)$$

$$\psi = \text{sen}^{-1} \left( \frac{L}{2R} \right)$$

$H_s$  = fuerza horizontal de la combinación de cargas aplicable de la

Tabla 3.4.1-1

$L$  = distancia proyectada de la superficie perpendicular al eje de rotación (in.)

$P_D$  = fuerza de compresión en el estado límite de servicio (kip)

$R$  = radio de la superficie curva deslizante (in.)

$W$  = longitud la superficie cilíndrica (in.)

$\beta$  = ángulo entre la vertical y la fuerza resultante (rad.)

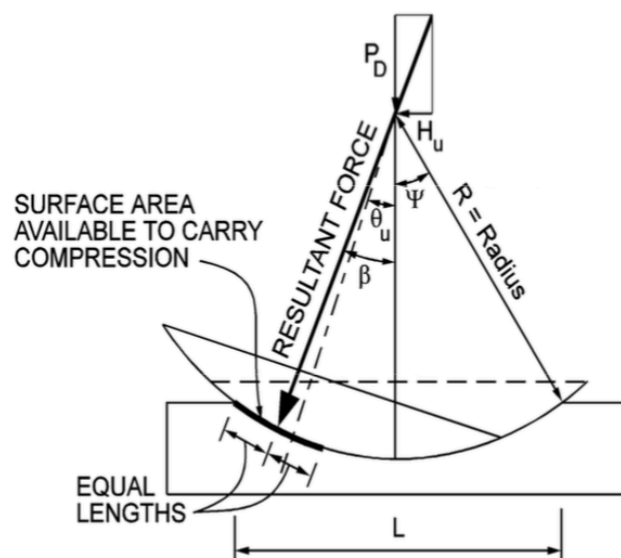
$\theta_u$  = rotación máxima en el estado último (in.)

$\sigma_{ss}$  = esfuerzo máximo en el estado límite de servicio para PTFE de la

Tabla 14.7.2.4-1 o para bronce de la Tabla 14.7.7.3-1 (ksi)

$\psi$  = semiángulo de la superficie curva (rad.)

A continuación se muestra una figura interpretativa con todos los términos:

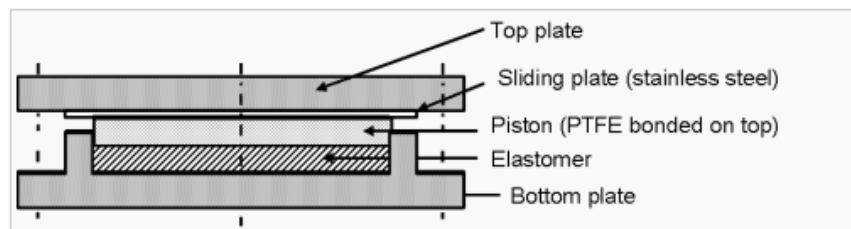


**Figura 8. Geometría resistencia a carga lateral para apoyos con superficies PTFE**

Fuente: American Association of State Highway and Transportation Officials (2012). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th Ed. Washington, D.C.

#### 6.1.4 Apoyos tipo “pot”.

Los apoyos tipo “pot” consisten en un disco confinado de elastómero en un pequeño cilindro. La fuerza es luego aplicada con un pistón y se ejerce una gran presión en el elastómero. De esta forma el elastómero se comporta como un líquido y puede rotar fácilmente en cualquier dirección con muy poca resistencia. Adicionalmente se puede incluir una superficie deslizante en el apoyo para acomodar los movimientos de traslación. A continuación se muestra un esquema de un apoyo pot:



**Figura 9. Elementos de los apoyos tipo “pot”**

Fuente: SteelConstruction.info (s.f.). Obtenido en línea el 22 de octubre de 2015 desde: <[http://www.steelconstruction.info/Bridge\\_articulation\\_and\\_bearing\\_specification](http://www.steelconstruction.info/Bridge_articulation_and_bearing_specification)>

##### 6.1.4.1 Materiales.

El disco elastomérico debe ser fabricado con caucho natural o neopreno. Su rigidez debe estar entre los 50 y 60 en la Escala Shore A. Los materiales deben cumplir con la Sección 18.3 de la Especificación “AASHTO LRFD *Bridge Design Specifications*”.

El cilindro de confinamiento y el pistón deben estar fabricados con acero estructural de Grado 36,50 o 50W. También pueden ser fabricados con acero inoxidable que cumpla con la ASTM A240. El esfuerzo de fluencia y rigidez del pistón no pueden exceder los del cilindro de confinamiento.

##### 6.1.4.2 Requerimientos geométricos.

El espesor del disco elastomérico,  $h_r$ , debe satisfacer lo siguiente:

$$h_r \geq 3.33D_p\theta_u$$

donde:

$D_p$  = diámetro interno del cilindro de confinamiento (in.)

$\theta_u$  = rotación máxima debido al esfuerzo último especificado en el Artículo 14.4.2.2.1 (rad.)

Los apoyos “pot” además deben cumplir con los siguientes requerimientos aún cuando estén sometidos a esfuerzo último de fluencia:

- El cilindro debe ser lo suficientemente profundo para permitir el confinamiento.
- El contacto entre los materiales metálicos no puede prevenir desplazamientos o rotaciones

El pistón y el cilindro de confinamiento deben estar separadas por un espacio libre. Este espacio libre aumenta la resistencia a rotación del apoyo. Según AASHTO se deben cumplir las siguientes especificaciones:

$$h_{pl} \geq (0.5 D_p \theta_u) + h_r + h_w$$

donde:

$h_{pl}$  = profundidad del cilindro (in.)

$h_r$  = espesor del disco elastomérico (in.)

$h_w$  = altura entre la superficie superior del elastómero y la parte inferior del pistón (in.)

$$h_{p2} \geq R_0 \theta_u + 2\delta_u + 0.125$$

$h_{p2}$  = espacio libre vertical entre la parte superior del pistón y la parte superior del cilindro de confinamiento(in.)

$\delta_u$  = deformación vertical debido a las combinaciones de carga de la Tabla 3.4.1-1

$R_0$  = distancia radial desde el centro del cilindro al objeto en cuestión (ej., pared del cilindro) (in.)

#### **6.1.4.3 Disco elastomérico.**

El disco elastomérico también debe cumplir con ciertos requerimientos para asegurar un buen comportamiento del apoyo. Uno de ellos es que el esfuerzo ejercido sobre el elastómero en el estado límite de servicio no exceda 3.5 ksi. El disco elastomérico también debe ser cubierto con un lubricante para facilitar movimientos rotacionales. El lubricante empleado no debe ser perjudicial para el elastómero. También se pueden usar discos delgados de PTFE en la superficie inferior y superior del disco elastomérico para cumplir la misma función.

La lubricación en el elastómero ayuda a prevenir desgaste debido a los ciclos de rotación. Uno de los lubricantes más utilizados es la grasa de silicona. Esta grasa ha sido experimentada y es muy efectiva, por lo cual se recomienda. Sin embargo se ha detectado que este tipo de grasa comienza a disminuir su efecto con el tiempo. También se utilizan discos de PTFE o grafito para cumplir la misma función del lubricante, pero experimentos han demostrado que los discos no se comportan bien ante rotaciones y adicionalmente pueden trisarse. Debido a esto, la grasa de silicona es el lubricante preferido.



#### **6.1.4.4 Anillos de confinamiento.**

Los anillos de confinamiento deben ser utilizados entre el cilindro y el pistón. Estos anillos previenen que el disco elastomérico se salga del cilindro cuando se le somete a fuerzas de compresión y a ciclos de rotación. Los anillos pueden ser de distintos materiales como: bronce, latón o plástico. Experimentos han demostrado que los anillos de bronce proveen un buen acoplamiento al elastómero y previenen fugas del elastómero, sin embargo experimentan mayor desgaste frente a ciclos de rotación. Por otro lado los anillos de latón son un poco más susceptibles a permitir fugas del elastómero y fracturas pero controlan mejor el desgaste. Debido a estas circunstancias se debe escoger el material que más se adapte al diseño.

Los anillos de confinamiento pueden tener dos tipos de secciones: rectangular y circular.

- Anillos con sección rectangular

Se deben usar tres anillos rectangulares. El ancho de cada anillo no debe ser menor a  $0.02 D_p$  o 0.25 in., y no debe exceder 0.75 in. El espesor de cada anillo no debe ser menor a 0.2 veces el ancho de los anillos.

- Anillos con sección circular

En este caso se debe utilizar un anillo circular cerrado con un diámetro externo igual a  $D_p$ . Debe tener un diámetro de sección no menor a  $0.0175 D_p$  o 0.15625 in.

#### 6.1.4.5 Cilindro de confinamiento.

El cilindro de confinamiento debe consistir de por lo menos una base con paredes que confinen al elastómero. Todos los elementos de los apoyos Tipo Pot deben ser diseñados para que trabajen en conjunto como si fueran una pieza única.

El espesor mínimo de la base del apoyo que esta sobre concreto debe satisfacer lo siguiente:

- $t_b \geq 0.06 D_p$
- $t_b \geq 0.75 \text{ in}$

El espesor mínimo de bases de apoyos que se fijan sobre vigas de acero, deben satisfacer lo siguiente:

- $t_b \geq 0.04 D_p$
- $t_b \geq 0.50 \text{ in}$

El espesor mínimo de las paredes del pot,  $t_w$ , deben satisfacer los siguiente:

- $t_w \geq \frac{D_p \sigma_s}{1.25 F_y}$
- $t_w \geq 0.75 \text{ in}$

donde:

$t_w$  = espesor de las paredes del pot (in.)

$F_y$  = esfuerzo de fluencia del acero (ksi)

$D_p$  = diámetro interno del pot (in.)

$\sigma_s$  = esfuerzo de compresión debido a carga total (ksi)

#### 6.1.4.6 Pistón.

El pistón debe tener la misma forma plana que la base del pot. Su espesor debe ser el adecuado para soportar las cargas ejercidas. Adicionalmente el espesor del pistón no debe ser menor al 6 por ciento del diámetro del pot,  $D_p$ .

El perímetro del pistón debe tener un anillo de acoplamiento que se ajuste a la base del pot. El anillo de acoplamiento sirve para transmitir fuerzas horizontales. La altura del anillo de acoplamiento,  $w$ , debe ser lo suficientemente grande para transmitir esfuerzos en estados límites extremos.

En el caso donde se utilice un dispositivo mecánico para unir las superestructura del puente con la subestructura, se debe diseñar para el mayor entre  $H_u$  en el soporte, ó 15 por ciento de la carga máxima vertical en el estado límite de servicio.

Los apoyos tipo "pot" que posean fuerzas laterales, deben cumplir lo siguiente:

$$t_w, t_b \geq \sqrt{\frac{25H_u\theta_u}{F_y}}$$

Los apoyos "pot" que transmiten las cargas por medio del pistón deben satisfacer:

$$h_w \geq \frac{1.5H_u}{D_p F_y}$$

$$h_w \geq 0.125 \text{ in.}$$

$$h_w \geq 0.03 D_p$$

donde:

$H_u$  = carga lateral aplicable del evento extremo en cuestión

$\theta_u$  = ángulo de rotación máximo debido a esfuerzo último de resistencia

$F_y$  = esfuerzo de fluencia del acero (ksi)

$D_p$  = diámetro interno del pot (in.)

$h_w$  = altura entre la parte superior del anillo de acoplamiento y la parte inferior del pistón (in.)

$t_w$  = espesor de las paredes del pot (in.)

$t_b$  = espesor de la base del pot (in.)

