

Universidad de Costa Rica

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

Trabajo Final de Graduación

Departamento de Ingeniería Estructural

**Implicación de la configuración geométrica en la respuesta
sísmica de puentes curvos**

Preparado por


Sigrid Verónica Salazar Gamboa

Director

Ing. Carlos Fernández Chaves MSc.

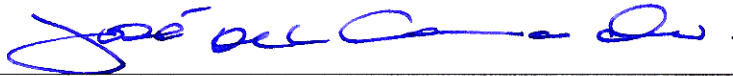
Octubre, 2016

COMITÉ ASESOR



Ing. Carlos Fernández Chaves, MSc.

Director Trabajo de Graduación



Ing. José Manuel Camacho Castro, MSc.

Asesor



Ing. Alejandro Navas Carro, MSc

Asesor



Sigrid V. Salazar Gamboa
Estudiante

DERECHOS DE AUTOR

Fecha: 2016, octubre, 31

La suscrita, *Sigríd Verónica Salazar Gamboa*, cédula 1-1387-0878, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné A85841, manifiesta que es autora del Proyecto Final de Graduación *Implicación de la Configuración Geométrica en la Respuesta Sísmica de Puentes Curvos*, bajo la Dirección del Ing. Carlos Fernández Chaves, MSc., quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); “no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales”. Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

DEDICATORIA

A mis papás, Rafael y Maria Elena, por todo su apoyo durante este proceso. Por siempre animarme para salir adelante y alcanzar un título universitario. Por todo su amor y comprensión.

A mi hermano, Peter, por ser una persona tan importante en mi vida. Porque sus consejos siempre me guían.

AGRADECIMIENTOS

A los miembros del Comité Asesor:

Al Ing. Carlos Fernández Chaves, por su tiempo, guía y dedicación.

Al Ing. José Manuel Camacho Castro, por su confianza y consejos.

Al Ing. Alejandro Navas Carro, por su disposición y motivación.

A mis compañeros y compañeras, los cuales me acompañaron en este proceso. Con ustedes este camino fue más fácil y más hermoso.

RESUMEN

Salazar Gamboa, Sigrid Verónica

Implicación de la configuración geométrica en la respuesta sísmica de puentes curvos.

Proyecto Final de Graduación -Ingeniería Civil -San José, Costa Rica.

S.V., Salazar G., 2016.

v, 91, [77]h, ils. col. – 20 refs.

Los puentes con curvatura en planta se han construido normalmente en zonas donde se requieren geometrías complejas y se tienen derechos de vía limitados, tal es el caso de las intersecciones en zonas urbanas. Su comportamiento difiere al de un puente recto, lo cual implica que en su diseño estructural y sísmico se deben tomar en cuenta aspectos tales como la excentricidad de las cargas.

Sin embargo, su análisis se puede simplificar siempre y cuando se satisfagan las hipótesis de regularidad establecidas por AASHTO (por sus siglas en inglés, American Association of Highway and Transportation Officials), en las Especificaciones AASHTO para el Diseño de Puentes mediante la metodología LRFD (2014; 2015).

Ante la posibilidad de simplificar el modelaje del puente curvo y debido a la creciente construcción de estas estructuras en el país, el objetivo principal de esta investigación es presentar los resultados obtenidos de la comparación de la respuesta sísmica de puentes con curvatura en planta respecto a la respuesta sísmica de puentes rectos. Dichos valores pueden servir de referencia para todo aquel ingeniero que desee modelar un puente con curvatura en planta como un puente recto.

Adicionalmente, en esta investigación se emplean los espectros de diseño que se especifican en los Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes de Costa Rica (2013).

Como resultados se presenta gráficamente la comparación de la respuesta sísmica de los puentes curvos respecto a los puentes rectos cuando se varía: el ángulo de curvatura en planta, la relación de longitud entre claros adyacentes, el número de claros y la relación de rigidez entre pilas adyacentes. También se presentan los periodos y desplazamientos de estas estructuras. Todos los datos se agrupan según la dirección en la que se aplica el sismo (X, Y).

PUNTES CON CURVATURA EN PLANTA, CRITERIOS DE REGULARIDAD SEGÚN AASHTO LRFD, RESPUESTA SÍSMICA.

Ing. Carlos Fernández Chaves, MSc.

Escuela de Ingeniería Civil

ABSTRACT

Salazar Gamboa, Sigrid Verónica

Implication of geometry in the seismic response of curved bridges.

Graduation Project -Civil Engineering -San Jose, Costa Rica

S.V., Salazar G., 2016.

v, 91, [77]h, ils. col. – 20 refs.

As a result of complicated geometrics and limited rights of way, horizontally curved bridges are being used in highway interchanges and urban expressways. Due to geometric complexities, this type of structures have a different behavior than straight bridges, such as torsional shear stresses and additional flexural stresses.

However, the American Association of Highway and Transportation Officials (AASHTO) suggests that the analysis model of a curved bridge can be that of a straight bridge, provided the bridge is regular (AASHTO Specifications for LRFD Bridge Design, 2014; 2015).

This study compares the longitudinal and traverse seismic response of equivalent straight and curved bridges to investigate that hypothesis of regularity. The regularity criteria is based on geometry, specially: 1. Superstructure curvature as measured by the subtended angle along the bridge, 2. Relative lengths of adjacent spans, and 3. Relative stiffness of adjacent bents/piers, which is also used to define the level of analysis rigor. Furthermore, results of this investigation include displacements and structural periods of the structures.

Moreover, the resulting designs of bridges are then analyzed with the response spectra established in national specifications (Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes de Costa Rica, 2013).

Ultimately, this parametric investigation presents quantitative information for the structural engineer to design the curved bridge as a straight bridge. Also, this study can be used to improve the structural design of these bridges in Costa Rica.

HORIZONTALLY CURVED BRIDGES, REGULAR BRIDGE REQUIREMENTS (AASHTO LRFD), SEISMIC RESPONSE.

Ing. Carlos Fernández Chaves, MSc.

Project Director

School of Civil Engineering

CONTENIDO

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	14
1.1. Justificación.....	14
1.2. Objetivos.....	19
1.3. Delimitación del problema.....	20
CAPÍTULO II. PUENTES CURVOS.....	22
2.1. Aspectos Generales	22
2.2. Concepto estructural de puente curvo.....	22
2.3. Comportamiento de puentes curvos ante sismo	28
CAPÍTULO III. CRITERIOS DE REGULARIDAD Y DEMANDA SÍSMICA	31
3.1. Aspectos Generales	31
3.2. Criterios de Regularidad según AASHTO.....	31
3.3. Demanda Sísmica.....	33
CAPÍTULO IV. MODELOS ESTRUCTURALES	36
4.1. Aspectos Generales	36
4.2. Modelos Estructurales.....	36
CAPÍTULO V. ANÁLISIS DE RESULTADOS	49
5.1. Aspectos Generales	49
5.2. Ejes coordenadas.....	49
5.3. Nomenclatura	50
5.4. Análisis Modal.....	51
5.5. Variación del ángulo subtendido en planta.....	52
5.6. Variación en la relación de longitudes entre claros	59
5.7. Variación en la relación de rigidez entre pilas.....	72
5.8. Respuesta modal.....	86
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	89
6.1. Conclusiones.....	89
6.2. Recomendaciones	93
BIBLIOGRAFÍA.....	94

FIGURAS

Figura II-1. Superestructura formada por un cajón de concreto o acero y losa de concreto	23
Figura II-2. Superestructura conformada por vigas de acero, diafragmas y losa de concreto.....	23
Figura II-3. Estructura típica de pilas centrales de puentes curvos.....	24
Figura II-4. Torsión en vigas curvas.....	25
Figura II-5. Componentes de esfuerzo normal.....	26
Figura II-6. Diagrama de flexión lateral de las alas	26
Figura II-7. Respuesta transversal de un puente curvo.....	29
Figura III-1. Longitud equivalente de claros.....	32
Figura III-2. Espectro de diseño para sitio de cimentación S3 y zona de amenaza sísmica Z3	34
Figura IV-1. Ejes locales según curvatura.	40
Figura IV-2. Modo de oscilación predominante para Uy. 70G, 3C, RP=3.	44
Figura IV-3. Superestructura típica.....	47
Figura IV-4. Modelo base.....	47
Figura IV-5. Modelo simplificado.....	48
Figura V-1. Transformación de ejes coordenadas.....	50
Figura V-2. Participación modal para razón dinámica de masa. Puente curvo, 30 °, 3 claros, RC=1. ..	52
Figura V-3. Participación modal para razón dinámica de masa. Puente curvo, 30 °, 3 claros, RP=1. ..	52
Figura V-4. Cortante basal longitudinal en función del ángulo. RC=1, RP=1. Sismo X.....	54
Figura V-5. Razón de cortante basal longitudinal en función del ángulo. RC=1, RP=1. Sismo X. Puente curvo respecto a puente recto equivalente.....	54
Figura V-6. U1 en función del número de claros. Sismo X, RC 1, RP 1.	55
Figura V-7. Cortante basal transversal en función del ángulo. RC=1, RP=1. Sismo Y.	56
Figura V-8. Deformada transversal del puente curvo.....	57
Figura V-9. Razón de cortante basal transversal en función del ángulo. RC=1, RP=1. Sismo X. Puente curvo respecto a puente recto equivalente.....	58
Figura V-10. U2 en función del número de claros. Sismo Y, RC 1, RP 1.	58

Figura V-11. Porcentaje de variación del cortante basal longitudinal (Puente Curvo/Puente Recto) en función de RC. Sismo X, 30°.	60
Figura V-12. Porcentaje de variación del cortante basal longitudinal (Puente Curvo/Puente Recto) en función de RC. Sismo X, 60°.	60
Figura V-13. Porcentaje de variación del cortante basal longitudinal (Puente Curvo/Puente Recto) en función de RC. Sismo X, 90°.	61
Figura V-14. Razón de cortante basal longitudinal en función de RC. Sismo X, 3C. Puente curvo respecto a puente recto equivalente.....	62
Figura V-15. Razón de cortante basal longitudinal en función de RC. Sismo X, 3C. Puente curvo respecto a puente recto con relación de claros de 1.....	63
Figura V-16. Cortante basal longitudinal en función de RC. Sismo X, 60°.....	64
Figura V-17. U1 en función del número de claros. Sismo X, RC= 2.	65
Figura V-18. U1 en función de RC. Sismo X, 5C.	65
Figura V-19. Porcentaje de variación del cortante basal transversal (Puente Curvo/ Puente Recto) en función de RC. Sismo Y, 30°.	66
Figura V-20. Porcentaje de variación del cortante basal transversal (Puente Curvo/ Puente Recto) en función de RC. Sismo Y, 60°.	67
Figura V-21. Porcentaje de variación del cortante basal transversal (Puente Curvo/ Puente Recto) en función de RC. Sismo Y, 90°.	67
Figura V-22. Razón de cortante basal transversal en función de RC. Sismo Y, 5C. Puente curvo respecto a puente recto equivalente.....	69
Figura V-23. Razón de cortante basal longitudinal en función de RC. Sismo Y, 5C. Puente curvo respecto a puente recto con relación de claros de 1.....	69
Figura V-24. Cortante Basal Transversal en función de RC. Sismo Y, 60°.....	70
Figura V-25. U1 en función del número de claros. Sismo Y, RC=2.	71
Figura V-26. U2 en función del número de claros. Sismo Y, RC=2.	71
Figura V-27. Porcentaje de variación del cortante basal longitudinal (Puente Curvo/Puente Recto) en función de RP. Sismo X, 30°.....	73
Figura V-28. Porcentaje de variación del cortante basal longitudinal (Puente Curvo/Puente Recto) en función de RP. Sismo X, 90°.....	74