El anillo de acoplamiento debe estar a una distancia libre,  $c$ , del diámetro interior del pot. La distancia libre debe ser lo más pequeña posible para prevenir un posible escape del elastómero, sin embargo el valor mínimo de  $c$  es 0.02 in. Si la superficie del anillo de acoplamiento es cilíndrica, el espacio libre debe satisfacer lo siguiente:

$$c \geq \theta_u \left( h_w - \frac{D_p \theta_u}{2} \right)$$

donde:

$D_p$  = diámetro interno del pot (in.)

$h_w$  = altura entre la parte superior del anillo de acoplamiento y la parte inferior del pistón (in.)

$\theta_u$  = ángulo de rotación máximo debido a esfuerzo último de resistencia

### 6.1.5 Apoyos Elastoméricos Reforzados - Método B

Al momento de diseñar apoyos elastoméricos, se pueden realizar dos métodos, el Método A y el Método B. Normalmente el Método A resulta ser de menor capacidad debido a los límites de esfuerzos que utiliza. El aumento de capacidad del Método B requiere experimentación adicional y un estricto control de calidad.

Los apoyos elastoméricos reforzados son diseñados de manera separada debido a su habilidad para resistir cargas y debido a su excelente desempeño en la práctica (Roeder et al., 1987; Roeder and Stanton, 1991). El parámetro más crítico de diseño en este tipo de apoyos es el esfuerzo a corte entre los refuerzos de acero y los cojines de elastómero. El

esfuerzo a corte se produce por rotación, fuerza axial y por deformaciones. El Método B provee un diseño que soporta todos estos esfuerzos de corte.

Para evitar el incremento de esfuerzos, todas las capas internas de elastómero deben ser del mismo grosor. Al momento de utilizar diferentes espesores de elastómeros se producen esfuerzos mayores y se puede generar una falla más rápidamente por desgaste y delaminación. Esto se debe a que la resistencia a fuerzas de compresión están controladas por la capa más delgada de elastómero. Adicionalmente las superficies superior e inferior de cubierta deben tener al menos el 70% del espesor de todas las capas internas.

El factor de forma,  $S_i$ , está definido como el área plana de la capa de elastómero dividido para el área del perímetro libre de pandeo. Para apoyos rectangulares sin orificios, el factor de forma se calcula de la siguiente forma:

$$S_i = \frac{LW}{2h_{ri}(L + W)}$$

donde:

$L$  = dimensión plana perpendicular al eje de rotación en consideración  
(generalmente paralelo al eje longitudinal del puente) (in.)

$W$  = dimensión plana paralela al eje de rotación en consideración  
(generalmente paralelo al eje transversal del puente) (in.)

$h_{ri}$  = espesor de la capa elastomérica  $i$  en cuestión (in.)

Para apoyos circulares sin orificios, el factor de forma se calcula de la siguiente forma:

$$S_i = \frac{D}{4h_{ri}}$$

donde:

$D$  = diámetro de la proyección de la superficie cargada del apoyo en un plano horizontal (in.)

#### **6.1.5.1 Propiedades de los materiales.**

El factor más importante para el diseño es la resistencia a corte,  $G$ , del elastómero. Este módulo a cortante debe estar entre 0.080 y 0.175 ksi. Los materiales con un módulo de corte mayor a 0.175 ksi. no están permitidos porque generalmente tienen menor elongación cuando se rompen. Además el módulo debe ser tomado en cuenta cuando el elastómero está a 73 °F (23°C), que es la temperatura ambiente promedio.

#### **6.1.5.2 Requerimientos para el diseño.**

##### *6.1.5.2.1 Deformaciones por corte.*

El desplazamiento horizontal máximo de la superestructura del puente,  $\Delta_0$ , debe ser el 65% del movimiento térmico de diseño,  $\Delta_T$ . Los movimientos por variación térmica deben incluir acortamiento, elongación y postensado del puente.

La máxima deformación a corte del apoyo en el estado límite de servicio,  $\Delta_s$ , debe ser tomada en cuenta como  $\Delta_0$  para soportar procedimientos constructivos.

El apoyo debe satisfacer:

$$h_{rt} \geq 2\Delta_s$$

donde:

$h_{rt}$  = espesor total del elastómero (in.)

$\Delta_s$  = deformación máxima a corte del elastómero de la combinación de cargas aplicable de la Tabla 3.4.1-1 (in.)

### 6.1.5.2.2 Compresión, rotación y corte combinados.

La combinación de compresión, rotación y corte en el estado límite de servicio deben cumplir lo siguiente:

$$\left(\gamma_{a,st} + \gamma_{r,st} + \gamma_{s,st}\right) + 1.75\left(\gamma_{a,cy} + \gamma_{r,cy} + \gamma_{s,cy}\right) \leq 5.0$$

$$\gamma_{a,st} \leq 3.0$$

donde:

$\gamma_a$  = esfuerzo a corte causado por carga axial

$\gamma_r$  = esfuerzo a corte causado por rotación

$\gamma_s$  = esfuerzo a corte causado por desplazamiento

Nota: Los subscripts “st” y “cy” indican carga estática y cíclica respectivamente.

Los componentes cíclicos de la ecuación se multiplican por 1.75 debido a que se ha demostrado en experimentos que los esfuerzos dinámicos causan mayor delaminación y desgaste que los esfuerzos estáticos de la misma amplitud.

Los esfuerzos cortantes  $\gamma_a$ ,  $\gamma_r$  y  $\gamma_s$  se calculan de la siguiente forma:

### 6.1.5.2.3 Esfuerzo a corte debido a carga axial.

$$\gamma_a = D_a \frac{\sigma}{GS_i}$$

donde:

$D_a$  = coeficiente adimensional usado para determinar esfuerzo a corte debido a carga axial.  $D_a$  es igual a 1.4 para apoyos rectangulares y 1.0 para apoyos circulares.

$G$  = módulo de resistencia a corte del elastómero(ksi)

$S_i$  = factor de forma de la capa  $i$  del elastómero en cuestión

$\sigma_s$  = esfuerzo a compresión promedio debido a carga estática o cíclica de la combinación de cargas aplicable de la Tabla 3.4.1-1(ksi)

#### 6.1.5.2.4 Esfuerzo a corte debido a rotación.

Para un apoyo rectangular:

$$\gamma_r = D_r \left( \frac{L}{h_{ri}} \right)^2 \frac{\theta_s}{n}$$

Para un apoyo circular:

$$\gamma_r = D_r \left( \frac{D}{h_{ri}} \right)^2 \frac{\theta_s}{n}$$

donde:

$D$  = diámetro del apoyo (in.)

$D_r$  = coeficiente adimensional para determinar el esfuerzo a corte debido a rotación.  $D_r$  es igual a 0.5 para apoyos rectangulares y 0.375 para apoyos circulares.

$h_{ri}$  = espesor de la capa  $i$  de elastómero en cuestión (in.)

$L$  = dimensión plana del apoyo perpendicular al eje de rotación bajo consideración (generalmente paralelo al eje longitudinal del puente) (in.)

$n$  = número de capas interiores de elastómero, donde se entiende a capas interiores a aquellas que están pegadas por ambos lados. Cuando el espesor de las capas exteriores es igual o mayor 1.5



veces el espesor de una capa interior, el parámetro , n, puede ser incrementado en 1.5 para cada capa exterior.

$\theta_s$  = máxima rotación estática o cíclica en el estado límite de servicio especificada en el Artículo 14.4.2.1 (rad.)

#### 6.1.5.2.5 Esfuerzo a corte debido a deformación.

$$\gamma_s = \frac{\Delta_s}{h_{rt}}$$

donde:

$h_{rt}$  = espesor total del elastómero (in.)

$\Delta_s$  = deformación estática o cíclica máxima a corte del elastómero de la combinación de cargas aplicable de la Tabla 3.4.1-1 (in.)

En apoyos con placas externas de acero, el esfuerzo hidrostático debe satisfacer:

$$\sigma_{hyd} \leq 2.25 G$$

en donde:

$$\sigma_{hyd} = 3GS_i^3 \frac{\theta_s}{n} C_\alpha$$

$$C_\alpha = \frac{4}{3} \left[ \left( \alpha^2 + \frac{1}{3} \right)^{1.5} - \alpha(1 - \alpha^2) \right]$$

$$\alpha = \frac{\varepsilon_a n}{S_i \theta_s}$$

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_s}{3B_a GS_i^2}$$

donde:

$B_a$  = factor adimensional utilizado para determinar el esfuerzo hidrostático

$\varepsilon_a$  = deformación axial total debido a cargas estáticas y cíclicas de la combinación de cargas aplicable de la Tabla 3.4.1-1. Tomado positivo para compresión (ksi)

$\theta_s$  = rotación máxima en el elastómero debido a cargas estáticas y cíclicas (rad.)

$\sigma_s$  = esfuerzo de compresión debido a cargas estáticas y cíclicas de la combinación de cargas aplicable de la Tabla 3.4.1-1(ksi)

#### 6.1.5.2.6 Estabilidad.

Los apoyos deben ser probados ante inestabilidad en el estado límite de servicio.

Para cumplir con este requerimiento se debe cumplir lo siguiente:

$$2A \leq B$$

en donde:

$$A = \frac{1.92 \frac{h_{rt}}{L}}{\sqrt{1 + \frac{2.0L}{W}}}$$

$$B = \frac{2.67}{(S_i + 2.0)\left(1 + \frac{L}{4.0W}\right)}$$

donde:

$G$  = módulo a corte del elastómero (ksi)

$h_{rt}$  = espesor total del elastómero (in.)

$L$  = dimensión plana del apoyo que es perpendicular al eje de rotación bajo consideración (normalmente paralelo al eje longitudinal del puente) (in.)

$S_i$  = factor de forma de la capa  $i$  del elastómero en cuestión

$W$  = dimensión plana del apoyo que es paralela al eje de rotación bajo consideración (normalmente paralelo al eje transversal del puente) (in.)

Notas:

- Cuando se tengan apoyos rectangulares y  $L$  es mayor a  $W$ , se debe chequear la estabilidad intercambiando  $L$  por  $W$  en las fórmulas anteriores.
- Para apoyos circulares se deben utilizar ecuaciones para un apoyo cuadrado donde  $W=L=0.8D$

Adicionalmente se deben realizar los siguientes dos chequeos dependiendo del caso que se tenga:

- Si el puente es libre a traslaciones horizontales:

$$\sigma_s \leq \frac{GS_i}{2A - B}$$

- Si el puente es fijo y no admite traslaciones horizontales:

$$\sigma_s \leq \frac{GS_i}{A - B}$$

#### 6.1.5.2.7 Refuerzo.

Según AASHTO, el refuerzo de acero debe tener un espesor mínimo de 0.625 in. El refuerzo ayudará a sostener los esfuerzos de tracción inducidos por cargas de compresión en el apoyo. El espesor del acero de refuerzo,  $h_s$ , debe satisfacer las siguientes ecuaciones:

- En el estado límite de servicio:

$$h_s \geq \frac{3h_{ri} \sigma_s}{F_y}$$

- En el estado límite de fatiga:

$$h_s \geq \frac{2h_{ri} \sigma_L}{\Delta F_{TH}}$$

donde:

$\Delta F_{TH}$  = amplitud constante de fatiga para Categoría A como se especifica en el Artículo 6.6 (ksi)

$h_{ri}$  = espesor de la capa interna  $i$  de elastómero en cuestión (in.)

$\sigma_L$  = esfuerzo a compresión en el estado límite de servicio (Factor de carga = 1.0) debido a carga viva (ksi)

$\sigma_s$  = esfuerzo a compresión debido a la carga total de la combinación de cargas de la Tabla 3.4.1-1(ksi)

$F_v$  = esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo (ksi)

Nota: si el refuerzo posee agujeros, el espesor mínimo de la placa debe ser incrementado por un factor igual al doble del espesor bruto dividido para el espesor neto.

#### 6.1.5.2.8 Deflexión a compresión.

Se deben tomar en cuenta varios factores que intervienen en la deflexión de apoyos elastoméricos. Las deflexiones producidas en debido a carga muerta y debido a carga viva instantánea deben ser consideradas por separado. Es necesario limitar las deflexiones para evitar que las juntas se dañen. Además, los apoyos que son muy flexibles pueden causar una pequeña abertura en la junta; lo cual aumenta la carga de impacto en el puente.

Para este análisis, todas las cargas deben estar en el estado límite de servicio con factores de carga igual a 1.0.

La deflexión instantánea por carga viva debe ser igual a :

$$\delta_L = \sum \varepsilon_{Li} h_{ri}$$

donde:

$\varepsilon_{Li}$  = deformación instantánea debido a carga viva en la capa  $i$  de elastómero en cuestión

$h_{ri}$  = espesor de la capa interna  $i$  de elastómero en cuestión (in.)

Deflexión inicial por carga muerta:

$$\delta_d = \sum \varepsilon_{di} h_{ri}$$

donde:

$\varepsilon_{di}$  = deformación inicial debido a carga muerta en la capa  $i$  de elastómero en cuestión

$h_{ri}$  = espesor de la capa interna  $i$  de elastómero en cuestión (in.)

Deflexión a largo tiempo por carga muerta:

$$\delta_{lt} = \delta_d + a_{cr} \delta_d$$

donde:

$a_{cr}$  = deflexión por deformación del material dividido para la deflexión inicial de la carga viva.

Los valores para  $\varepsilon_{Li}$  y  $\varepsilon_{di}$  deben ser determinados por experimentación o por análisis. Los efectos de deformación del material deben ser determinados dependiendo del elastómero utilizado. Si no se calcula el valor de  $a_{cr}$ , se pueden utilizar los valores de la Tabla 14.7.6.2-1 de la Especificación "AASHTO LRFD *Bridge Design Specifications*" que se muestra a continuación:

**Tabla 7. Propiedades de materiales para determinar rigidez en Escala “Shore A”**

	Hardness (Shore A)		
	50	60	70 <sup>1</sup>
Shear Modulus @ 73°F (ksi)	0.095–0.130	0.130–0.200	0.200–0.300
Creep deflection @ 25 yr divided by initial deflection	0.25	0.35	0.45

Fuente: American Association of State Highway and Transportation Officials (2012). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th Ed. Washington, D.C.

#### 6.1.5.2.9 Eventos sísmicos y otros eventos extremos.

En caso de diseñar apoyos para zonas sísmicas; se deben utilizar elastómeros expansibles para que resistan las fuerzas horizontales provocadas por los terremotos. Adicionalmente se deben fabricar placas de acero más grandes para poder emperrar las placas y proveer un buen anclaje. Los pernos deben ser diseñados para el efecto combinado de corte y deflexión para eventos sísmicos y otros eventos de carga extrema. Esto siempre y cuando no se permitan daños en la estructura. Si se utilizan apoyos sin todas estas provisiones, se esperarían daños reparables en el apoyo después de sufrir un evento sísmico.

#### 6.1.5.2.10 Anclaje para apoyos sin placas externas.

En apoyos donde no existan placas externas de acero. Si se cumple la ecuación que se muestra a continuación, se debe utilizar un sistema de anclaje para asegurar al apoyo frente a movimientos horizontales:

$$\frac{\theta_s}{n} \geq \frac{3\varepsilon_a}{S_i}$$

donde:

$n$  = número de capas interiores de elastómero. Cuando el espesor de una capa exterior de elastómero es mayor a 1.5 veces el espesor de una capa interior, el parámetro,  $n$ , puede ser incrementado en 1.5 veces por cada capa exterior.

$S_i$  = factor de forma de la capa  $i$  del elastómero en cuestión

$\varepsilon_a$  = deformación total estática y cíclica, tomada como positiva para compresión. El componente cíclico es multiplicado por 1.75 de la combinación de cargas aplicables de la Tabla 3.4.1-1 (ksi)

$\theta_s$  = rotación total estática y cíclica en el estado límite de servicio especificada en el Artículo 14.4.2.1 , donde el componente cíclico se multiplica por 1.75 (rad.)

## **6.1.6 Apoyos elastoméricos reforzados- Método A.**

### **6.1.6.1 Información general.**

La siguiente provisión aplica para el diseño de:

- Elastómeros Planos (“Plain elastomeric pads” =PEP)
- Elastómeros reforzados con fibra de vidrio (“Fiberglass pads”= FGP)
- Elastómeros reforzados con acero donde  $S_i^2/n < 22$  , y donde la rotación primaria se da a lo largo del eje transversal del puente ( $S_i$  = factor de forma,  $n$  = número de capas interiores de elastómero)
- Apoyos fabricados con algodón de pato (“Cotton duck pads”=CDP)

Estos tipos de apoyo tienen diferentes características que los apoyos reforzados con acero. Los PEP son más flexibles y menos resistentes, lo cual causa mayor deflexión a compresión. Los FGP inhiben las deformaciones que ocurren normalmente en los PEP, sin embargo la unión entre elastómero y fibra de vidrio no es tan buena por lo cual la resistencia no es la misma de un elastómero reforzado con acero. Por otro lado los CDP poseen buena resistencia a compresión debido a que se utilizan muy finas capas de algodón de pato, pero,

el uso de muchas capas aumenta los esfuerzos rotacionales y de corte en el apoyo. Los CDP deben cumplir con los requerimientos de la Military Specification MIL-C-882E.

#### **6.1.6.2 Propiedades de los materiales.**

Los materiales utilizados para fabricar elastómeros PEP, FGP y elastómeros reforzados con acero deben satisfacer los requerimientos del Artículo 14.7.5.2 de La Especificación "AASHTO LRFD 6th Edition", a excepción de:

- La rigidez en Escala Shore A puede ser utilizada como una base para determinar el material del apoyo
- El módulo a corte para apoyos tipo PEP, FGP y elastómeros reforzados con placa superior deslizante de PTFE, debe estar entre 0.080 ksi y 0.250 ksi. También se puede usar la rigidez nominal en la Escala Shore A, donde la rigidez debe estar entre 50 y 70.
- El módulo a corte para apoyos reforzados con acero y que no posean placa superior de PTFE, debe estar entre los 0.080 ksi y 0.175 ksi. Si se utiliza la Escala Shore A, la rigidez nominal debe estar entre 50 y 60.

Si los materiales están definidos por su rigidez, se puede utilizar la Tabla 14.7.6.2-1 de la Especificación "AASHTO LRFD *Bridge Design Specifications*" que se utilizó en el Método B, para determinar el valor del módulo a corte. Siempre se debe escoger el valor menos favorable de G para tener un diseño conservativo. Se pueden encontrar valores intermedios con interpolación.



### **6.1.6.3 Requerimientos de diseño.**

#### *6.1.6.3.1 Alcance del diseño*

Los métodos de diseño para apoyos tipo PEP, FGP, y CDP, son mucho más simples y menos estrictos que los métodos de diseño para apoyos reforzados con acero. Sin embargo el diseño de cada uno de ellos es diferente y se necesita información adicional dependiendo del tipo de apoyo que se esté diseñando.

Los apoyos elastoméricos reforzados con acero pueden ser diseñados con este método siempre y cuando califiquen con los requerimientos necesarios. En este caso, los elastómeros reforzados con acero deben ser tratados y diseñados como apoyos reforzados con fibra de vidrio. Adicionalmente las provisiones para apoyos reforzados con fibra de vidrio solo aplican cuando la fibra es colocada en capas dobles que se encuentran apartadas 0.125 in.

#### *6.1.6.3.2 Esfuerzo a compresión*

En el estado límite de servicio, los esfuerzos promedio a compresión,  $\sigma_s$  y  $\sigma_L$ , en cualquier capa de elastómero deben satisfacer lo siguiente:

- Para PEP:

$$\sigma_s \leq 1.00 GS$$

$$\sigma_s \leq 0.80 ksi$$

- Para FGP:

$$\sigma_s \leq 1.25 GS_i$$

$$\sigma_s \leq 1.0 ksi$$

- Para CDP:

$$\sigma_s \leq 3.0 ksi$$

$$\sigma_L \leq 2.0 \text{ ksi}$$

donde:

$\sigma_s$  = esfuerzo promedio a compresión debido a carga total (ksi)

$S$  = factor de forma para PEP

$\sigma_L$  = esfuerzo promedio a compresión en el estado límite de servicio debido a carga viva (factor de carga = 1.0) (ksi)

En apoyos tipo FGP, el valor de  $S_i$  debe ser calculado utilizando un espesor de  $h_{ri}$  igual a la mayor distancia entre puntos medios de dos capas dobles de fibra de vidrio.

Para apoyos reforzados con acero se debe cumplir lo siguiente:

$$\sigma_s \leq 1.25 GS_i$$

$$\sigma_s \leq 1.25 \text{ ksi}$$

donde:

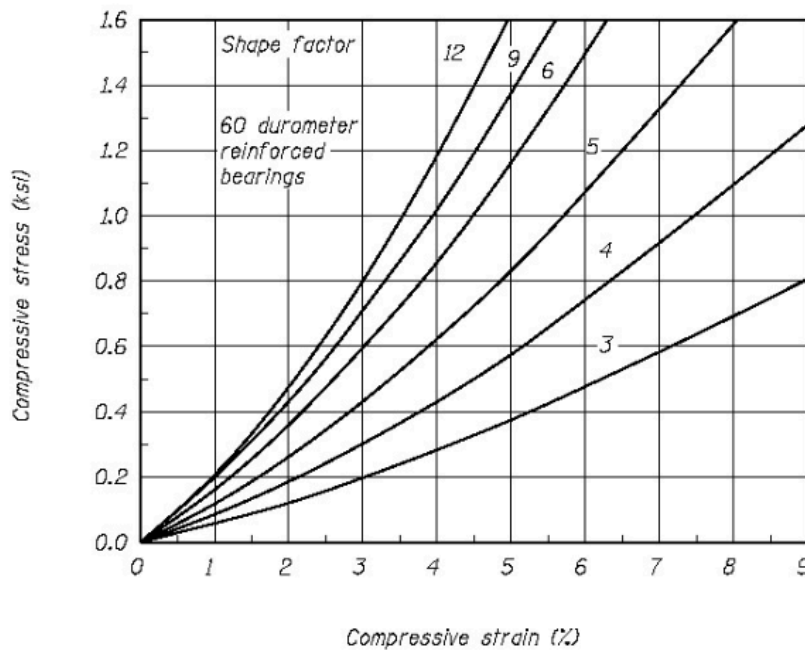
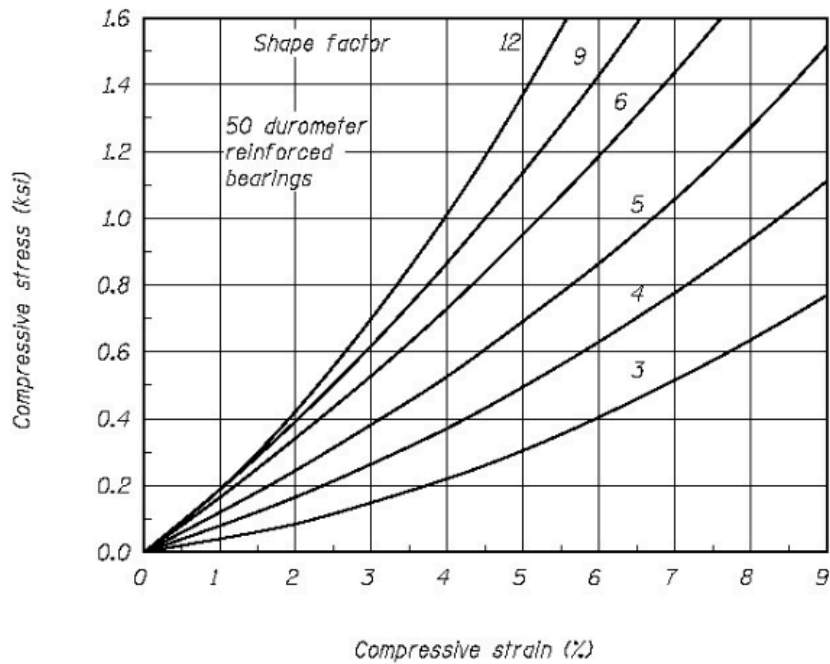
$S_i$  es ser el factor de forma para una capa interna de elastómero