Figura V-29. Razón de cortante basal longitudinal en función de RP. Sismo X. 4C. Puente curvo respecto a puente recto equivalente.....	75
Figura V-30. Razón de cortante basal longitudinal en función de RP. Sismo X. 4C. Puente curvo respecto a puente recto con una relación de rigidez de pilas de 1.....	76
Figura V-31. Distribución del cortante basal longitudinal por pilas en función de RP. Sismo X, 80°, 6C.	76
Figura V-32. Cortante Basal Longitudinal en función de RP. Sismo X, 70°.....	77
Figura V-33. U1 en función del número de claros. Sismo X, RP=3.....	78
Figura V-34. U1 en función de RP. Sismo X. 5C.	78
Figura V-35. Porcentaje de variación del cortante basal transversal (Puente Curvo/Puente Recto) en función de RP. Sismo Y, 30°.....	80
Figura V-36. Porcentaje de variación del cortante basal transversal (Puente Curvo/Puente Recto) en función de RP. Sismo Y, 90°.....	80
Figura V-37. Razón de cortante basal longitudinal en función de RP. Sismo Y. 3 claros. Puente curvo respecto a puente recto equivalente.	81
Figura V-38. Razón de cortante basal longitudinal en función de RP. Sismo Y. 3 claros. Puente curvo respecto a puente recto con relación entre pilas igual a 1.....	82
Figura V-39. Distribución del cortante basal transversal por pilas en función de RP. Sismo Y, 80°, 4C.83	
Figura V-40. Distribución del cortante basal longitudinal por pilas en función de RP. Sismo X, 80°, 4C.	83
Figura V-41. Cortante Basal Transversal en función de RP. Sismo Y, 70°.....	84
Figura V-42. U1 en función del número de claros. Sismo Y, RP=3.....	85
Figura V-43. U2 en función del número de claros. Sismo Y, RP= 3.....	85
Figura V-44. Periodo X en función del número de claros. RC=3.	86
Figura V-45. Periodo Y en función del número de claros. RC=3.	87
Figura V-46. Periodo X en función del número de claros. RP=3.	88
Figura V-47. Periodo Y en función del número de claros. RP=1.	88

CUADROS

Cuadro III-1. Requisitos de puentes regulares (Cuadro 4.7.4.3.1-2 Especificaciones AASHTO LRFD)..	32
Cuadro III-2. Clasificación y factor de importancia operacional.....	33
Cuadro III-3. Variables para la determinación del espectro de diseño	34
Cuadro III-4. Factores de modificación de la respuesta para subestructuras	35
Cuadro IV-1. Propiedades de los materiales	38
Cuadro IV-2. Variables de los modelos	39
Cuadro IV-3. Radios de curvatura	39
Cuadro IV-4. Comparación de resultados para los modelos.....	48
Cuadro V-1. Nomenclatura de figuras.....	51
Cuadro V-2. Cortante basal longitudinal según el ángulo. RC=1 y RP=1. Sismo X.....	53
Cuadro V-3. Comparación de cortante basal longitudinal según el ángulo. PC/PR equivalente. RC=1, RP=1. Sismo X.	54
Cuadro V-4. Cortante basal transversal según el ángulo. RC=1 y RP=1. Sismo Y.....	56
Cuadro V-5. Comparación de cortante basal transversal según el ángulo. PC/ PR equivalente. RC=1, RP=1. Sismo Y.	57
Cuadro V-6. Comparación del cortante basal longitudinal. PC y PR equivalente. Sismo X, 3C. RC.....	62
Cuadro V-7. Comparación del cortante basal longitudinal. PC y PR con RC=1. Sismo X, 3C. RC.....	63
Cuadro V-8. Comparación del cortante basal transversal. PC y PR equivalente. Sismo Y. 5C. RC.....	68
Cuadro V-9. Comparación del cortante basal transversal. PC y PR con RC=1. Sismo Y. 5C. RC.....	69
Cuadro V-10. Comparación del cortante basal longitudinal. PC y PR equivalente. Sismo X, 4C. RP.	75
Cuadro V-11. Comparación del cortante basal longitudinal. PC y PR con RP=1. Sismo X, 4C. RP.	75
Cuadro V-12. Comparación del cortante basal longitudinal. PC y PR equivalente. Sismo X, 3C. RP. ...	81
Cuadro V-13. Comparación del cortante basal longitudinal. PC y PR con RP=1. Sismo X, 3C. RP.	82

GLOSARIO

C= número de claros

RC= relación entre longitudes de claros

RP= relación entre rigidez de pilas

G= grados ($^{\circ}$)

L= longitud de claros (m)

R= rigidez de pilas

PC= puente curvo

PR= puente recto

V= cortante basal

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. JUSTIFICACIÓN

1.1.1. Problema Específico

Costa Rica se ubica en el Cinturón de Fuego del Pacífico, por lo que recibe la influencia de las placas del Coco y Caribe. La subducción de la placa del Coco bajo la placa Caribe, da origen a la mayoría de sismos que afectan nuestro país. Por esta razón, en el diseño de estructuras se requiere tomar en cuenta el efecto de los sismos, es decir, se requieren diseños sismo-resistentes.

Respecto a los puentes, estos son estructuras sensibles a la interacción con el suelo y en el caso de puentes largos, la respuesta sísmica puede ser menos predecible. Generalmente, el desempeño sísmico es mejor en sistemas con configuraciones regulares y con distribución uniforme de la rigidez y resistencia.

Referente a la normativa vigente, a nivel internacional existen las Especificaciones AASHTO para el Diseño de Puentes mediante la metodología LRFD¹. Mientras que en Costa Rica existe una normativa que establece las disposiciones para el diseño de puentes: los Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes de Costa Rica 2013; dicho documento hace referencia en la mayoría de las secciones a las Especificaciones AASHTO LRFD. Las modificaciones establecidas en los Lineamientos, rigen a nivel nacional sobre lo establecido por AASHTO.

Específicamente, en el caso de puentes con curvatura, las Especificaciones AASHTO LRFD permiten conservadoramente analizar este tipo de estructuras como puentes rectos. Sin embargo, debe satisfacerse, entre otros requerimientos; que el ángulo de curvatura sea menor a 20° (Cuadro III-1). Adicionalmente, esta normativa permite el empleo de métodos aproximados en el análisis estructural, no obstante, se conoce que se sobreestima el valor de

¹ LRFD: Método de diseño por factores de carga y resistencia (Load and Resistance Factor Design, por sus siglas en inglés). Se empleará la abreviación "Especificaciones AASHTO LRFD" para referirse a Especificaciones AASHTO para el Diseño de Puentes mediante la metodología LRFD (2014; 2015).

las reacciones verticales en los soportes internos (sección cóncava) de puentes curvos continuos.

Debido a los aspectos mencionados, en este trabajo se determinará la respuesta sísmica de puentes curvos ante distintas configuraciones geométricas. Mediante los resultados obtenidos se evaluará cuan acertado es modelar un puente con curvatura en planta como puente recto cuando no se satisfacen los criterios de regularidad establecidos por AASHTO.

1.1.2. Importancia

Los puentes curvos se han construido normalmente en zonas donde se requieren geometrías complejas y se tienen derechos de vía limitados, tal es el caso de las intersecciones en zonas urbanas. Su complejo comportamiento requiere la consideración de las implicaciones globales en el análisis, en el caso de Costa Rica el diseño sismo-resistente de la estructura es necesario.

A nivel nacional existen varios puentes curvos, entre los que destaca el construido sobre el río Barranca, a la altura de Sifón de San Ramón, en la Carretera Naranjo-Florencia. Su altura supera los 60 metros y el largo es de 300 metros. Este puente se muestra en el Apéndice A.

Los puentes con gran curvatura horizontal presentan particularidades respecto al efecto de la curvatura en su operación, específicamente, en la distribución de fuerzas internas en la superestructura, los cimientos y otros elementos estructurales. Por lo que, la investigación en esta área permite disminuir el costo de estas estructuras al aportar información que permita plantear mejores soluciones de diseño.

Asimismo, debido a que las vigas I de acero con curvatura en planta están sujetas a torsión y pandeo vertical, su comportamiento es en general más complejo que el de vigas rectas. Esto destaca la importancia de la exactitud del análisis estructural y sísmico empleado.

El modelaje en tres dimensiones mediante software provee precisión en el análisis de las vigas ya que incorpora la profundidad. Esta dimensión es importante en puentes curvos sometidos a desplazamientos laterales significativos en los apoyos.

Así, se afirma que por ser Costa Rica un país sísmico, la realización de este trabajo constituye un aporte en esta área y una referencia para distintas investigaciones en el diseño y construcción de puentes curvos en el país.

Además, esta investigación permitirá presentar conclusiones sobre el modelaje de puentes curvos como puentes rectos al variar los criterios de regularidad establecidos en las Especificaciones AASHTO LRFD y comparar los resultados de los modelos elaborados mediante el programa CSI Bridge.

1.1.3. Antecedentes

La primera investigación formal en puentes curvos en Estados Unidos se llevó a cabo por el Departamento de Transportes de Pensilvania (Proyecto 68-32) en 1969. En esta época los puentes curvos eran construidos sin especificaciones referentes a su diseño. Entre los primeros puentes curvos se tiene el construido en 1967 en Springfield, Massachusetts, con dos vigas caja.

En Octubre de 1969, FHWA (por sus siglas en inglés, *Federal Highway Administration*) realizó otra investigación a la cual se le denominó Proyecto CURT (por sus siglas en inglés, *Consortium of University Research Team*), a partir de la cual surgió un criterio de diseño por esfuerzos adoptado como Especificación AASHTO en 1976.

Actualmente, existen pocas referencias sobre la respuesta sísmica de puentes curvos con vigas de concreto tipo I, por lo que a continuación se exponen las principales conclusiones de algunas de las publicaciones revisadas sobre puentes curvos con vigas de acero y otras publicaciones relevantes para esta investigación.

- (Liu & Wang, 2011). China. En este artículo se estudia el empleo de apoyos de neopreno en puentes curvos continuos y se provee una referencia para el diseño de puentes con apoyos aislantes. El estudio abarca puentes continuos curvos de siete claros, con aislamiento sísmico y de una longitud total de 165 m. La curvatura de los modelos se asume como un arco circular y cuyo radio de curvatura varía entre 60 m hasta ∞ (línea recta). Entre las conclusiones más relevantes de este estudio está que el radio de curvatura tiene un efecto considerable en la respuesta sísmica de puentes curvos, especialmente en aquellos cuyos radios son menores a 200 m.
- (Linzell & Nadakuditi, 2011). Este estudio examina la influencia de la configuración de puentes curvos con vigas de acero. Estudia el efecto en las reacciones de los extremos de las vigas y las fuerzas en los miembros del diafragma durante el sismo (Zona Sísmica 2 de

AASHTO). Los modelos de elemento finito fueron creados y examinados como puentes simplemente apoyados. Se varía el radio de curvatura, la separación entre vigas, diafragmas y arriostres. Los resultados de este estudio son los siguientes: 1. El radio de curvatura tiene gran influencia en la respuesta sísmica; 2. Las reacciones en vigas internas (con el menor radio) fue muy influenciado por la variación de los parámetros; 3. La componente vertical del sismo tiene mayor efecto sobre apoyos y diafragmas; y 4. Los arriostres reducen los efectos del sismo, pero su colocación en todo el claro no provee beneficio adicional a si estos se colocan en zonas adyacentes a los apoyos.