Todos estos límites de esfuerzo pueden ser incrementados en un 10 por ciento cuando la deformación por corte es impedida

#### 6.1.6.3.3 Deflexión a compresión.

Las deflexiones a compresión de apoyos tipo PEP, FGP, y CDP pueden variar ampliamente a diferencia de los apoyos reforzados con acero. Se puede estimar una deflexión 3 veces más grande para los apoyos PEP y 1.5 veces más grande para los FGP en relación a las deflexiones obtenidas en los apoyos reforzados con acero. Adicionalmente la deflexión instantánea por compresión debido a carga muerta y carga viva en apoyos tipo PEP, no puede exceder  $0.09 h_{ri}$ , donde  $h_{ri}$  es el espesor de una capa de elastómero.

La figura C14.7.6.3.3-1 se puede utilizar para estimar la deflexión en una capa de elastómero para apoyos reforzados con acero. Esta figura utiliza la dureza y el factor de forma para estimar la deflexión. La figura se muestra a continuación:



**Figura 10. Curvas Esfuerzo-Deformación**

Fuente: American Association of State Highway and Transportation Officials (2012). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th Ed. Washington, D.C.

Para apoyos tipo CDP, la deflexión a compresión,  $\varepsilon_s$ , puede ser calculada de la siguiente manera:

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_c}$$

donde:

$E_c$  = rigidez uniaxial a compresión de la capa de CDP. Puede ser tomada como 30 ksi en lugar de obtener el valor en un laboratorio (ksi)

$\sigma_s$  = esfuerzo a compresión promedio debido a carga total

#### 6.1.6.3.4 Corte.

La deformación en apoyos tipo PEP y FGP, está limitada a  $\pm 0.5 h_{rt}$ . Este límite se utiliza para asegurar la utilidad del puente y para no sobrepasar el límite de servicio. En cuanto a apoyos tipo CDP, la deflexión por corte está limitada a un décimo del espesor total del elastómero. Esta limitación es mucho menor debido a que los CDP tienen mayor rigidez y sufrirán fisuras y corte cuando se tengan mayores deformaciones. Sin embargo, los apoyos CDP deben ser diseñados con superficies deslizantes de PTFE cuando la deformación del apoyo sea muy grande. Este diseño se realiza para evitar que el apoyo de CDP resbale y produzca inestabilidad en la superestructura del puente.

Las provisiones del Artículo 14.7.5.3.2 pueden ser aplicadas para el diseño, excepto para los "pads" que deben ser diseñados de la siguiente forma:

- Para PEP, FGP y apoyos reforzados con acero:

$$h_{rt} \geq 2 \Delta_s$$

- Para CDP:

$$h_{rt} \geq 10 \Delta_s$$

donde:

$h_{rt}$  = el valor más pequeño entre el espesor total del elastómero o del apoyo  
(in.)

$\Delta_s$  = deformación máxima por corte del apoyo (in.)

El módulo a corte,  $G$ , para apoyos tipo CDP, se calcula de la siguiente forma:

$$G = 2\sigma_s \geq 2.0 \text{ ksi}$$

donde:

$\sigma_s$  = esfuerzo a compresión promedio debido a carga total

#### 6.1.6.3.5 Rotación en apoyos tipo CDP.

La provisión de este artículo aplican para el estado límite de servicio. Las rotaciones deben ser tomadas en cuenta como la suma de los efectos de la falta de paralelismo en la geometría del puente, así como la rotación en los extremos de la superestructura del puente debido a las cargas y desplazamientos.

La deformación máxima debido a compresión y rotación combinados,  $\varepsilon_t$ , no debe exceder lo siguiente:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_c + \frac{\theta_s L}{2t_p} < 0.20$$

donde:

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_s}{E_c}$$

La rotación máxima debe ser limitada a:

$$\theta_s \leq 0.80 \frac{2t_p \varepsilon_c}{L}$$

$$\theta_L \leq 0.20 \frac{2t_p \varepsilon_c}{L}$$

donde:

$E_c$  = rigidez uniaxial a compresión de la capa de CDP. Puede ser tomada como 30 ksi en lugar de obtener el valor en un laboratorio (ksi)

$L$  = longitud del CDP en el plano de rotación (in.)

$t_p$  = espesor total del CDP (in.)

$\varepsilon_c$  = deflexión máxima uniaxial a compresión debido a carga total

$\varepsilon_t$  = deflexión máxima uniaxial debido a compresión y rotación combinados

$\sigma_s$  = esfuerzo a compresión promedio debido a carga total asociada con la máxima rotación

$\theta_L$  = rotación máxima del CDP en el estado límite de servicio (factor de carga =1.0) debido a carga viva (rad.)

$\theta_s$  = rotación máxima del CDP

#### 6.1.6.3.6 Estabilidad.

Para asegurar estabilidad, el espesor total del pad no debe exceder el menor valor de  $L/3$ ,  $W/3$  o  $D/4$ .

donde:

$L$  = dimensión plana del apoyo que es perpendicular al eje de rotación en consideración (generalmente paralelo al eje longitudinal del puente) (in.)

$n$  = número de capas interiores de elastómero. Cuando el espesor de una capa exterior de elastómero es mayor a 1.5 veces el espesor de una capa interior, el parámetro,  $n$ , puede ser incrementado en 1.5 veces por cada capa exterior.

$W$  = dimensión plana del apoyo que es paralela al eje de rotación en consideración (generalmente paralela al eje transversal del puente) (in.)

$D$  = diámetro del pad (in.)

#### *6.1.6.3.7 Refuerzo.*

Los refuerzos de FGP deben ser de fibra de vidrio con una resistencia en cada dirección plana de por lo menos  $2.2h_{ri}$  en kip/in. Si se utilizan elastómeros de diferentes espesores se debe escoger el menor valor de  $h_{ri}$ . Si el refuerzo de fibra de vidrio posee agujeros, se debe incrementar su resistencia por un factor igual a el doble de el espesor total dividido para el espesor neto. El refuerzo debe ser lo suficientemente fuerte para resistir los esfuerzos inducidos cuando el apoyo es sometido a fuerzas de compresión. El refuerzo para apoyos reforzados con acero, se diseña con las provisiones del Artículo 14.7.5.3.5 de la Especificación AASHTO LRFD 6ta Edición.

#### *6.1.6.3.8 Eventos sísmicos y otros eventos extremos.*

Los apoyos expansibles deben tener un diseño sísmico adecuado para resistir fuerzas horizontales excesivas. Las provisiones del Artículo 14.7.5.3.7 se aplican en esta circunstancia.

#### **6.1.7 Superficies deslizantes de bronce y aleaciones de cobre.**

Los apoyos de bronce tienen una larga historia de aplicación en los Estados Unidos. Su funcionamiento ha sido muy satisfactorio, sin embargo no existen investigaciones sustanciales que respalden las propiedades y características de los apoyos de bronce. La mejor guía para el diseño de estos apoyos es la experiencia pasada.

#### **6.1.7.1 Materiales.**

Los apoyos de bronce y aleaciones de cobre pueden ser utilizados para:

- Acomodar movimientos de traslación en superficies planas deslizantes
- Acomodar traslación y rotación limitada en superficies curvas

Las superficies deslizantes de bronce deben satisfacer la Norma AASHTO M107 (ASTM B22) y deben ser fabricadas con Aleación C90500, C91100 ó C86300 a menos que se especifique de otra manera.

Históricamente este tipo de apoyos se han fabricado con bronce sinterizado, bronce lubricado o con aleaciones de cobre. Existe evidencia que determina que los apoyos de bronce sinterizado no tienen un muy buen rendimiento. Además no existen muchos fabricantes de bronce sinterizado. Es por esto que no existen provisiones para apoyos de bronce sinterizado en la especificación.

Por otro lado los apoyos de bronce lubricado tienen un buen rendimiento y además son producidos por un gran número de fabricantes. La lubricación existente reduce la fricción y prolonga la vida útil del apoyo. El bronce natural no posee lubricante, por lo cual tiene peor rendimiento.

Los apoyos expansibles de bronce y de aleaciones de cobre deben ser chequeados para fallas por corte y estabilidad bajo cargas laterales. Las placas deslizantes insertadas en la base del apoyo pueden levantarse al ser sometidas a elevadas cargas horizontales. La resistencia a corte y estabilidad puede ser aumentada al añadir pernos en la base metálica que se fijen al concreto.



### **6.1.7.2 Coeficiente de fricción.**

El coeficiente de fricción debe ser determinado por experimentación. Si no existe información, se puede utilizar un coeficiente de fricción de diseño de 0.1 para componentes de bronce lubricado y de 0.4 para otros tipos de materiales.

### **6.1.7.3 Limitaciones de carga.**

El esfuerzo nominal del apoyo en el estado límite de servicio debido a carga viva y a carga muerta, no debe exceder los valores propuestos por la Tabla 14.7.7.3-1 de la Especificación que se muestra a continuación:

**Tabla 8. Esfuerzo en el apoyo en el Estado Límite de Servicio**

AASHTO M 107 (ASTM B22) Bronze Alloy	Bearing Stress (ksi)
C90500—Type 1	2.0
C91100—Type 2	2.0
C86300—Type 3	8.0

Fuente: American Association of State Highway and Transportation Officials (2012). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th Ed. Washington, D.C.

### **6.1.8 Apoyos de disco.**

#### **6.1.8.1 General.**

Las dimensiones de los elementos de los apoyos de disco, deben ser de tal medida de modo que aseguren el contacto entre todos los elementos de metal. De esta forma se podrán prevenir desplazamientos y rotaciones no deseadas que pueden ocurrir bajo las condiciones menos favorables de carga.

Los apoyos de disco funcionan mediante la deformación de un disco de poliuretano. Este disco debe ser lo suficientemente rígido para resistir cargas verticales sin sufrir deformaciones excesivas y sin sufrir esfuerzos excesivos por las rotaciones impuestas.

El disco debe ser diseñado para la rotación máxima en el estado último de resistencia,  $\theta_u$ , especificada en el Artículo 14.4.2.2.2 de las Especificación AASHTO LRFD 6ta Edición.

Para poder establecer las fuerzas y deformaciones impuestas en un apoyo de disco, se debe tomar el eje horizontal como el eje de rotación. El eje de rotación pasa justo por la mitad de la altura del disco.

Se pueden utilizar anillos de confinamiento para prevenir al elastómero de expansión lateral. Los anillos deben consistir de anillos soldados a las placas superior e inferior del apoyo. El espesor del anillo debe ser de al menos  $0.03D_d$ , donde  $D_d$  es el diámetro del disco.

#### **6.1.8.2 Materiales.**

El disco elastomérico debe ser fabricado con un compuesto basado en poliuretano que sólo utilice materiales vírgenes. Su rigidez debe estar entre 45 y 65 en la Escala Shore D.

Los elementos metálicos del apoyo deben ser fabricados con acero estructural conforme a AASHTO M270M/M270 (ASTM A709/A709M), Grado 36, 50, 50W o de acero inoxidable conforme a ASTM A240.

#### **6.1.8.3 Disco elastomérico.**

El disco elastomérico debe ser sujeto en posición por un dispositivo de locación positiva. De esta forma se mantendrán los espacios libres normativos y se podrá prevenir la desunión cuando sucedan rotaciones extremas.

En el estado límite de servicio, el disco debe ser diseñado de manera que:

- La deflexión instantánea no exceda el 10 por ciento del espesor del disco sin esfuerzos bajo carga total y que la deflexión debido a encogimiento del disco no exceda el 8 por ciento del espesor del disco sin esfuerzos.

- Los componentes del apoyo no se levanten en ninguna locación
- El esfuerzo de compresión en el disco no exceda 5.0 ksi.

#### **6.1.8.4 Mecanismo de resistencia de corte.**

En apoyos fijos y con guías, se debe proveer un mecanismo resistente a cortante para transmitir fuerzas horizontales. El mecanismo debe poder resistir fuerzas horizontales en cualquier dirección. Además las fuerzas horizontales resistidas pueden llegar a ser la fuerza máxima de corte en el estado último de resistencia o el 15 por ciento de la carga vertical de diseño.

#### **6.1.8.5 Placas de acero.**

Las placas de acero deben tener el espesor necesario para poder distribuir uniformemente las cargas en el apoyo. El espesor de las placas debe ser al menos  $0.045 D_d$  para discos en contacto directo con la viga de acero ó  $0.06 D_d$  para discos en contacto con concreto, donde  $D_d$  es el diámetro del disco.

Ahora se procederá a realizar el diseño de apoyos con el Método A y B que se explicaron anteriormente.

## DESARROLLO DEL TEMA

En esta sección se procederá a realizar el diseño de apoyos utilizando el Método A y B de la Especificación “AASHTO LRFD *Bridge Design Specifications, 6th Edition*”. Primero se realizan los cálculos a mano con los dos métodos para luego elaborar hojas de cálculo en Excel con el procedimiento optimizado.

El Método B se usa sólo para apoyos reforzados con acero, mientras el Método A se utiliza para apoyos reforzados con acero y con otras fibras. Por lo general, el Método B resulta en un diseño de mayor capacidad que el Método A. Esto se debe principalmente a que el Método B requiere un control de calidad más estricto. Los apoyos elastoméricos reforzados con acero son diseñados de manera separada debido a su mayor capacidad y resistencia en la práctica.

### Método A

Este método permite diseñar apoyos reforzados con: fibra de vidrio, algodón de plumas pato, acero y también apoyos sin refuerzo. Para poder diseñar apoyos reforzados con acero por este método, se debe cumplir que  $S_i^2/n < 22$ . Siendo  $S_i$  el factor de forma y  $n$  el número de capas elastoméricas interiores. Adicionalmente se debe cumplir que el eje de rotación primario sea alrededor del eje paralelo al eje transversal del puente.

A continuación se realizará el diseño para un apoyo utilizando este Método. Para empezar con el diseño del apoyo, se necesitan algunos valores iniciales de diseño. Los datos que se necesitan son los siguientes:

Tipo de Apoyo: (PEP, FGP, CDP, Apoyo reforzado con acero)
Carga Muerta = PD
Carga Viva = PLL
Movimiento Horizontal de la Superestructura del Puente = $\Delta S$
Rotación Calculada por Carga Muerta = $\theta_{SD}$
Tolerancia de Rotación en Construcción = 0.005 radianes (14.4.2.1)
Rotación de Diseño Debido a Carga Muerta = $\theta_{SD}$
Rotación de Diseño Debido a Carga Viva = $\theta_{SL}$
Geometría del Apoyo: (Rectangular o Circular)
Apoyo Puede Deformarse a Corte: (Si o No)
Ancho del Patín de la Superestructura por Encima del Apoyo
Ancho Del Apoyo = W
Longitud del Apoyo = L
Espesor de las Capas de Elastómero = h <sub>ri</sub>
Espesor del Recubrimiento Superior e Inferior (cada uno) = h <sub>cover</sub>
Número de Capas Elastoméricas Interiores = n.int
Módulo a Corte del Elastómero = G

Los chequeos que se deben realizar en este método se muestran a continuación:

1. Geometría del apoyo
2. Deformación por corte
3. Esfuerzo de compresión
4. Rotación en el apoyo
5. Refuerzo mínimo
6. Estabilidad

Los cálculos para cada chequeo se encuentran en el Anexo A. Adicionalmente se muestra la hoja de calculo con el ejemplo resuelto en el Anexo C.

Al finalizar el diseño se encontró que el apoyo no cumplía con los esfuerzos de compresión. Esto se debe a que los apoyos elastoméricos poseen una resistencia limitada. Además el factor de forma ,  $S$ , tiene un valor muy pequeño, por lo cual se limita la

resistencia a compresión del elastómero. Se debe diseñar un apoyo reforzado con acero para que se puedan satisfacer las condiciones iniciales del problema.

## Método B

En este Método, el parámetro más crítico de diseño es el esfuerzo cortante en la interface del elastómero con las placas de acero. El esfuerzo cortante es provocado por fuerza axial, deformaciones y rotaciones. El Método B provee un diseño versátil que toma en cuenta la combinación de los esfuerzos cortantes mencionados anteriormente.

A continuación se realizará el diseño de un apoyo elastomérico haciendo uso del Método B. Para empezar con el diseño del apoyo, se necesitan algunos valores iniciales de diseño. Los datos que se necesitan son los siguientes:

Carga Muerta = PD
Carga Viva = PLL
Movimiento Horizontal de la Superestructura del Puente Debido a Carga Muerta = $\Delta SD$
Movimiento Horizontal de la Superestructura del Puente Debido a Carga Viva = $\Delta SL$
Eje de rotación del elastómero (Transversal o Longitudinal)
Rotación Calculada por Carga Muerta = $\theta SD$
Tolerancia de Rotación en Construcción = 0.005 radianes (Artículo 14.4.2.1)
Rotación de Diseño Debido a Carga Muerta = $\theta SD + 0.005$ radianes
Rotación de Diseño Debido a Carga Viva = $\theta SL$
Geometría del Apoyo (Rectangular o Circular)
Apoyo Puede Deformarse a Corte (Si o No)
Apoyo Tiene Fijación para Traslaciones Horizontales ( Si o No)
Ancho del Patín de la Superestructura por Encima del Apoyo
Ancho Del Apoyo = W
Diámetro del Apoyo = D
Espesor de las Capas de Elastómero = hri
Módulo a Corte del Elastómero = G
Esfuerzo de Fluencia Mínimo del Acero de Refuerzo = Fy
“Constant Amplitude Fatigue Threshold” = $\Delta FTH$

Una vez que se tienen los valores iniciales, se procede a realizar el diseño del apoyo. Se deben realizar 5 chequeos que se muestran a continuación:

1. Geometría del apoyo
2. Deformación por corte
3. Compresión, rotación y corte combinados
4. Estabilidad
5. Refuerzo de acero

Los cálculos necesarios para cada chequeo se muestran en el Anexo B. Adicionalmente se muestra la hoja de cálculo con el ejemplo resuelto en el Anexo D.

Al finalizar el proceso, se obtiene el diseño del apoyo con todas sus características:

Ancho del Apoyo = $W =$	15	in.
Longitud del Apoyo = $L =$	13.5	in.
Espesor de las Capas de Elastómero = $h_{ri} =$	0.375	in.
Espesor del Recubrimiento Superior e Inferior = $h_{cover} =$	0.25	in.
Número de Capas Elastoméricas Interiores = $n_{int} =$	10	
Espesor Total del Elastómero = $h_{rt} = 2h_{cover} + n_{int} h_{ri} =$	4.25	in.
Espesor del Acero de Refuerzo = $h_s =$	0.063	in.
Espesor Total del Apoyo = $h_{rt} + h_s (n_{int} + 1)$	4.94	in.

A continuación se muestra un esquema del apoyo:

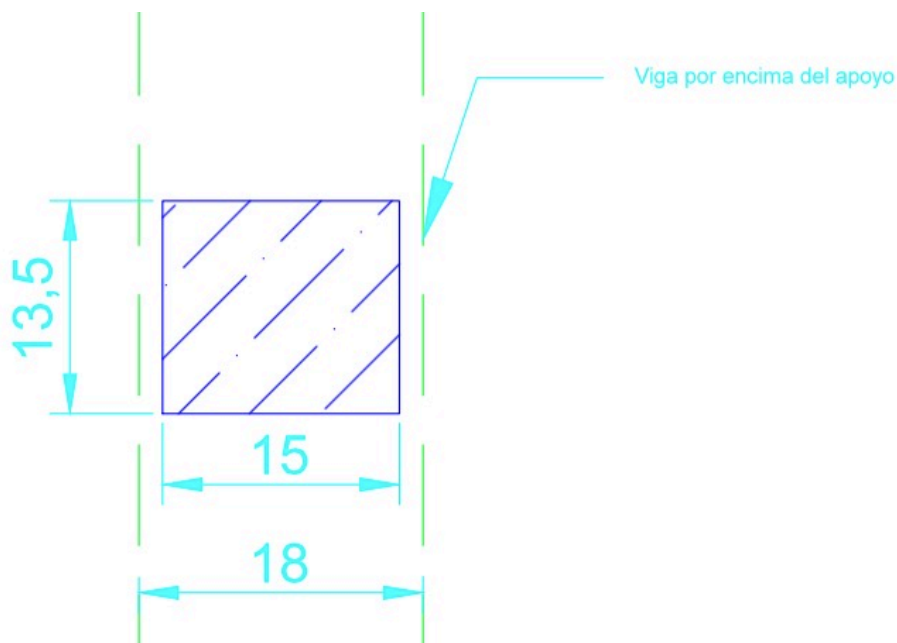


Figura 11. Vista en planta del apoyo.

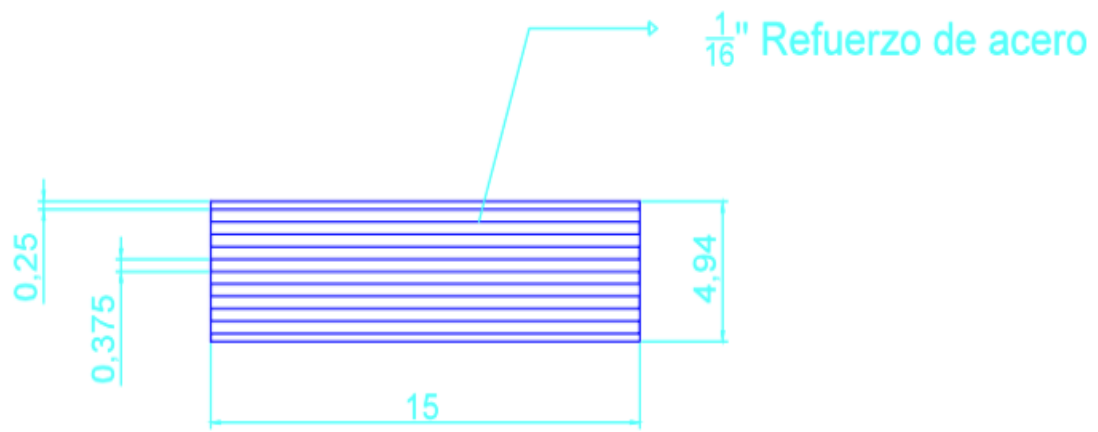


Figura 12. Sección del apoyo.