- (Saad, Sanders, & Buckle, 2012). Este proyecto estudia el efecto de puentes con fundaciones en roca o fundaciones que permiten movimiento vertical bajo efectos de sismo. Se estudiaron 5 puentes de 3 claros, con curvatura sencilla en columnas y con diferentes curvaturas en planta, con diferentes dimensiones de pié bajo cargas de sismo en dos direcciones. Los resultados indican que las fundaciones oscilantes del puente reducen el daño en la subestructura, pero incrementan los desplazamientos de la superestructura y los bastiones.
- (Khan et al., 2012). Se evalúa la hipótesis de la Guía AASHTO LRFD en la que se establece que los puentes curvos pueden analizarse como puentes rectos mientras cumplan los criterios de regularidad. El análisis se realiza solamente para la respuesta sísmica transversal y el estudio se basa en distintas condiciones de apoyos. Se plantean las siguientes conclusiones: 1. La desviación de los resultados del puente curvo respecto al puente recto se incrementa a mayor ángulo de curvatura y menor número de claros y 2. El tipo y grado de restricción en los bastiones es un parámetro crítico e impacta los resultados: para los puentes con restricción traslacional en sentido longitudinal, el error es significativo si el puente curvo se modela como recto. Cuando no hay restricción longitudinal el impacto en la superestructura (desplazamientos) es mínimo, pero se incrementa a mayor ángulo subtendido.
- (Levi et al., 2012). El artículo resume las características de un modelo a escala de un puente con gran curvatura en planta ($\text{longitud}/\text{radio}=1,8$), creado en la Universidad de Nevada Reno. Los modelos incluyen distintas configuraciones: con y sin conectores de cortante en los bastiones, con y sin carga viva, con y sin sistemas de amortiguamiento sísmico y con y sin interacción en los bastiones. El estudio mostró que el aislamiento

sísmico, el aislamiento híbrido, la interacción con bastiones y el balanceo de las pilas reduce el nivel de daño en las pilas al variar los grados de curvatura, específicamente cuando se compara respecto al comportamiento de un puente convencional. Las cargas vivas fueron beneficiosas en este puente en particular, pero esto disminuye con el incremento de la aceleración del suelo por sismo.

- (Wibowo, Sanford, & Sanders, 2013). Las observaciones de este trabajo experimental muestran que la presencia de cargas vivas benefician el desempeño de los puentes durante sismo, reduciendo la respuesta dinámica. Este fenómeno se puede explicar así: los vehículos actúan como un conjunto de masas amortiguadoras no lineales resonantes, las cuales son efectivas para controlar los efectos del viento en edificios. Los resultados se cuantifican mediante el análisis de desplazamientos de columnas, cortante en bastiones y grado de agrietamiento del concreto en las zonas de rotulas plásticas. El efecto beneficioso de las cargas vivas disminuye cuando se incrementa la amplitud de vibración. Se emplea SAP 2000 para el análisis de los modelos.
- (Wilson, Mahmoud, & Chen, 2014). USA. Este artículo analiza los efectos combinados de sesgo y curvatura en el comportamiento sísmico de puentes de concreto reforzado. Se estudian 8 configuraciones de puentes sujetas a diferentes grados de sesgo y curvatura, con un sismo entre bajo y moderado característico de la región montañosa oeste de California. Entre sus conclusiones destaca que, el sesgo y curvatura presentes en un puente tienen un efecto significativo en el desempeño sísmico del puente. También, se profundiza en las direcciones de carga y el tipo de subestructura.

Adicionalmente existen dos trabajos de graduación para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica que pueden ser relevantes para la realización de esta investigación:

- (Solís, 2010). En esta investigación se evalúa mediante el modelaje en el programa SAP 2000 v.14, el comportamiento sísmico de puentes sesgados de un claro y con apoyos parcialmente restringidos. Se varían parámetros geométricos que influyen en la respuesta sísmica de este tipo de puentes. Los resultados indican que la respuesta sísmica depende del ancho y largo de la superestructura, la altura del puente, la rigidez de los bastiones y el ángulo de sesgo.

- (Grant, 2011). Se estudia la respuesta sísmica de puentes sesgados de dos claros con libertad de movimiento en los bastiones mediante el modelaje en SAP 2000 v.14, variando parámetros significativos. Se concluye que los puentes sesgados tienen una respuesta sísmica compleja afectada por el largo de los claros, el ángulo de sesgo y la combinación de sismo aplicada. Conforme aumenta el ángulo de sesgo incrementa la respuesta sísmica del puente.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

Determinar las implicaciones de la variación de parámetros geométricos en la respuesta sísmica de puentes curvos.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Realizar el modelaje de las distintas configuraciones geométricas de puentes curvos, mediante el software CSI Bridge.
- Verificar la hipótesis de regularidad establecida por AASHTO (Artículo 4.7.4.3 de las Especificaciones AASHTO LRFD) para el modelaje de puentes curvos como puentes rectos.
- Determinar el efecto de variar el ángulo de curvatura subtendido en planta en la respuesta sísmica de puentes curvos.
- Determinar el efecto de variar la relación de longitud entre claros adyacentes en la respuesta sísmica de puentes curvos.
- Determinar el efecto de variar la relación de rigidez entre pilas adyacentes en la respuesta sísmica de un puente curvo.

1.3.DELIMITACION DEL PROBLEMA

1.3.1. Alcance

El alcance de este proyecto se fundamenta en los siguientes aspectos:

- Se cuantificará gráficamente el efecto de variar los siguientes parámetros: ángulo subtendido en planta (radio de curvatura), relación de longitudes entre claros adyacentes, cantidad de claros y relación de rigidez entre pilas adyacentes, en puentes curvos. Para esto se emplea el programa CSI Bridge y se generan modelos analíticos que permitan determinar la respuesta sísmica de estas estructuras.
- Se compararán los resultados obtenidos al modelar los puentes curvos como puentes rectos, según la sección 4.7.4.3 de las Especificaciones AASHTO LRFD. La comparación se realizará contrastando los resultados de los modelos con curvatura contra modelos de puentes rectos, manteniendo constante el resto de variables geométricas.
- Los resultados del análisis sísmico corresponderán a desplazamientos de la estructura, fuerzas internas y deformaciones en subestructura, los cuales permiten determinar la influencia de cada uno de estos parámetros.
- Los puentes curvos modelados son de concreto y la superestructura está constituida por vigas I. Este proyecto no incluye el comportamiento de vigas tipo cajón o superestructuras tipo armadura, debido a que su respuesta sísmica ha sido evaluada en distintas investigaciones.

1.3.2. Limitaciones

A continuación se enumeran las limitaciones referentes al tema en estudio:

- En este proyecto no se considera el sesgo en puentes curvos. Sin embargo, se consultan fuentes bibliográficas sobre este efecto tanto para puentes rectos como curvos. En este aspecto se toma como referencia los Trabajos Finales de Graduación de Grant (2011) y Solís (2010).
- La aceleración vertical por sismo no se considera en esta investigación. No obstante, se consultan artículos sobre este aspecto, tales como el de (Williams & Godden, 1976).

- El análisis dinámico considerará solamente los efectos debidos al sismo, lo cual implica que se consideran las cargas permanentes producto del peso propio de los elementos. Se excluyen del análisis las cargas vivas que contempla la metodología LRFD, es decir, el efecto dinámico y estático del camión de diseño (HL-93, legal o permitido) y el carril de diseño. Las cargas vivas vehiculares no se encuentran en fase con los puentes durante el sismo, por lo tanto se pueden excluir del análisis cuando se requiera determinar los desplazamientos últimos y la ductilidad requerida o bien emplear un factor de 0,50 para carga viva, el cual implica una baja probabilidad de ocurrencia de la máxima carga viva vehicular y el sismo (sección 3.4 de las Especificaciones AASHTO LRFD).
- Se desprecian los efectos por viento y cambios de temperatura, con el objetivo de obtener resultados que permitan caracterizar la respuesta sísmica de puentes curvos ante la variación de los parámetros geométricos.

CAPÍTULO II. PUENTES CURVOS

2.1.ASPECTOS GENERALES

Los puentes son elementos estructurales que se utilizan para comunicar dos sitios que se encuentran apartados por algún obstáculo, tal como lo es una discontinuidad en el terreno o un río. Son de gran importancia porque significan una facilidad de acceso a diferentes zonas y sirven para acortar tiempos de viaje.

El diseño de los puentes está sujeto a requerimientos funcionales y en zonas sísmicas a requerimientos por sismo. Generalmente se prefiere un puente con longitudes regulares de claros y altura de pilas uniformes. Además, los puentes simétricos (sin efectos de torsión) presentan un mejor comportamiento ante sismo, ya que son capaces de mantener su integridad estructural después del evento sísmico.

En este capítulo se describe el comportamiento estructural de los puentes curvos ante cargas permanentes, y por lo tanto, el de vigas tipo I con curvatura horizontal. Asimismo, se describe el comportamiento sísmico de puentes curvos.

2.2.CONCEPTO ESTRUCTURAL DE PUENTE CURVO

2.2.1. Superestructura

Generalmente los puentes curvos horizontales con uno o dos carriles, poseen alguna de las siguientes configuraciones en su superestructura (González, Villarreal, & Martines, 2007):

- a. Sistema conformado por un cajón de concreto o acero, con losa de concreto como tablero (Figura II-1). Este tipo de superestructura posee gran rigidez torsional, mientras no se produzca agrietamiento en el cajón de concreto (Figura II-1.a) y en el caso de puentes de acero, mientras se coloquen diafragmas intermedios que permitan mantener la geometría del cajón (Figura II-1.b).

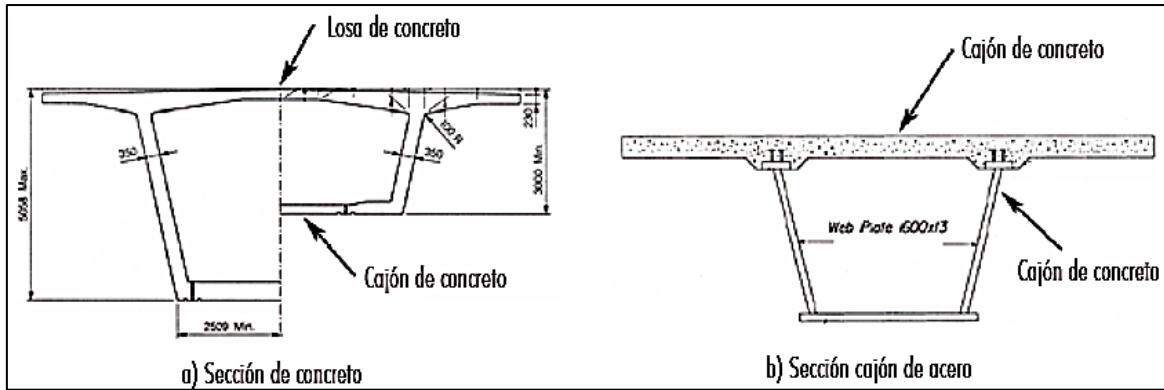


Figura II-1. Superestructura formada por un cajón de concreto o acero y losa de concreto

Fuente: (González et al., 2007)

- b. Sistema con base en vigas curvas de acero/concreto y losa de concreto como tablero (Figura II-2). En el caso de las vigas curvas de acero estas tienen baja rigidez torsional individual y la estabilidad de las mismas requiere que estén conectadas entre sí mediante diafragmas transversales, esto aumenta la rigidez torsional del sistema.

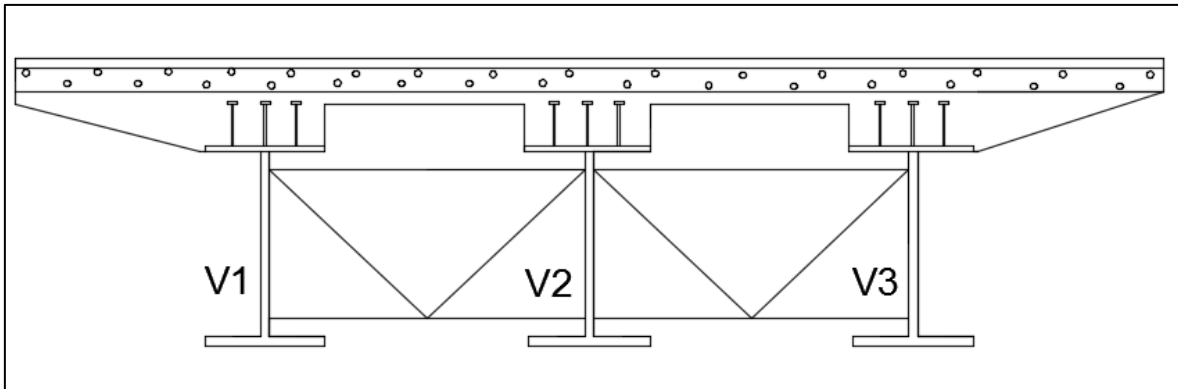


Figura II-2. Superestructura conformada por vigas de acero, diafragmas y losa de concreto.

Fuente: (Jung & White, 2011)

Modificado: Salazar, 2016

2.2.2. Subestructura

Usualmente la subestructura de un puente curvo de uno o dos carriles posee una columna central (de sección rectangular, circular u ovalada), que se conecta rígidamente a una viga cabezal. Sobre el cabezal se apoyan las vigas de la superestructura. González et al. (2007)

un eje recto imaginario que une ambos apoyos de la viga, tal como se muestra en Figura II-4. Esta excentricidad junto con la carga permanente produce un momento torsional que varía longitudinalmente a lo largo del arco de la viga.

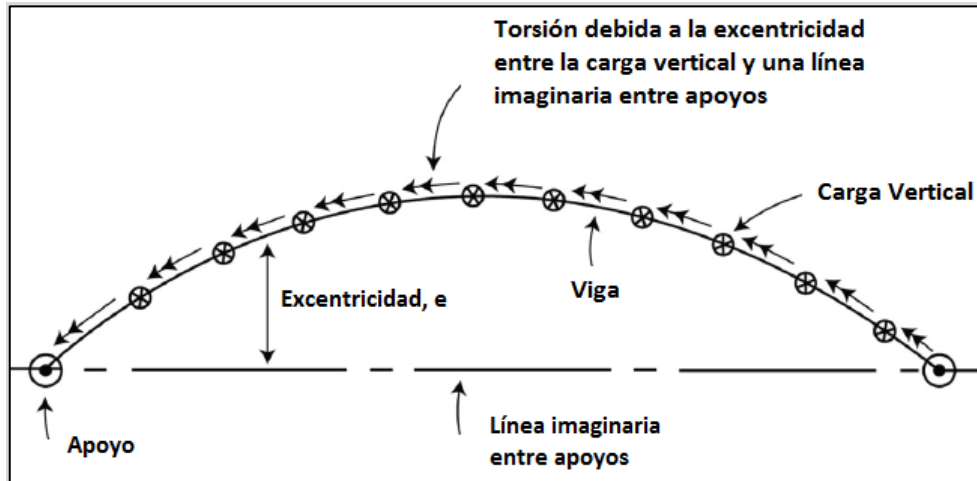


Figura II-4. Torsión en vigas curvas

Fuente: (Chavel, 2008)

Modificado: Salazar, 2016

En vigas curvas de acero la curvatura produce torsión y los soportes laterales generan torsión que no se distribuye uniformemente. Es por esta razón, que las vigas curvas de acero requieren soportes laterales para garantizar la estabilidad, mientras que las vigas rectas de acero solo requieren soporte lateral contra la flexión. (Hall, Grubb, & Yoo, 1999).

En el caso de vigas I de acero, a estas se les denomina *secciones abiertas*, esto denota que poseen poca resistencia a la torsión y deben ser arriostradas lateralmente a ciertos intervalos. La distribución no uniforme del efecto de torsión produce grandes esfuerzos en las alas de las vigas de acero.

Hall et al. (1999) describen que el esfuerzo normal en vigas curvas de acero debido a las cargas en un puente curvo, se divide en cuatro componentes básicas, estas se aprecian en la Figura II-5. Las tres primeras componentes se originan por efectos de la flexión vertical y la cuarta componente es producto de la flexión lateral por distribución no uniforme de la torsión.

La componente 1 es el momento generado por la fuerza vertical aplicada directamente en el centro de cortante (alma) de la viga de acero. La componente 2 es el momento que se origina por las fuerzas de restitución en los elementos conectores entre vigas. La componente 3

representa la porción del esfuerzo longitudinal en las alas debido a la curvatura horizontal y por lo tanto, por la excentricidad del centro de gravedad respecto al eje de carga. Y por último, la componente 4 corresponde a la flexión lateral en las alas que produce esfuerzos en las mismas cuando las vigas experimentan efectos de torsión no uniforme, tal como se muestra en la Figura II-6.

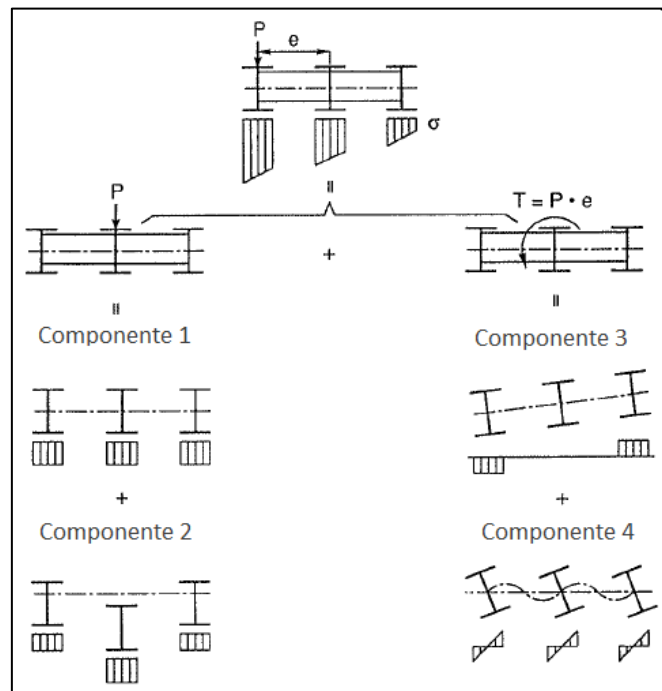


Figura II-5. Componentes de esfuerzo normal

Fuente: (Hall et al., 1999)

Modificado: Salazar, 2016

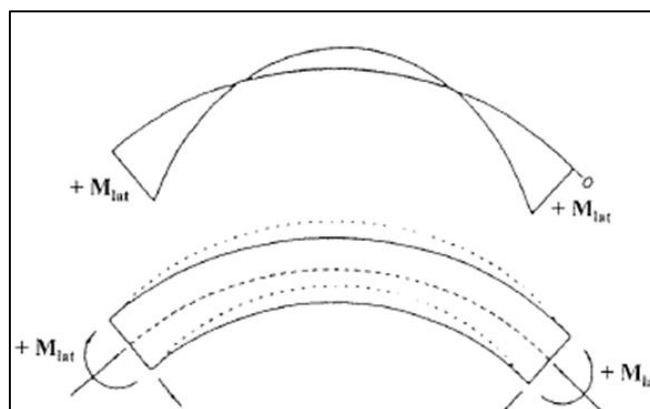


Figura II-6. Diagrama de flexión lateral de las alas

Fuente: (Hall et al., 1999)

2.2.4. Diseño y respuesta general de un puente con vigas curvas

El aspecto más complicado de puentes con curvatura son los movimientos torsionales y laterales que experimentan las vigas. Sin embargo, existen otros aspectos que se deben tomar en cuenta, tales como: la interacción entre vigas adyacentes y el diafragma, y la conexión entre dichos elementos estructurales.

Los diafragmas en puentes curvos son miembros primarios de carga, diseñados para transferir las fuerzas laterales entre vigas y reducir los esfuerzos en vigas curvas. Estos elementos transfieren un gran porcentaje de carga a las vigas externas en un sistema de vigas curvas, lo cual significa que cuando el sistema de vigas rota y se flexiona como una unidad, la torsión y el pandeo de las vigas externas se incrementa, mientras que las vigas internas sufren una menor demanda.

El determinar la interacción entre vigas con curvatura en un puente con arriostramiento lateral, es más importante que en vigas rectas en las que las cargas son distribuidas uniformemente. Cuando las vigas externas del sistema fallan o comienzan a fluir, debido a los esfuerzos torsionales y/o flexores; su rigidez se reduce y produce que los momentos en las vigas internas se incrementen rápidamente. Las vigas internas no son capaces de transmitir las cargas adicionales a través del diafragma a las vigas externas y se puede producir la falla.

Adicionalmente, es importante determinar la interacción entre el tablero de concreto y las vigas, debido a que la acción compuesta de la superestructura permite reducir los movimientos torsionales y laterales originados en el sistema de vigas curvas. La sección compuesta provee resistencia a la compresión en el tablero de concreto y permite que los momentos flexores en el sentido longitudinal no ocurran en la losa de concreto (Lydzinski & Baber, 2008).

Respecto a los apoyos, estos deben diseñarse con especial cuidado. Debido a que en puentes con gran curvatura la distribución de las cargas permanentes es mayor en la zona externa de estas estructuras (radio externo). En el caso de puentes con vigas de concreto pretensado, este fenómeno produce que las reacciones en apoyos internos sean pequeñas, de modo que los efectos del pretensado o la distribución de la carga viva, ocasionan que las reacciones disminuyan y el apoyo superior se eleve. Un aumento en la carga que soportan los apoyos externos se asocia con la disminución de carga en los apoyos internos. (Klikowicz, Salamak, Pradelok, & Lazinsky, 2013).

2.3.COMPORTAMIENTO DE PUENTES CURVOS ANTE SISMO

La filosofía de diseño estructural para la mayoría de condiciones de carga (gravitacionales, vivas, de viento o de sismo) es que el sistema estructural, incluyendo conexiones; resistan las cargas en rango elástico. En el caso del diseño sísmico la filosofía consiste en que aquellos sismos severos en que se supera o iguala el sismo de diseño, se conserve la integridad estructural de la estructura sin colapsar, pero con daños estructurales menores y daños no estructurales.

Aunque, los puentes curvos son estructuras cuya construcción se ha incrementado con los años, el conocimiento sobre su comportamiento real ante cargas de sismo está en investigación y generalmente se adoptan criterios conservadores en cuanto a su modelaje.