## CONCLUSIONES

Al finalizar el proyecto, se pueden realizar varias conclusiones. A continuación se encuentran los puntos principales que se lograron con la realización de este proyecto:

- Se identificaron los diferentes tipos de apoyos y sus aplicaciones.
- Se analizó a profundidad la Especificación AAHSTO LRFD 6ta Edición para el diseño de apoyos en puentes.
- Se determinaron los requerimientos necesarios para el diseño de apoyos y juntas.
- Se diseñaron apoyos elastoméricos reforzados con acero y con otras fibras haciendo uso de los Métodos de diseño expuestos en la Especificación AAHSTO LRFD 6ta Edición.
- Se elaboraron hojas de cálculo para el Método A y Método B mostrados en la Especificación. Las hojas de cálculo se encuentran en sistema inglés y en sistema métrico. Además se realizaron versiones en español y en inglés para los dos métodos.
- Los apoyos elastoméricos poseen una resistencia limitada, es por esto que se recomienda usar apoyos reforzados. Los apoyos reforzados con acero y otras fibras, poseen mayor resistencia frente a cargas, movimientos y rotaciones elevadas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Association of State Highway and Transportation Officials (2012). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 6th Ed. Washington, D.C.

American Association of State Highway and Transportation Officials (2004). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 3rd Ed. Washington, D.C.

American Iron and Steel Institute, National Steel Bridge Alliance (1996). "Steel Bridge Bearing Selection and Design Guide," Highway Structures Design Handbook, Volume II, Chapter 4.

Starzewski K. (1986). "Earth Retaining Structures and Culverts," The Design and Construction of Engineering Foundations, Edited by Henry, F.D.C. New York: Chapman and Hall.

Steel Bridge Design Handbook(2005). Bearing Design. Chapter 18.

Tonias D., Zhao J. (2006). Design, Rehabilitation and Maintenance of Modern Highway Bridges. United States: McGraw-Hill.

## ANEXO A: DISEÑO DE APOYOS ELASTOMÉRICOS REFORZADOS- MÉTODO A - CÁLCULOS A MANO

### Diseño de apoyos elastoméricos - Método A - AASHTO LRFD 14.7.6

#### Paso 1: Valores Iniciales de Diseño

- Tipo de Apoyo: "Plain Elastomeric Pad (PEP)"
- Carga Muerta =  $P_D = 102$  Kips.
- Carga Viva =  $P_{LL} = 122$  Kips.
- Momento Horizontal de la Superestructura (Carga Muerta) =  $\Delta S_D = 1.00$  in.
- Momento Horizontal de la Superestructura (Carga Viva) =  $\Delta S_L = 1.10$  in.
- Rotación Calculada (Carga Muerta) =  $\Theta_{SD} = 0,004$  radianes
- Tolerancia de construcción =  $0,005$  radianes. (14.4.2.1)
- Rotación Total (Carga Muerta) =  $0,009$  radianes
- Rotación Calculada (Carga Viva) =  $\Theta_{SL} = 0,005$  radianes.
- Geometría del Apoyo: Rectangular
- El apoyo tiene deformación por corte.
- Ancho del patín de la Superestructura por encima del apoyo =  $19.0$  in.
- Ancho del Apoyo =  $W = 18$  in.
- Longitud del Apoyo =  $L = 18$  in.
- Módulo a corte del elastómero =  $G = 0,100$  Ksi
- Espesor del elastómero =  $5.00$  in.

#### Paso 2: Geometría del Apoyo

Ancho del patín =  $19$  in.

Ancho del apoyo =  $W = 18$  in.

Ancho del patín  $\geq W$

$19$  in.  $\geq 18$  in.  $\checkmark$  OK

Longitud del apoyo =  $L = 18$  in.

Área del apoyo =  $L \times W = 18 \times 18 = 324.0$  in<sup>2</sup>

Paso 3: Deformación por corte

Deformación Máxima a corte =  $\Delta S_D + \Delta S_L = 1.00 + 1.10 = 2.1$  in  
 Para "PEP":

$$h_{rt} \geq 2 \Delta s \quad (h_{rt} = \text{espesor del elastómero})$$

$$5.00 \geq 2(2.1)$$

$$5.00 \text{ in} \geq 4.20 \text{ in. } \checkmark \text{ OK.}$$

Paso 4: Esfuerzo de compresión

$$\text{Esfuerzo a Compresión} = \sigma_s = \frac{P_T}{A} = \frac{102 + 122}{324.0} = 0.69$$

(Carga Total)

$$\text{Esfuerzo a compresión} = \sigma_L = \frac{P_{LL}}{A} = \frac{122}{324.0} = 0.38$$

(Carga Viva)

$$\text{Factor de forma Rectangular} = S_i = \frac{LW}{2h_{ri}(L+W)} = \frac{18(18)}{2(5)(18+18)} = 0.9$$

- Para apoyos "PEP"  $0.08 \leq G \leq 0.250$

$$G = 0.10 \text{ Ksi } \checkmark \text{ OK}$$

- Apoyo con deformación por corte:

$$\sigma_s \leq 1.0 G S \quad \sigma_s \leq 0.8 \text{ Ksi.}$$

$$0.69 \leq (1.0)(0.1)(0.9) \quad 0.69 \leq 0.8$$

$$0.69 \leq 0.09$$

$$\checkmark \text{ OK}$$

No cumple!

### Paso 5: Estabilidad

El espesor total del elastómero no debe exceder el menor valor de:

$$L/3 = 18/3 = 6.0 \text{ in.}$$

$$W/3 = 18/3 = 6.0 \text{ in.}$$

$$h_{rt} \leq 6.0 \text{ in.}$$

$$5.00 \text{ in.} \leq 6.0 \text{ in.} \quad \checkmark \text{ OK}$$

### Resumen Final del Diseño

Ancho del Apoyo =  $W = 18 \text{ in.}$

Longitud del Apoyo =  $L = 18 \text{ in.}$

Espesor del Elastómero "PEP" =  $5.0 \text{ in.}$

→ El apoyo no cumple con los esfuerzos límites de compresión del Paso 4. El apoyo no es apto para las cargas y condiciones iniciales. Se debe diseñar un apoyo con otras especificaciones.

## ANEXO B: DISEÑO DE APOYOS ELASTOMÉRICOS REFORZADOS- MÉTODO B - CÁLCULOS A MANO

### Diseño de apoyos elastoméricos reforzados - Método B AASHTO LRFD 14.7.5

#### Paso 1: Valores Iniciales de Diseño

- Carga Muerta =  $P_D = 102$  Kips
- Carga Viva =  $P_L = 122$  Kips
- Movimiento Horizontal del puente debido a carga muerta =  $\Delta_{SD} = 1.0$  in
- Movimiento horizontal del puente debido a carga viva =  $\Delta_{SL} = 1.1$  in
- Rotación de Diseño por carga muerta =  $\Theta_{SD} = \text{rotación calculada} + \text{tolerancia construcción}$   
 $\Theta_{SD} = 0,004 + 0,005$   
 $\Theta_{SD} = 0,009$  radianes.
- Rotación de Diseño por carga viva =  $\Theta_{SL} = 0,005$  radianes
- El apoyo tiene geometría rectangular
- El apoyo tiene deformación por corte
- El deck del puente no tiene traslación horizontal
- Eje de rotación transversal

#### Paso 2: Geometría del apoyo

- Ancho del patín del miembro soportado por el apoyo = 18.0 in
- Escoger la dimensión del apoyo,  $W = 15.0$  in  
 $W \leq \text{Ancho del patín} \quad \checkmark \text{OK}$
- Escoger la longitud del apoyo,  $L = 13,5$  in.
- Área del apoyo  
 $A = L \cdot W = (13,5)(15) = 202,5 \text{ in}^2$

### Paso 3: Deformación por corte (AASHTO LRFD 14.7.5.3.2)

- $h_{rt} > 2 \Delta s$        $\Delta s = \Delta s_D + \Delta s_L = 1 + 1.1 = 2.1 \text{ in.}$
- $h_{rt}$  = espesor total del elastómero
  - $h_{rt} = h_{ri} \cdot n_{int} + 2h_{cover}$
  - $h_{ri}$  = espesor de las interiores de elastómero
  - $n_{int}$  = número de capas interiores de elastómero
  - $h_{cover}$  = espesor de las capas exteriores de elastómero

Escoger  $h_{ri} = 3/8 \text{ in}$ ,  $n_{int} = 10$ ,  $h_{cover} = 0,25 \text{ in}$

$h_{cover} \leq 0,7 h_{ri}$  (AASHTO LRFD 14.7.5.1)

$0,25 \text{ in} \leq 0,7(3/8) \text{ in}$

$0,25 \text{ in} \leq 0,2625 \text{ in} \quad \checkmark \text{ OK}$

$$h_{rt} = 3/8(10) + 2(0,25) = 4,25 \text{ in}$$

$$h_{rt} = 4,25 \text{ in} \geq 2 \Delta s = 2(2,1) \text{ in}$$

$$4,25 \text{ in} \geq 4,2 \text{ in} \quad \checkmark \text{ OK}$$

### Paso 4: Compresión, Rotación y Corte combinados (AASHTO 14.7.5.3.3)

Esfuerzo a compresión por Carga Total =  $\sigma_s = \frac{P_T}{A} = \frac{224}{202,5} = 1,106 \text{ Ksi}$

Esfuerzo a compresión por Carga Muerta =  $\sigma_D = \frac{P_D}{A} = \frac{102}{202,5} = 0,5 \text{ Ksi}$

Esfuerzo a compresión por Carga Viva =  $\sigma_L = \frac{P_{LL}}{A} = \frac{122}{202,5} = 0,6 \text{ Ksi}$

Factor de forma Rectangular =  $S_i = \frac{LW}{2h_{ri}(L+W)} = \frac{(13,5)(15)}{2(3/8)(13,5+15)} = 9,47 \text{ Ksi}$

Escoger Módulo a Corte del elastómero =  $G = 0,10 \text{ Ksi}$

$0,08 \leq G \leq 0,175$  (AASHTO LRFD 14.7.5.2)

$0,08 \leq 0,1 \leq 0,175 \quad \checkmark \text{ OK}$

$(\delta_{a,st} + \delta_{v,st} + \delta_{s,st}) + 1,75(\delta_{a,cy} + \delta_{v,cy} + \delta_{s,cy}) \leq 5,0$  (14.7.5.3.3-1)

$\delta_{a,st} \leq 3,0$  (14.7.5.3.3-2)

- Los subíndices "st" y "cy" indican carga estática y carga cíclica respectivamente.

$\delta_a$  = Esfuerzo a corte debido a carga axial

$\delta_r$  = Esfuerzo a corte debido a rotación

$\delta_s$  = Esfuerzo a corte debido a deformación

$$\delta_a = D_a \frac{\sigma_s}{G \cdot S_i} \quad , \quad D_a = 1,4 \text{ para apoyos rectangulares.}$$

$$\delta_{a,st} = D_a \frac{\sigma_D}{G \cdot S_i} = \frac{1,4 (0,5)}{0,1 (9,47)} = 0,74$$

$$\delta_{a,cy} = D_a \frac{\sigma_L}{G \cdot S_i} = \frac{1,4 (0,6)}{0,1 (9,47)} = 0,89$$

$$\delta_r = D_r \left( \frac{L}{h r_i} \right)^2 \frac{\theta_s}{n} \quad , \quad D_r = 0,5 \text{ para apoyos rectangulares.}$$

$$\delta_{r,st} = D_r \left( \frac{L}{h r_i} \right)^2 \frac{\theta_{SD}}{n} = 0,5 \left( \frac{13,5}{3/8} \right)^2 \frac{0,009}{10} = 0,5832$$

$$\delta_{r,cy} = D_r \left( \frac{L}{h r_i} \right)^2 \frac{\theta_{SL}}{n} = 0,5 \left( \frac{13,5}{3/8} \right)^2 \frac{0,005}{10} = 0,324$$

$$\delta_s = \frac{\Delta s}{h r_t}$$

$$\delta_{s,st} = \frac{\Delta s_D}{h r_t} = \frac{1,0}{4,25} = 0,235$$

$$\delta_{s,cy} = \frac{\Delta s_L}{h r_t} = \frac{1,1}{4,25} = 0,258$$

$$(\delta_{a,st} + \delta_{r,st} + \delta_{s,st}) + 1,75 (\delta_{a,cy} + \delta_{r,cy} + \delta_{s,cy}) \leq 5,0$$

$$(0,74 + 0,5832 + 0,235) + 1,75 (0,89 + 0,324 + 0,258) \leq 5,0$$

$$4,13 \leq 5,0 \quad \checkmark \text{ OK}$$

$$\delta_{a,st} \leq 3,0$$

$$0,74 \leq 3,0 \quad \checkmark \text{ OK}$$



### Paso 5: Estabilidad (AASHTO LRFD 14.7.5.3.4)

$$2A \leq B \quad (14.7.5.3.4-1)$$

$$A = \frac{1,92 \frac{hrt}{L}}{\sqrt{1 + \frac{2L}{W}}} = \frac{1,92 \frac{4,25}{13,5}}{\sqrt{1 + \frac{2(13,5)}{15}}} = 0,361$$

$$B = \frac{2,67}{(S_i + 20) \left(1 + \frac{L}{4W}\right)} = \frac{2,67}{(9,47 + 2) \left(1 + \frac{13,5}{4(10)}\right)} = 0,19$$

$$2A \leq B$$

$$2(0,361) \leq 0,19$$

$$0,72 > 0,19 \quad \text{NO CUMPLE}$$

→ Se debe utilizar la ecuación 14.7.5.3.4-5

$$\sigma_s \leq \frac{G S_i}{A - B}$$

$$1,11 \leq \frac{0,1(9,47)}{0,361 - 0,19}$$

$$1,11 \leq 5,54 \quad \text{OK}$$

### Paso 6: Refuerzo de Acero (AASHTO LRFD 14.7.5.3-5)

Esfuerzo de Fluencia Mínimo del Acero,  $F_y = 36 \text{ Ksi}$

Espesor mínimo del acero de refuerzo =  $h_{s \text{ min}} = 0,0625 \text{ in}$

• Estado Límite de servicio:

$$h_s \geq \frac{3 h r_i \sigma_s}{F_y}$$

$$h_s \geq \frac{3 (3/8) (1,11)}{36} = 0,035 \text{ in}$$

• Estado Límite de fatiga:

$$h_s \geq \frac{2 h r_i \sigma_L}{\Delta F_{T\#}}$$

$\Delta F_{T\#}$  = "Constant Amplitude Fatigue threshold" = 24 Ksi

$$h_s \geq \frac{2 (3/8) (0,6)}{24} \geq 0,019 \text{ in}$$

Espesor de Acero de Refuerzo Requerido = 0,0625 in

### Resumen Final del Diseño

Ancho del Apoyo =  $W = 15$  in

Longitud del Apoyo =  $L = 13,5$  in

Espesor de las capas de Elastómero =  $h_{ri} = 0,375$  in.

Espesor del revestimiento superior e inferior (cada uno) =  $h_{cuer} = 0,25$  in.

Número de capas elastoméricas interiores = 10

Espesor total de elastómero =  $h_{rt} = 2 \cdot h_{cuer} + n_{int} \cdot h_{ri} = 4,25$  in.

Espesor de las capas de acero =  $h_s = 0,063$  in.

Espesor Total del Apoyo =  $h_{rt} + h_s (n_{int} + 1) = 4,94$  in.

## ANEXO C: DISEÑO DE APOYOS ELASTOMÉRICOS REFORZADOS - MÉTODO A – HOJA DE CÁLCULO

DISEÑO DE APOYOS ELASTOMERICOS (UNIDADES INGLESAS)			
AASHTO LRFD, 6TH ED., 2012			
METODO A - APOYOS ELASTOMERICOS REFORZADOS			
El siguiente programa de diseño fue desarrollado en base al código AASHTO LRFD. Se pueden realizar diseños tanto para apoyos circulares como apoyos rectangulares. Este programa no es aplicable para el diseño de apoyos rectangulares con rotaciones combinadas en el eje transversal y longitudinal. Para apoyos reforzados con acero y para apoyos reforzados con fibra de vidrio, el programa asume que las capas interiores de elastómero tienen el mismo espesor. Para apoyos reforzados con fibra de vidrio, el refuerzo hs debe ser asumido de una capa doble de fibra de vidrio separada 0.125 in.			
PASO 1: VALORES INICIALES DE DISEÑO			
Tipo de Apoyo : <b>Plain Elastomeric Pad (PEP)</b>			
Carga Muerta = PD =	102	kips	
Carga Viva = PLL =	122	kips	
Movimiento Horizontal de la Superestructura del Puente Debido a Carga Muerta = $\Delta SD$ =	1.00	in.	
Movimiento Horizontal de la Superestructura del Puente Debido a Carga Viva = $\Delta SL$ =	1.10	in.	
Rotación Calculada por Carga Muerta = $\theta sD$ =	0.004	Radianes	
Tolerancia de Rotación en Construcción =	0.005	Radianes	(14.4.2.1)
Rotación de Diseño Debido a Carga Muerta = $\theta sD$ =	0.009	Radianes	
Rotación de Diseño Debido a Carga Viva = $\theta sL$ =	0.005	Radianes	
Geometría del Apoyo:	Rectangular		
Apoyo Puede Deformarse a Corte?	Si		
Ancho del Patín de la Superestructura por Encima del Apoyo =	19	in.	
Ancho Del Apoyo = W =	18	in.	
Longitud del Apoyo = L =	18	in.	
Espesor de las Capas Interiores de Elastómero* = hri =	5.00	in.	* (Para PEP y CDP, hri es el espesor total del apoyo)
Espesor del Recubrimiento Superior e Inferior (cada uno)** = hcover =	0.00	in.	** (hcover = 0 para PEP y CDP)
Número de Capas Elastoméricas Interiores*** = n.int =	0		*** (n.int = 0 para PEP y CDP)
Módulo a Corte del Elastómero = G =	0.100	ksi	

PASO 2: GEOMETRIA DEL APOYO					
Ancho Del Patín =	19		in.		
Ancho Del Apoyo = W =	18		in.		
Ancho Del Patín ≥	W				
19 ≥	18		in.	OK	
Carga Total sin Factorar = PT =	224		kips		
Longitud del Apoyo = L =	18		in.		
N/A ≥	N/A				
N/A ≥	N/A		in.	N/A	
Área Del Apoyo = A =	324.00		in.^2		
PASO 3: DEFORMACION POR CORTE (AASHTO LRFD 14.7.6.3.4)					
Deformación Máxima a Corte del Elastómero = ΔSD+ΔSL =	2.10		in.		
<b>Para Apoyos Tipo PEP</b>					
Espesor Total del Elastómero de PEP = hrt =	5.000		in.		
hrt ≥	2Δs				
5.00 ≥	4.20			OK	
PASO 4: ESFUERZO DE COMPRESION (AASHTO LRFD 14.7.6.3.2)					
Esfuerzo a Compresión (Carga Total) =	$\sigma_s = \frac{P_T}{A}$	0.69	ksi		
Esfuerzo a Compresión por Carga Viva =	$\sigma_L = \frac{P_{LL}}{A}$	0.38	ksi		
Factor de Forma Rectangular =	$S_i = \frac{LW}{2h_{ri}(L+W)}$	0.90	ksi		
Factor de Forma Circular =	$S_i = \frac{D}{4h_{ri}}$	N/A	ksi		

<b>Para Apoyos Tipo PEP, FGP y CDP:</b>				
0.08 ≤	G	≤ 0.250		
0.08 ≤	0.10	≤ 0.250		OK
<b>Apoyos con Deformación por Corte:</b>				
<b>Apoyos Tipo PEP:</b>				
σs ≤	1.0 GS	y	σs ≤	0.8 ksi
0.691 ≤	0.0900		0.691 ≤	0.8
				NO CUMPLE, AUMENTAR AREA
<b>PASO 5: Rotación para apoyos tipo CDP (AASHTO LRFD 14.7.6.3.5)</b>				
Rotación Calculada por Carga Muerta = θSD =		0.004	Radianes	
Tolerancia de Rotación en Construcción =		0.005	Radianes	
Rotación de Diseño Debido a Carga Muerta = θSD =		0.009	Radianes	
Rotación de Diseño Debido a Carga Viva = θSL =		0.005	Radianes	
Rotación Máxima = θS =		0.014	Radianes	
<b>Para Apoyos Tipo CDP:</b>				
$\epsilon_t = \epsilon_c + \frac{\theta_s L}{2t_p} < 0.20$		(14.7.6.3.5b-1)		
$\epsilon_c = \frac{\sigma_s}{E_c}$		(14.7.6.3.5b-2)		
Ec = 30 ksi				
tp = 5.000 in.				
σs = 0.69 ksi				
εc = 0.0230				
εt = 0.0482				
N/A	<	N/A	N/A	

$$\theta_s \leq 0.80 \frac{2t_p \varepsilon_c}{L}$$

$$\theta_s = 0.014$$

$$\text{N/A} \leq \text{N/A}$$

$$\theta_L \leq 0.20 \frac{2t_p \varepsilon_c}{L}$$

$$\theta_L = 0.005$$

$$\text{N/A} \leq \text{N/A}$$

N/A

N/A

## PASO 6: REFUERZO (AASHTO LRFD 14.7.6.3.7)

**Para Apoyos Tipo FGP: Estado Límite de Servicio**Esfuerzo de Fluencia de la Fibra de Vidrio=  $F_y$  (Fiber) = 36 ksi

$$h_{s \min} = \frac{2.2h_{ri}}{F_y}$$

hs min = N/A in.

hs min total = 2hs min + 0.125 in = N/A in.

**Para Apoyos Reforzados con Acero: Estado Límite de Servicio**Esfuerzo de Fluencia del Acero de Refuerzo=  $F_y$  (Reinforcement) = 36 ksi

$$h_{s \min} = \frac{3h_{ri} \sigma_s}{F_y}$$

hs min = N/A in.

**Para Apoyos Reforzados con Acero: Estado Límite de Fatiga**Constant Amplitude Fatigue Threshold =  $\Delta F_{TH}$  = 24 ksi

$$h_{s \min} = \frac{2h_{ri} \sigma_L}{\Delta F_{TH}}$$

hs min = N/A in.