Los puentes curvos con longitudes variables de claros y distintas alturas de pilas experimentan demandas desiguales en pilas, debido a su irregularidad estructural. Las pilas de poca altura resisten fuerzas inerciales mayores que las que resisten las pilas de mayor altura.

Priestley y Calvi (1996) señalan que si se aumenta la resistencia de las pilas de menor altura mediante un incremento del acero de refuerzo longitudinal, podría ser imposible crear un sistema sísmicamente resistente en el que todas las pilas alcancen la resistencia de diseño en el mismo nivel de excitación. Mientras que, si se les asigna la misma sección transversal y acero de refuerzo a todas las pilas, las de menor altura podrían estar sujetas a grandes demandas de ductilidad.

La Figura II-7 muestra el detalle de la sección transversal de un puente curvo. La curvatura produce fuerzas axiales de sismo en las columnas, las cuales pueden generar problemas estructurales en las juntas mecánicas y producir efectos de torsión en la superestructura, la torsión a su vez produce momentos en las columnas.

La falla sucede cuando la capacidad estructural de las columnas se excede o el máximo desplazamiento del tablero en los bastiones excede la longitud de asiento, para un análisis por desplazamientos.

Según Pla-Junca (2010), en el caso de puentes con curvatura en planta, la dirección principal es la paralela a un eje aproximadamente tangente al arco definido por el tablero en su punto

central. Mientras que en puentes rectos dicha dirección se asocia con el eje longitudinal del puente.

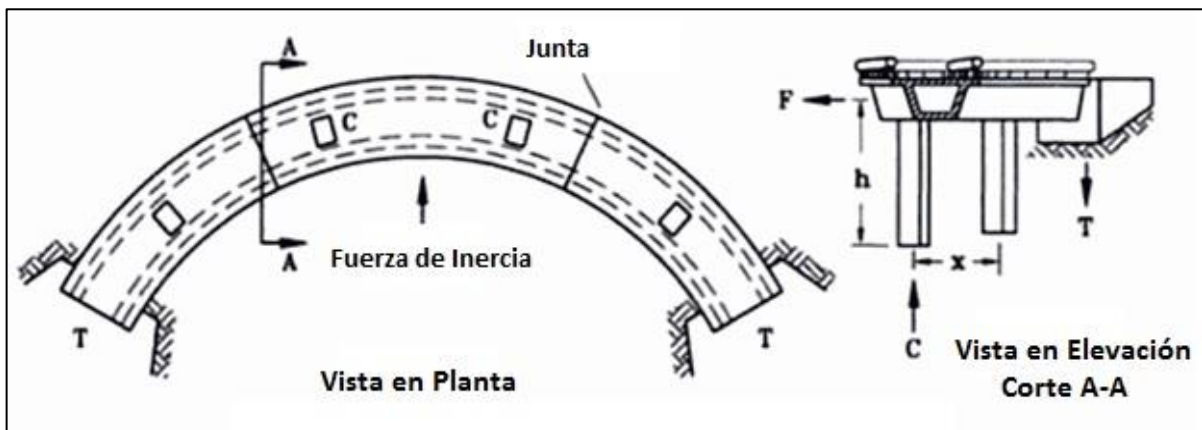


Figura II-7. Respuesta transversal de un puente curvo

Fuente: (Priestley & Calvi, 1996)

Modificado: Salazar, 2016

Méndez, Hayashikawa y Gil (2009) concluyen que ante solicitaciones sísmicas, en puentes con vigas tipo I de acero y con curvatura horizontal, conforme decrece el radio de curvatura aumenta la vulnerabilidad de daño residual en las uniones de la estructura y de efectos de golpeteo entre vigas debido a vibraciones fuera de fase de los claros del puente. Adicionalmente, el que se exceda la longitud de asiento mínima en apoyos se asocia con grandes rotaciones de la superestructura en las vigas externas, produciendo el desacople del tablero respecto a los apoyos.

Igualmente, para evitar efectos de golpeteo durante la respuesta sísmica de puentes ante efectos desacoplados, Priestley y Calvi (1996) recomiendan que se debe proveer suficiente longitud entre la columna y el extremo del puente. Tal recomendación es especialmente significativa en el caso de puentes curvos cuya superestructura esta simplemente apoyada sobre los bastiones.

En general, ante sismo los puentes con curvatura son susceptibles al desacople del tablero respecto a los apoyos, al daño tangencial de las uniones, a efectos de golpeteo, así como considerables desplazamientos y rotaciones de la superestructura. Se destaca que estos efectos

dependen en gran medida del grado de curvatura, la configuración de los bastiones y el tipo de suelo (Wilson, 2013).

Un caso particular es aquel en que los puentes poseen apoyos de neopreno, ya que estos elementos se convierten en parte del sistema y participan en la disipación de energía. El resultado es poder diseñar el puente curvo para una deformación de fluencia menor, debido a que estos apoyos permiten que el grado de disipación de energía se incremente y con esto se disminuye la deformación en rango plástico que podría sufrir el puente.

Específicamente, cuando la duración del sismo se prolonga o cuando el periodo natural de la estructura con disipadores de energía entra en resonancia, la respuesta sísmica de la estructura se incrementa. Para puentes con estos dispositivos, radios de curvatura menores a 200 m tienen una influencia importante en la respuesta sísmica de puentes curvos continuos (Liu & Wang, 2011).

Similar a los puentes con sesgo, la configuración de los puentes curvos induce una respuesta estructural ante sismo que es compleja y difícil de predecir. Por esta razón, uno de los objetivos de esta investigación es estudiar la respuesta sísmica de puentes curvos ante distintas configuraciones geométricas. Las conclusiones al respecto y que complementan la información existente se presentan en el CAPÍTULO VI.

CAPÍTULO III. CRITERIOS DE REGULARIDAD Y DEMANDA SÍSMICA

3.1. ASPECTOS GENERALES

La respuesta sísmica de los puentes es generalmente mejor en sistemas con configuraciones regulares y distribución uniforme de rigidez y resistencia. Por consiguiente, configuraciones geométricas con sesgo, distintas alturas de pilas y superestructuras con curvatura afectan la regularidad del puente.

Específicamente, para puentes curvos las Especificaciones AASHTO LRFD establecen criterios de regularidad, los cuales en caso de cumplirse permiten analizar un puente curvo como puente recto. Respecto a la normativa nacional, los Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes establecen disposiciones para definir la demanda sísmica.

Ambos criterios permiten caracterizar los modelos de puentes elaborados en esta investigación y los cuales se describen en el CAPÍTULO IV. En tanto que, en este capítulo se presentan los criterios antes señalados.

3.2. CRITERIOS DE REGULARIDAD SEGÚN AASHTO

Las Especificaciones AASHTO LRFD consideran que un puente regular es aquel que posee menos de 7 claros, no presenta cambios abruptos o inusuales en peso, rigidez o geometría. Es decir, se satisfacen los requerimientos del Cuadro III-1.

Además, la Guía de Especificaciones AASHTO para el Diseño Sísmico de Puentes según la metodología LRFD (2014; 2015) que define un análisis por desplazamientos, adopta un criterio conservador para el ángulo subtendido en planta de 30° . En esta investigación también se adopta un ángulo subtendido de 30° como criterio de regularidad y el análisis corresponde a uno por resistencia.

Para aquellos puentes con curvatura en planta que cumplan con las disposiciones de regularidad (Cuadro III-1), es posible simplificar su análisis al considerar la estructura como un puente recto. Se debe cumplir adicionalmente que la longitud del claro del puente recto equivalente sea igual a la longitud del arco del puente curvo, tal como se observa en la Figura III-1.

Cuadro III-1. Requisitos de puentes regulares (Cuadro 4.7.4.3.1-2 Especificaciones AASHTO LRFD)

Parámetro	Valor				
	2	3	4	5	6
Número de claros	2	3	4	5	6
Ángulo máximo subtendido ^A (puente curvo)	90°	90°	90°	90°	90°
Relación máxima de longitudes entre claros	3 ^B	2	2	1,5	1,5
Relación máxima de rigidez de pilas entre claros (se excluyen los bastiones)	-	4	4	3	2

Nota: Todas las relaciones se expresan en términos del valor más pequeño.

^A Los puentes conformados por múltiples claros deben ser considerados como "irregulares" si el ángulo subtendido en planta es mayor a 20°.

^B Para modelar un puente curvo de dos claros como puente recto, la máxima relación de longitud entre claros no debe exceder de 2.

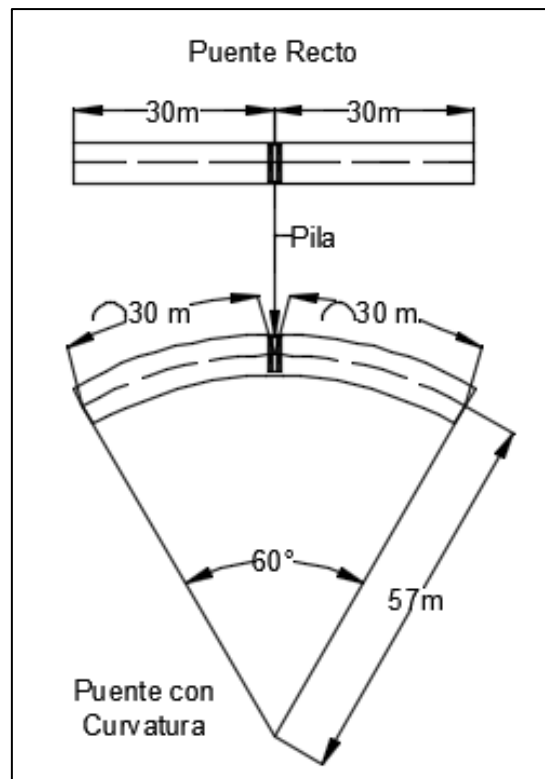


Figura III-1. Longitud equivalente de claros.

3.3. DEMANDA SÍSMICA

Los Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes de Costa Rica (2013) permiten establecer requisitos mínimos para un adecuado desempeño sísmico de los puentes a nivel nacional. Estas disposiciones siguen la metodología de diseño por factores de carga y resistencia (LRFD, por sus siglas en inglés).

La demanda sísmica se caracteriza mediante un espectro de respuesta de aceleraciones, el cual depende de la amenaza sísmica y las características geotécnicas del suelo donde se emplazará la obra.

3.3.1. Clasificación operacional

El Cuadro III-2 muestra la clasificación y el factor de importancia operacional que aplica para puentes en Costa Rica, este parámetro se asigna según el uso de la estructura. Se selecciona una importancia $I=1$, debido a que la mayoría de puentes en Costa Rica son esenciales. Según la sección 3.2 de los Lineamientos (2013) estas estructuras se construyen a lo largo de rutas primarias y secundarias con un tránsito promedio diario mayor a 5000 vehículos.

Cuadro III-2. Clasificación y factor de importancia operacional

Clasificación de la importancia	Descripción	Factor de importancia operacional
Puentes críticos	Puentes que se requiere estén en funcionamiento después de un sismo y son fundamentales para la actividad económica a nivel regional o nacional	1,25
Puentes esenciales	Puentes a lo largo de rutas primarias y secundarias con un tránsito promedio diario (TPD) > 5000 vehículos que no clasifican como puentes críticos	1,00
Puentes convencionales	Puentes a lo largo de rutas primarias, secundarias y terciarias y caminos cantonales que no cumplen con los requisitos para puentes críticos y esenciales	1,00
Otros puentes	Puentes temporales (vida útil menor o igual a 3 años) Puentes que brindan acceso a propiedades privadas o a lo largo de caminos dentro de dichas propiedades	0,80

Fuente: (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIAC), 2013)

Modificado por: Salazar, 2016

3.3.2. Espectro de diseño

La determinación del espectro de diseño se puede consultar en el Apéndice B y se siguen las disposiciones de los Lineamientos (2013). El Cuadro III-3 muestra los aspectos tomados en cuenta y la Figura III-2 la variación de S_a (forma espectral de pseudoaceleración expresada como fracción de g) en función del periodo T.

Cuadro III-3. Variables para la determinación del espectro de diseño

Variable		Valor
Tipo de sitio de cimentación	S	3
Zona sísmica	Z	III
Importancia	I	1

Se selecciona ZIII debido a que abarca la mayoría del territorio nacional, especialmente el Gran Área Metropolitana (GAM).

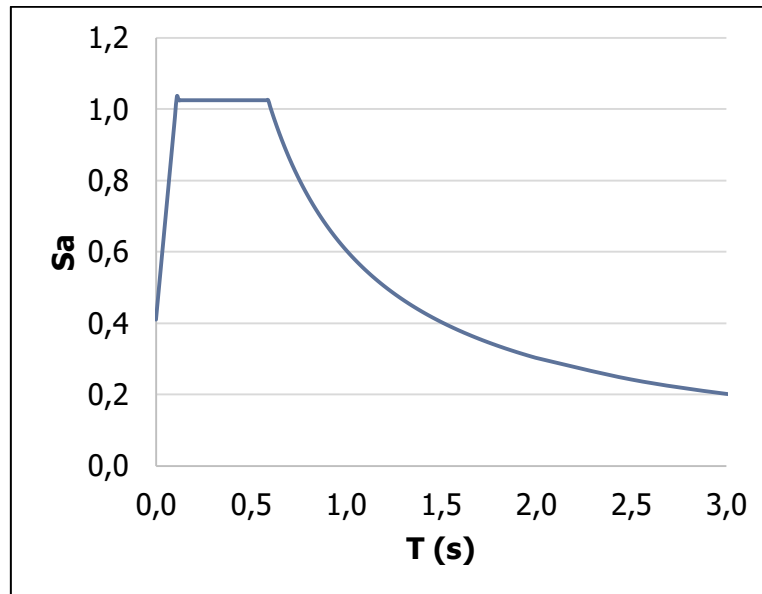


Figura III-2. Espectro de diseño para sitio de cimentación S3 y zona de amenaza sísmica Z3

Casos de carga sísmica

Para determinar los efectos de las fuerzas sísmicas en cada uno de los ejes principales de los miembros se considera el Caso I y II de la sección 3.10.8 de las Especificaciones AASHTO LRFD.

- Caso I: 100 % del valor absoluto de las fuerzas sísmicas y momentos en los elementos, obtenidos del análisis en la dirección longitudinal y 30 % del valor absoluto de las fuerzas sísmicas y momentos correspondientes al análisis en la dirección transversal.
- Caso II: 100 % del valor absoluto de las fuerzas sísmicas y momentos en los elementos, obtenidos del análisis en la dirección transversal y 30 % del valor absoluto de las fuerzas sísmicas y momentos correspondientes al análisis en la dirección longitudinal.

3.3.3. Factores de modificación de la respuesta

Según la importancia del sismo, los Lineamientos (2013) establecen factores de modificación de la respuesta para conexiones y subestructuras según la importancia operacional del puente, estos se muestran en el Cuadro III-4.

Cuadro III-4. Factores de modificación de la respuesta para subestructuras

Tipo de Subestructura	Categoría Operacional		
	Crítico	Esencial	Convencional y Otros
Pilas de muro- dimensión larga	1,5	1,5	2,0
Pilas de columna- pilote de concreto reforzado			
Columna- Pilote vertical	1,5	2,0	3,0
Columna- Pilote inclinado	1,5	1,5	2,0
Pilas de columna sencilla	1,5	2,0	3,0
Pilas de columna - pilote de acero o compuestas (acero y concreto)			
Columna- Pilote vertical	1,5	3,5	5,0
Columna- Pilote inclinado	1,5	2,0	3,0
Pilas de columnas múltiples	1,5	3,5	5,0

Fuente: (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIAC), 2013)

Los resultados del análisis elástico para cada elemento (momento flexionante, fuerza cortante, entre otros) deben ser divididos por el factor de modificación de la respuesta R . Sin embargo, en esta investigación no se emplean los factores de modificación de la respuesta debido a que se emplean las razones entre los resultados para puentes curvos y puentes rectos, con lo cual estos factores se eliminan.

CAPÍTULO IV. MODELOS ESTRUCTURALES

4.1. ASPECTOS GENERALES

El análisis estructural implica la descripción del comportamiento de la estructura ante demandas de capacidad mediante un modelo matemático. La selección del modelo a emplear en el análisis permite conservar la confiabilidad de los resultados y es especialmente importante en el caso de solicitaciones dinámicas.

Un modelo estructural de un puente debe tener suficientes grados de libertad y una selección adecuada de los elementos con comportamiento lineal para obtener una respuesta representativa. El modelaje estructural incluye aspectos tales como geometría, rigidez, distribución de la masa, juntas de dilatación y elementos disipadores de energía en cimentaciones.

La distribución de la masa en el modelo estructural depende del número de elementos empleados para representar los componentes del puente. Igualmente, el modelo debe ser capaz de simular los modos de vibración de todos los elementos que contribuyen a la respuesta sísmica de la estructura.

En el presente capítulo se caracterizan los distintos elementos estructurales que conforman los puentes, así como las simplificaciones realizadas para su modelaje con el programa CSI Bridge.

4.2. MODELOS ESTRUCTURALES

Los distintos modelos estructurales analizados en esta investigación corresponden a modelos globales de la estructura, el objetivo es determinar la respuesta sísmica cuando son sometidos a la demanda sísmica correspondiente y ante distintas configuraciones geométricas. En este caso se emplea un análisis modal espectral.

Adicionalmente, las estructuras en esta investigación se discretizan como elementos finitos (FEMs, por sus siglas en inglés). Este método se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, es decir, en un gran número de elementos con las mismas características del material estructural constitutivo. Esta práctica se denomina discretización del modelo y la emplea el programa CSI Bridge.

A continuación se describen las propiedades mecánicas de las secciones, los parámetros geométricos de los puentes y se establecen las consideraciones de modelaje para los elementos que conforman la superestructura y la subestructura de los puentes.

4.2.1. Combinaciones de carga

En conformidad con la sección 3.4 de las Especificaciones AASHTO LRFD se podría emplear la combinación de carga que corresponde al estado Evento Extremo I. El estado límite Resistencia I no considera la variable sismo, por lo tanto no se emplea en esta investigación.

La Ecuación [IV-1] corresponde al estado límite Evento Extremo:

$$C_{EEI} = 1,25 DC + 1,5 DW + 1 EQ + LL$$

[IV-1]

Donde:

DW: peso permanente de superficie de rodamiento y elementos accesorios

DC: peso permanente de elementos estructurales y no estructurales

EQ: carga por sismo

LL: carga vehicular= γEQ , con $\gamma=0 - 0,5$.

Sin embargo, dado que el objetivo de esta investigación es cuantificar la respuesta sísmica de los puentes modelados, no se emplean combinaciones de carga mayoradas solamente se consideran las cargas de sismo establecidas en la sección 3.3.2. de este estudio.

4.2.2. Propiedades de las secciones

4.2.2.1. Propiedades de los elementos

Para el modelaje de las estructuras se emplea un único material, el concreto. No obstante, se asignan resistencias distintas según el elemento estructural, tal como se muestra en el Cuadro IV-1.

La razón por la que se emplea un concreto de mayor resistencia en las vigas longitudinales es debido a que se desea que la losa no tome esfuerzos de flexión en sentido longitudinal, además

que en el diseño de la superestructura como sección compuesta se desea que la carga la tomen las vigas y la transmitan a la subestructura.

Cuadro IV-1. Propiedades de los materiales

Elementos	Propiedades	Valores	Equivalencia
Losa	Material	Concreto	Concreto
	Resistencia en compresión f'_c (kg/cm ²)	280	(Ton/m ²) 2800
Viga Cabezal	Densidad γ_c (kg/m ³)	2400	(Ton/m ³) 2,4
Pilas	Módulo de Elasticidad E (kg/cm ²)	267731,2	(Ton/m ²) 2677312,1
	Relación de Poisson ν	0,20	0,20
Vigas Longitudinales	Material	Concreto	Concreto
	Resistencia en compresión f'_c (kg/cm ²)	420	(Ton/m ²) 4200
	Densidad γ_c (kg/m ³)	2400	(Ton/m ³) 2,4
	Módulo de Elasticidad E (kg/cm ²)	327902	(Ton/m ²) 3279024
	Relación de Poisson ν	0,2	0,2

Para la generación de los modelos, se consideran inicialmente las secciones mostradas en el Apéndice C. Las dimensiones se varían para el caso en que se requiera cumplir la relación máxima de rigidez de pilas adyacentes entre claros (Cuadro III-1).

4.2.2.2. Parámetros geométricos

La selección de los parámetros geométricos cuyo valor varía, se realiza tomando en cuenta las Especificaciones AASHTO LRFD, es decir, los criterios de regularidad establecidos por dicha norma, los cuales se muestran en el Cuadro III-1.

Por lo tanto, en esta investigación se modifican los valores de las siguientes variables: número de claros, ángulo máximo subtendido en planta, relación máxima de longitudes entre claros adyacentes y relación máxima de rigidez de pilas de claros adyacentes. Con base en las combinaciones de estas variables se generan 245 modelos estructurales con curvatura en planta y 50 modelos simplificados como puentes rectos. El Cuadro IV-2 presenta un resumen de las variables mencionadas anteriormente.

Los valores para el ángulo subtendido en planta se seleccionan tomando en cuenta el criterio de las Especificaciones AASHTO LRFD en el que se considera como regular un puente si el ángulo máximo es de 90°.

Cuadro IV-2. Variables de los modelos

Parámetro		Valores				
Circunferencia/ Longitud total puente	(m)	60	90	120	150	180
Ángulo subtendido	(°)	30	60	70	80	90
Longitud de claro [base]*	(m)	30				
Cantidad de claros		2	3	4	5	6
Relación de longitud de claros		1	1,5	2	3	3,5
Rigidez de pilas [base]*	(m ⁴)	0,58				
Cantidad de pilas		1	2	3	4	5
Altura de columnas [base]*	(m)	7				
Relación de rigidez pilas		1	2	3	4	

*/ Según la relación de rigidez entre pilas y de longitud de claros se modifican estos valores

El Cuadro IV-3 presenta los radios de curvatura, según la Ecuación [IV-2]. Estos valores están en función del ángulo subtendido en planta y la circunferencia del puente.

$$R = \frac{L_t}{\theta}$$

[IV-2]

Donde:

R: Radio de curvatura (m)

L_t: Circunferencia (m)

θ: Ángulo subtendido en planta (radianes)

Cuadro IV-3. Radios de curvatura

Ángulo subtendido (°)	Radio de curvatura (m)				
	Circunferencia (m)				
	60	90	120	150	180
30	114,59	171,89	229,18	286,48	343,77
60	57,30	85,94	114,59	143,24	171,89
70	49,11	73,67	98,22	122,78	147,33
80	42,97	64,46	85,94	107,43	128,92
90	38,20	57,30	76,39	95,49	114,59

Para los puentes rectos los ejes locales son los mismos que los ejes globales, mientras que para los puentes curvos, los ejes locales de los bastiones tienen un ángulo respecto al eje X global, tal como se muestra en la Figura IV-1.