Refuerzo Mínimo Requerido = $h_s \text{ min} =$	0.000	in.		
Refuerzo* = $h_s =$	0	in.	*(Aplica sólo para apoyos tipo FGP y apoyos reforzados con acero caso contrario usar cero)	
$h_s \geq h_s \text{ min}$				
0 $\geq$	0.000	in.		<b>OK</b>
<b>PASO 7: ESTABILIDAD (AASHTO LRFD 14.7.6.3.6)</b>				
El espesor total no debe exceder el menor valor de :				
	L/3 =	6.000	in.	
	W/3=	6.000	in.	
	D/4 =	N/A	in.	
<b>Apoyos Tipo PEP</b>				
$h_{rt} =$	5			
5 $\leq$	6.00			<b>OK</b>
<b>RESUMEN FINAL DEL DISEÑO</b>				
Ancho del Apoyo = W =	18	in.		
Longitud del Apoyo = L =	18	in.		
Espesor del Elastómero PEP=	5	in.		
Espesor del Recubrimiento Superior e Inferior (cada uno)** = $h_{cover} =$	0	in.	**( $h_{cover} = 0$ para PEP y CDP)	
Número de Capas Elastoméricas Interiores*** = $n.int =$	0		***( $n.int = 0$ para PEP y CDP)	
Espesor Total del Elastómero = $h_{rt} =$	5.000	in.		
Espesor del Acero de Refuerzo = $h_s =$	0.000	in.		
Espesor Total del Apoyo = $h_{rt} + h_s (n.int + 1)$	5.000	in.		



## ANEXO D: DISEÑO DE APOYOS ELASTOMÉRICOS REFORZADOS- MÉTODO B- HOJA DE CÁLCULO

DISEÑO DE APOYOS ELASTOMERICOS (UNIDADES INGLESAS)			
AASHTO LRFD, 6TH ED., 2012			
METODO B - APOYOS ELASTOMERICOS REFORZADOS			
El siguiente programa de diseño fue desarrollado en base al código AASHTO LRFD. Se pueden realizar diseños tanto para apoyos circulares como apoyos rectangulares. Este programa no es aplicable para el diseño de apoyos rectangulares con rotaciones combinadas en el eje transversal y longitudinal. Adicionalmente se supone que todas las capas de elastómero tienen el mismo espesor.			
PASO 1: VALORES INICIALES DE DISEÑO			
Carga Muerta = PD =	102	kips	
Carga Viva = PLL =	122	kips	
Movimiento Horizontal de la Superestructura del Puente Debido a Carga Muerta = $\Delta$ SD =	1.000	in.	
Movimiento Horizontal de la Superestructura del Puente Debido a Carga Viva = $\Delta$ SL =	1.100	in.	
Eje de rotación del elastómero:	Transversal		
Rotación Calculada por Carga Muerta = $\theta$ sD =	0.004	Radianes	
Tolerancia de Rotación en Construcción =	0.005	Radianes	(14.4.2.1)
Rotación de Diseño Debido a Carga Muerta = $\theta$ sD =	0.009	Radianes	
Rotación de Diseño Debido a Carga Viva = $\theta$ sL =	0.005	Radianes	
Geometría del Apoyo:	Rectangular		
Apoyo Puede Deformarse a Corte?	Si		
Apoyo Tiene Fijación para Traslaciones Horizontales?	Si		
Ancho del Patín de la Superestructura por Encima del Apoyo =	18	in.	
Ancho Del Apoyo = W =	15	in.	
Longitud del Apoyo = L =	13.5	in.	
Espesor de las Capas de Elastómero = hri =	0.375	in.	
Espesor del Recubrimiento Superior e Inferior (cada uno) = hcover=	0.25	in.	
Número de Capas Elastoméricas Interiores = n.int=	10		
Módulo a Corte del Elastómero = G =	0.1	ksi	
Esfuerzo de Fluencia Mínimo del Acero de Refuerzo = Fy =	36	ksi	
"Constant Amplitude Fatigue Threshold" = $\Delta$ FTH=	24	ksi	

PASO 2: GEOMETRIA DEL APOYO					
Ancho Del Patín =	18	in.			
Ancho Del Apoyo = W =	15	in.			
Ancho Del Patín ≥	W				
18 ≥	15	in.			OK
Carga Total de Compresión Sin Factorar = PT =	224	kips			
Longitud del Apoyo = L =	13.5	in.			
N/A ≥	N/A				
N/A ≥	N/A	in.			N/A
Área Del Apoyo = A =	202.5	in.^2			
PASO 3: DEFORMACION POR CORTE (AASHTO LRFD 14.7.5.3.2)					
Deformación Máxima por Corte en el Elastómero en el Estado Límite de Servicio = ΔSD =	2.100	in.			
2ΔSD=	4.200	in.			
Espesor de las Capas de Elastómero = hri =	0.375	in.			
Espesor del Recubrimiento Superior e Inferior (cada uno) = hcover=	0.25	in.			
hcover ≤	0.7 hri			(14.7.5.1)	
0.25 ≤	0.2625	in.			OK
Número de Capas Elastoméricas Interiores = n.int=	10				
Espesor Total del Elastómero = hrt = 2hcover+ n int hri=	4.250	in.			
hrt ≥	2Δs			(14.7.5.3.2-1)	
4.250 ≥	4.200				OK

**PASO 4: COMPRESION, ROTACION Y CORTE COMBINADOS (AASHTO LRFD 14.7.5.3.3)**

Esfuerzo a Compresión (Carga Total) =  $\sigma_s = \frac{P_T}{A} =$  1.11 ksi

Esfuerzo a Compresión por Carga Muerta =  $\sigma_D = \frac{P_D}{A} =$  0.50 ksi

Esfuerzo a Compresión por Carga Viva =  $\sigma_L = \frac{P_{LL}}{A} =$  0.60 ksi

Factor de Forma Rectangular =  $S_i = \frac{LW}{2h_{ri}(L+W)} =$  9.47 ksi (14.7.5.1-1)

Factor de Forma Circular =  $S_i = \frac{D}{4h_{ri}} =$  N/A ksi (14.7.5.1-2)

Módulo a Corte del Elastómero =  $G =$  0.1 ksi

$0.08 \leq G \leq 0.175$  ksi (14.7.5.2)

$0.08 \leq 0.10 \leq 0.175$  ksi

**OK**

$$(\gamma_{a,st} + \gamma_{r,st} + \gamma_{s,st}) + 1.75(\gamma_{a,cy} + \gamma_{r,cy} + \gamma_{s,cy}) \leq 5.0 \quad (14.7.5.3.3-1)$$

$$\gamma_{a,st} \leq 3.0 \quad (14.7.5.3.3-2)$$

Nota: Los subíndices "st" y "cy" indican carga estática y carga cíclica respectivamente

**$\gamma_a$  = Esfuerzo a Corte Debido a Carga Axial**

$$\gamma_a = D_a \frac{\sigma_s}{GS_i}$$

Donde:  $D_a$  = coeficiente adimensional usado para determinar esfuerzo a corte debido a carga axial.  
 $D_a$  es igual a 1.4 para apoyos rectangulares y 1.0 para apoyos circulares.

$$\gamma_{a,st} = D_a \frac{\sigma_D}{GS_i} = 0.74436214$$

$$\gamma_{a,cy} = D_a \frac{\sigma_L}{GS_i} = 0.890315501$$

**$\gamma_r$  = Esfuerzo a Corte Debido a Rotación**

Para Apoyos Rectangulares=

$$\gamma_r = D_r \left( \frac{L}{h_{ri}} \right)^2 \frac{\theta_s}{n}$$

Donde:  $D_r$ =coeficiente adimensional para determinar el esfuerzo a corte debido a rotación. $D_r$  es igual a 0.5 para apoyos rectangulares y 0.375 para apoyos circulares.

$$\gamma_{r,st} = D_r \left( \frac{L}{h_{ri}} \right)^2 \frac{\theta_{SD}}{n} = 0.5832$$

$$\gamma_{r,cy} = D_r \left( \frac{L}{h_{ri}} \right)^2 \frac{\theta_{SL}}{n} = 0.324$$

$\gamma_s$  = Esfuerzo a Corte Debido a Deformación

$$\gamma_s = \frac{\Delta_s}{h_{rt}}$$

Donde:  $\Delta_s$ =deformación estática o cíclica máxima a corte del elastómero

$$\gamma_{s,st} = \frac{\Delta_{SD}}{h_{rt}} = 0.235294118$$

$$\gamma_{s,cy} = \frac{\Delta_{SL}}{h_{rt}} = 0.258823529$$

Chequeo:

$$(\gamma_{a,st} + \gamma_{r,st} + \gamma_{s,st}) + 1.75(\gamma_{a,cy} + \gamma_{r,cy} + \gamma_{s,cy}) \leq 5.0$$

$$4.14084956 \leq 5$$

OK

$$\gamma_{a,st} \leq 3.0$$

$$0.74436214 \leq 3$$

OK

**PASO 5: ESTABILIDAD (AASHTO LRFD 14.7.5.3.4)**

$$2A \leq B \quad (14.7.5.3.4-1)$$

$$A = \frac{1.92 \frac{h_{rt}}{L}}{\sqrt{1 + \frac{2.0L}{W}}} = 0.361$$

$$B = \frac{2.67}{(S_t + 2.0)(1 + \frac{L}{4.0W})} = 0.190$$

Notas: Para apoyos rectangulares donde L sea mayor a W, se debe intercambiar L y W de las fórmulas A y B.

Para apoyos circulares se debe realizar el cálculo con W=L= 0.8D

$$2A \leq B$$

$$0.722449293 \leq 0.190$$

**NO CUMPLE- VER ECUACIÓN 14.7.5.3.4-5**

**Deck del Puente es Libre a Traslaciones Horizontales:**

$$\sigma_s \leq \frac{GS_t}{2A - B} \quad (14.7.5.3.4-4)$$

$$1.11 \leq \text{N/A} \quad \text{ksi}$$

**N/A**

**Deck del Puente es Fijo (No Posee Traslaciones Horizontales):**

$$\sigma_s \leq \frac{GS_t}{A - B} \quad (14.7.5.3.4-5)$$

$$1.11 \leq 5.53 \quad \text{ksi}$$

**OK**

PASO 6: REFUERZO DE ACERO (AASHTO LRFD 14.7.5.3.5)		
Esfuerzo de Fluencia Mínimo del Acero de Refuerzo = Fy =	36	ksi
Espesor Mínimo del Acero de Refuerzo= hs min =	0.0625	in.
<b>Estado Límite de Servicio:</b>		
$h_s \geq \frac{3h_{ri} \sigma_s}{F_y}$		
hs	≥ 0.035	in.
<b>Estado Límite de Fatiga:</b>		
Constant Amplitude Fatigue Threshold = ΔFTH=	24	ksi
$h_s \geq \frac{2h_{ri} \sigma_L}{\Delta F_{TH}}$		
hs	≥ 0.019	in.
Espesor de Acero de Refuerzo Requerido =	0.0625	in.
RESUMEN FINAL DEL DISEÑO		
Ancho del Apoyo = W =	15	in.
Longitud del Apoyo = L =	13.5	in.
Espesor de las Capas de Elastómero = hri =	0.375	in.
Espesor del Recubrimiento Superior e Inferior (cada uno) = hcover=	0.25	in.
Número de Capas Elastoméricas Interiores = n.int=	10	
Espesor Total del Elastómero = hrt = 2hcover+ n int hri=	4.250	in.
Espesor del Acero de Refuerzo = hs =	0.063	in.
Espesor Total del Apoyo = hrt + hs (n.int +1)	4.9375	in.