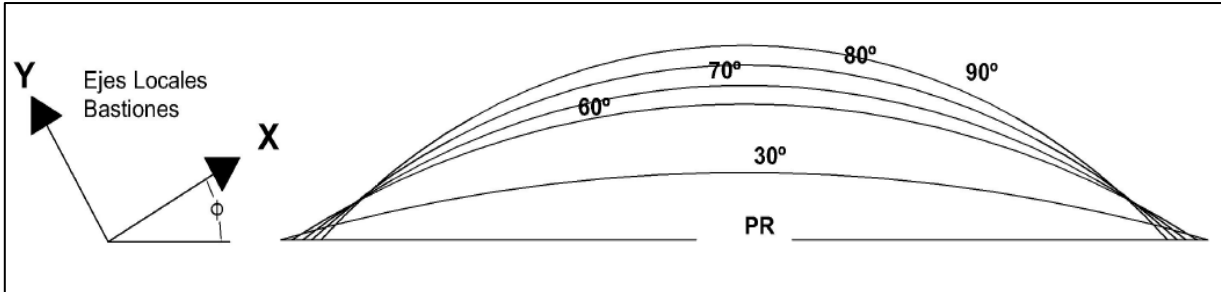


Figura IV-1. Ejes locales según curvatura.

4.2.2.3. Variación de parámetros geométricos

4.2.2.3.1. Relación de longitud entre claros

Inicialmente, se selecciona una longitud de 30 m para los puentes cuya relación entre claros tendrá un valor de 1, es decir, cumple con el criterio de regularidad respectivo. A partir de esta longitud y según la cantidad de claros se fijan los 5 valores de circunferencia mostrados en el Cuadro IV-2.

La determinación de las longitudes de los claros según la relación máxima de longitud de claros, se realiza de la siguiente forma: por ejemplo, para un puente recto con 2 claros ($L_1=L_2$), una relación de longitud de claros adyacentes de 1,5 (n_2) y una longitud total (L_t) de 90 m, se emplea la Ecuación [IV-3]. Esta ecuación se puede generalizar para la cantidad de claros que se consideren.

$$n_1 L_1 + n_2 L_2 = L_t \quad [IV-3]$$

Sustituyendo y despejando,

$$1 \cdot L_1 + 1,5 \cdot L_1 = 90$$

$$\therefore L_1 = \frac{90}{2,5} = 36 \text{ m}$$

$$\therefore 1,5 \cdot L_2 = 54 \text{ m}$$

En el Apéndice E se muestran todos los casos considerados para un ángulo subtendido en planta de 30°. Para este ejemplo, la relación máxima de longitud entre claros es de 1,5 así que se establecen dos casos que cumplen con el criterio de regularidad (relación de 1 y 1,5) y 3 casos adicionales (relación 2; 2,5 y 3) que exceden el criterio. Esto mismo se realiza para los distintos ángulos subtendidos en planta y cantidad de claros analizados.

4.2.2.3.2. Relación de rigidez entre pilas

La rigidez entre pilas adyacentes está determinada por la rigidez de las columnas y esta a su vez se relaciona directamente con la inercia de su sección y su altura, tal como se aprecia en la Ecuación [IV-4].

$$K = \frac{3EI}{H^3}$$

[IV-4]

Donde:

K: Rigidez de la columna rectangular (Ton/m)

E: Módulo de Elasticidad (Ton/m²)

I: Inercia (m⁴)

H: Altura de la columna rectangular (m)

Además, la inercia (I) se define como:

$$I = \frac{ab^3}{12}$$

[IV-5]

Donde:

a: Lado menor de la sección transversal

b: Lado mayor de la sección transversal

En cada caso se consideran i-1 pilas para i claros, tal como se muestra en el Cuadro IV-2. Respecto, a la relación de rigidez, en todos los casos se asigna a una(s) columna(s) las siguientes dimensiones: H₁= 7 m, a₁= 1,2 m y b₁= 4 m. El siguiente ejemplo muestra el

procedimiento que se sigue para determinar las dimensiones de las secciones de las columnas rectangulares.

Se tienen los siguientes datos para el puente: 3 claros, 2 pilas y una relación máxima de pilas de 4 (n_2).

Debido a que los únicos parámetros que varían en la Ecuación [IV-4] son la inercia y la altura de la columna rectangular, se tiene que:

$$n_1 K_1 = n_2 K_2$$

$$n_1 \frac{I_1}{H_1^3} = n_2 \frac{I_2}{H_2^3}$$

$$n_1 \frac{\frac{a_1 b_1^3}{12}}{H_1^3} = n_2 \frac{\frac{a_2 b_2^3}{12}}{H_2^3}$$

Sustituyendo los valores de la columna 1,

$$\therefore n_1 K_1 = n_1 \frac{\frac{a_1 b_1^3}{12}}{H_1^3} = 1 \cdot \frac{1,2 \text{ m} \cdot 4 \text{ m}^3}{7 \text{ m}^3} \cdot E/E = 0,01865 \text{ m} \cdot [T/m^2]/[T/m^2]$$

$$\therefore I_1 = 6,4 \text{ m}^4$$

Para la rigidez (I_2/H_2^3) de la columna 2 se tiene:

$$\therefore n_2 K_2 = 4 (0,01865 \text{ m}) = 0,0746 \text{ m}$$

Mediante la Ecuación [IV-6] se determina la sección transversal de la columna 2, para lo cual se establece una altura de 6 m y un ancho de 1,45 m (el cual no excede la dimensión de la viga cabezal). Estas últimas dimensiones se consideran constantes para el resto de modelos y se permite que el largo (b) de la columna varíe, así para este caso:

$$b_2 = \sqrt[3]{\frac{12 n_2 K_2 H_2^3}{a_2}}$$

[IV-6]

Sustituyendo,

$$\therefore b_2 = \sqrt[3]{\frac{12 (0,0746 \text{ m}) 6 \text{ m}^3}{1,45 \text{ m}}} = 5,10 \text{ m}$$

En el cálculo se puede emplear la inercia mayor o menor de la sección transversal, es indiferente cual se use porque se conserva la proporción entre las variables de la ecuación. En el Apéndice E se resumen todos los casos considerados para un ángulo subtendido en planta de 30° y una longitud de claro de 30 m cada uno (el criterio de regularidad para claros no se excede). Para este ejemplo, la relación máxima de rigidez entre pilas es de 4 así que se establecen dos casos que cumplen con el criterio de regularidad (relación de 1 y 4) y 3 casos adicionales (relación 4,5; 5 y 5,5) que exceden el criterio. Esto mismo se realiza para los distintos ángulos subtendidos en planta y número de claros analizados.

4.2.3. Modelaje estructural en CSI Bridge

Los modelos analíticos tienen como objetivo cuantificar la respuesta sísmica de los puentes en función de los desplazamientos y reacciones así como la cuantificación de las fuerzas internas y las deformaciones de los elementos.

Las Especificaciones AASHTO LRFD señalan que para puentes regulares el número de grados de libertad y el número de nodos considerados en el análisis deben ser suficientes para capturar al menos el 90 por ciento de la masa participativa en la dirección transversal y longitudinal.

Así, para el análisis modal se emplea un análisis con *eigen vectors*, mediante los cuales se determina los modos de oscilación de la estructura y la masa participativa requerida, considerando un 90 % en la dirección X y Y. La Figura IV-2 muestra un ejemplo del modo de oscilación predominante para U_y (desplazamiento en Y) del puente recto y el puente curvo.

Además, el modelaje lineal elástico debe incluir al menos tres elementos por columna flexible y cuatro elementos por claro. Mientras que para puentes irregulares o largos la masa puede no ser representativa de las fuerzas en los elementos.

Estas consideraciones se toman en cuenta en el modelaje de la superestructura y la subestructura. A partir de esto se elige el tipo de elemento que ofrece CSI Bridge y que mejor representa al elemento estructural modelado.

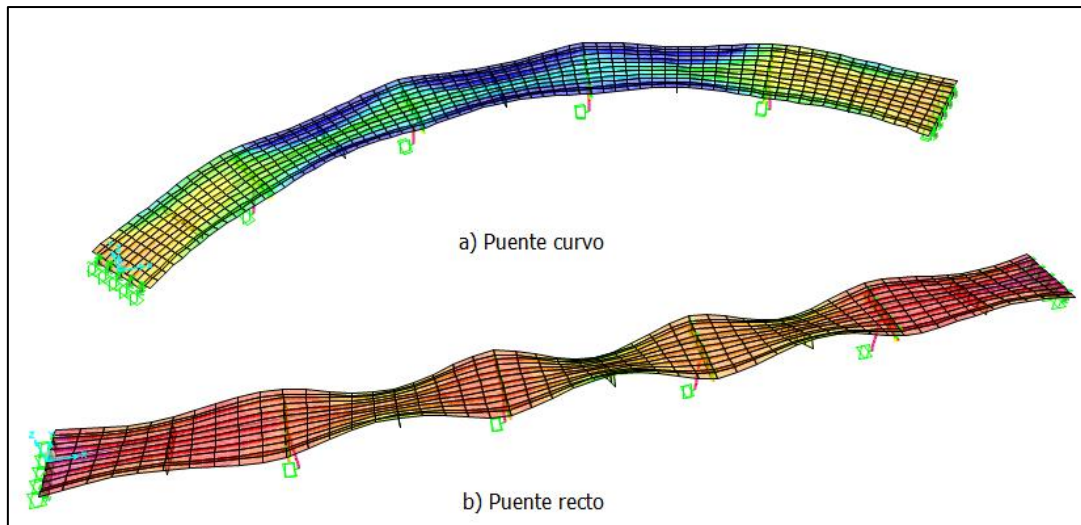


Figura IV-2. Modo de oscilación predominante para Uy. 70G, 3C, RP=3.

4.2.3.1. Superestructura

La superestructura es el elemento estructural que recibe las cargas del tránsito y de los elementos accesorios. Además, transfiere todas las cargas a lo largo del claro a los apoyos del puente y por lo tanto a la subestructura.

En esta investigación, la superestructura es compuesta, constituida por la losa de concreto, vigas tipo I de concreto con curvatura en planta y diafragmas. El modelaje se realiza mediante un modelo global.

Los modelos globales emplean elementos individuales, los cuales se clasifican según su acción estructural: en barras, membranas o sólidos. En esta investigación se emplean solamente elementos tipo barra y membrana (área), los cuales se describen a continuación:

- Elementos lineales o barra (Frame): se emplean para el modelaje de vigas, columnas y arriostres, en 3D y como objeto plano. Corresponden a líneas rectas que se conectan mediante dos nodos y con seis grados de libertad en cada extremo.
- Elementos tipo placa o membrana: es un objeto con tres o cuatro nodos, se emplean para modelar membranas, pandeo de elementos, modelaje de tableros de puentes, superficies curvas en 3D, entre otros. Los elementos tipo *área* que emplea CSI Bridge, son elementos sólidos con diafragmas rígidos, que transmiten las cargas. Equivalente a un elemento tipo membrana al que se le asigna un diafragma rígido.

Así, en la superestructura se emplean elementos tipo *Frame* para las vigas longitudinales y elemento tipo *Área* para la losa de concreto y los diafragmas. Las dimensiones se muestran en el Apéndice D.

4.2.3.2. Subestructura

La subestructura de los modelos analizados, está constituida por pilas tipo columna sencilla. Estas poseen las siguientes partes: un cuerpo central (columna rectangular), una viga cabezal (forma de martillo) y la cimentación. El detalle de este elemento estructural se muestra en el Apéndice C.

Las pilas transmiten las cargas de la superestructura hasta la cimentación y al medio soportante. Además, brindan soporte lateral, vertical y longitudinal en puntos intermedios a la superestructura, esto según el tipo de apoyo entre la subestructura y la superestructura.

Específicamente, el sistema sismorresistente de la estructura se ubica en las pilas. Y se modela bajo el supuesto pila débil superestructura fuerte, es decir, se asume que las pilas se deforman inelásticamente cuando se excede su nivel de diseño. Por esta razón, y según los Lineamientos (2013) sección 3.4, se deben emplear factores de modificación de la respuesta sísmica R . Estos factores se aplican cuando se cumplen las disposiciones de los artículos 5.10.2.2, 5.10.11 y 5.13.4.6 de las Especificaciones AASHTO LRFD.

Los factores de modificación de la respuesta R , no se emplean en esta investigación debido a que al emplear razones entre los resultados de los puentes curvos y los puentes rectos, estos valores se simplifican (R/R).

Las pilas se modelan en CSI Bridge como elementos tipo *Frame*, conservando las características geométricas propuestas para cada modelo estructural.

4.2.3.3. Uniones

Las uniones permiten describir el tipo de unión entre elementos. Se clasifican en uniones rígidas y articuladas, según el tipo de fuerzas que transmiten. Las uniones rígidas restringen todos los grados de libertad (traslaciones y rotaciones), mientras que las articulaciones restringen solamente las traslaciones, según su ubicación en el sistema estructural.

Los modelos generados mediante CSI Bridge poseen uniones entre losa de concreto y vigas longitudinales, entre vigas longitudinales y viga cabezal y entre viga cabezal y columna rectangular.

El programa asigna una longitud de separación entre el tablero y las vigas longitudinales, que corresponde a la unión entre ambos elementos.

La unión entre las vigas longitudinales y la viga cabezal, se modela mediante un elemento tipo *Link* con los grados de libertad (GDL) de las traslaciones restringidos.

En el caso de la viga cabezal y la columna, la unión se modela como rígida debido a que ambos se cuegan monólicamente. Esta unión se logra al asignar una altura de columna en el modelador, medida desde el cimiento hasta la mitad de la viga cabezal.

4.2.3.4. **Apoyos**

Los apoyos son sistemas mecánicos que transmiten las cargas verticales de la superestructura a la subestructura. Según el tipo de apoyo se permite o restringe la traslación y/o rotación.

Para el modelaje de los puentes curvos y rectos, se asignan *bearings* (tipo de elemento de CSI Bridge) en los extremos de las vigas longitudinales, es decir, en los bastiones. Estos elementos garantizan la condición de traslación en el sentido longitudinal del eje del puente, con libertad de rotar y con restricción para trasladarse transversalmente al eje del puente y en sentido vertical.

La pila, se considera que posee un empotramiento perfecto a 2 m del nivel de desplante. No se considera el esfuerzo pasivo del suelo, por lo que la pila se modela conservadoramente.

4.2.3.5. **Cargas**

Para el análisis de los modelos se considera como cargas permanentes solamente el peso propio de los elementos, esto es el peso de las vigas longitudinales, las vigas cabezales y las columnas rectangulares; y se define un ancho de carril de 3,70 m, tal como se muestra en la Figura IV-3.

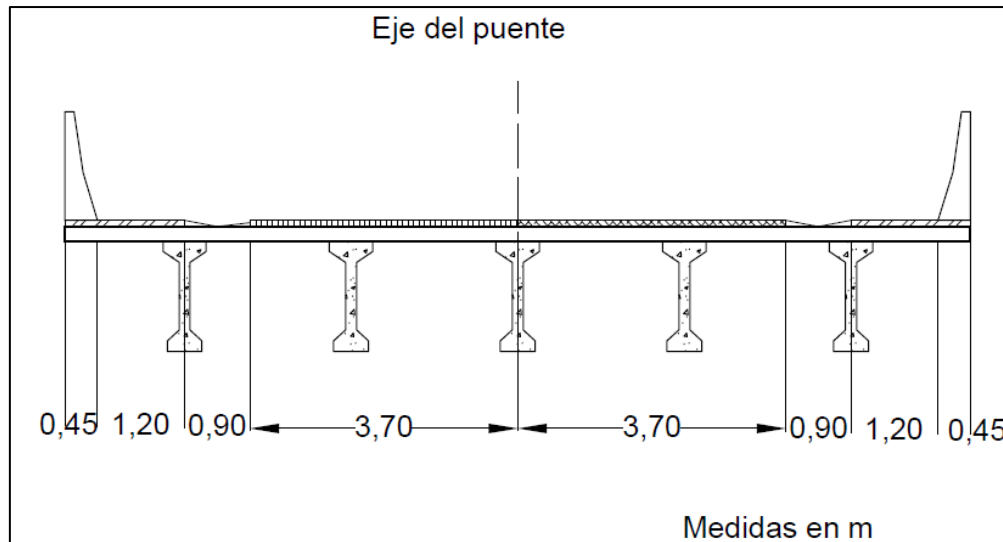


Figura IV-3. Superestructura típica

4.2.3.6. Verificación del modelo base

Se considera un modelo base, el cual corresponde a un puente recto con dos claros de 30 m cada uno (Figura IV-4). Esta superestructura posee 12,50 m de ancho y 2 carriles de 3,70 m cada uno. La pila y la viga cabezal poseen las dimensiones mostradas en el Apéndice F. La cimentación de la pila se modela como empotrada.

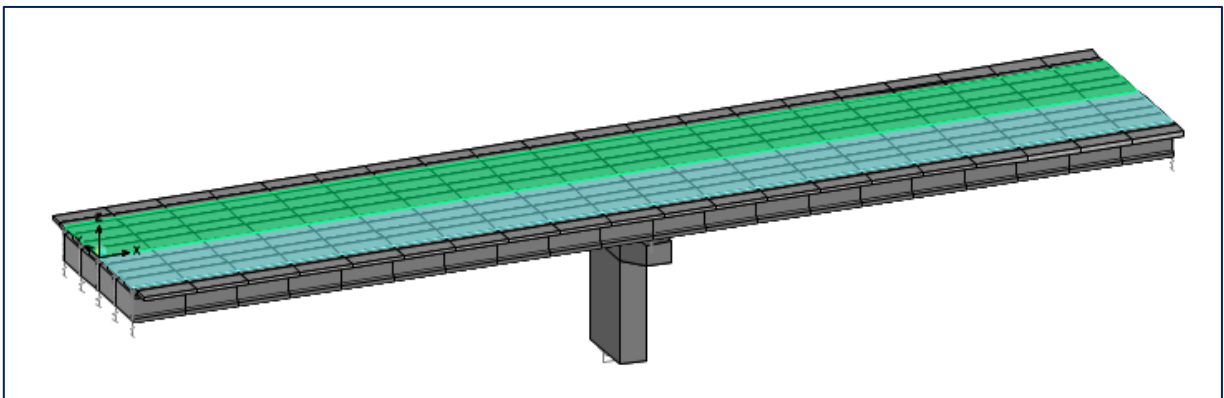


Figura IV-4. Modelo base

El objetivo de seleccionar un modelo como referencia es el de comparar los resultados iniciales obtenidos mediante el análisis realizado con CSI Bridge con los obtenidos del análisis manual.

Para el análisis se emplea el modelo simplificado de la Figura IV-5. Los extremos de la superestructura corresponden a rodillos con libertad de movimiento en el sentido longitudinal

del puente (eje del puente), con libertad para rotar en todos los ejes y restringidos los GDL que corresponden al desplazamiento transversal al eje del puente y el desplazamiento vertical. La unión entre la viga cabezal y la superestructura (vigas longitudinales) se modela como un apoyo de cuchilla, el cual restringe las traslaciones pero permite las rotaciones en todos los ejes.

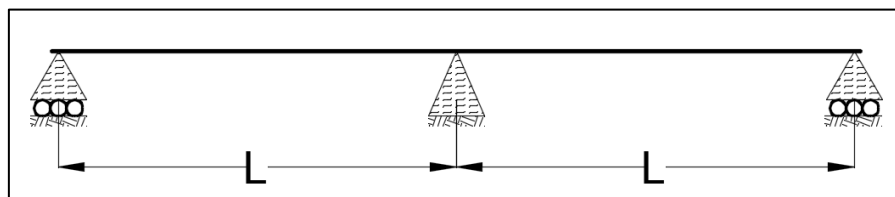


Figura IV-5. Modelo simplificado

El Cuadro IV-4 muestra el porcentaje de error obtenido de la comparación del modelo de puente recto (generado en CSI Bridge) contra el modelo teórico de distribución de cargas (Ver Apéndice F para más detalle).

Cuadro IV-4. Comparación de resultados para los modelos

Elemento	Esfuerzo	Valor	Modelo		% Error
			Teórico	Real ^B	Real
Viga Externa	Momento	Apoyo interno (Ton.m)	260,55	261,74	0,46
		Centro del claro (Ton.m)	146,56	151,87	3,61
	Cortante	Apoyo interno (Ton)	43,43	43,78	0,82
		Apoyo externo (Ton)	26,06	27,34	4,92
Viga Interna	Momento	Apoyo interno (Ton.m)	233,55	230,97	1,11
		Centro del claro (Ton.m)	131,37	130,06	1,00
	Cortante	Apoyo interno (Ton)	38,93	42,04	8,00
		Apoyo externo (Ton)	23,36	22,80	2,37

^{B/} Modelo de puente recto de dos claros

Los porcentajes de error obtenidos, permiten concluir que el modelo generado en CSI Bridge es representativo del tipo de puente propuesto. A partir de la configuración estructural de este modelo base se crean el resto de modelos. Los siguientes capítulos muestran los resultados obtenidos así como su análisis y las conclusiones respectivas.

CAPÍTULO V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. ASPECTOS GENERALES

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos para determinar la respuesta sísmica de los distintos modelos elaborados mediante el programa CSI Bridge. Los aspectos considerados en su modelaje se presentan en el CAPÍTULO IV.

Se resume y se agrupa la respuesta sísmica de 25 modelos con curvatura en planta en los que se varía el ángulo subtendido en planta, 125 modelos con curvatura en planta en los que se varia la relación entre longitudes de claros, 120 modelos con curvatura en planta con variación en la relación entre rigidez de pilas y 50 modelos de puentes rectos. La variación se realiza a partir del criterio de regularidad establecido por AASHTO en las Especificaciones AASHTO LRFD, para modelar un puente curvo como recto (Cuadro III-1).

Para todos los modelos, los datos obtenidos se presentan como fuerzas en la subestructura, específicamente momento flexionante y cortante. Se consideran además los desplazamientos de la superestructura, la cual es simplemente apoyada en sus extremos (bastiones) con libertad de desplazarse longitudinalmente pero con restricción en el sentido transversal al eje del puente.

En este capítulo no se presentan todos los resultados obtenidos, sino que seleccionan casos representativos. El resto de cuadros y figuras se pueden consultar del Apéndice G al Apéndice O.

5.2. EJES COORDENADAS

Se define el eje X cuya dirección es la de una línea imaginaria que une ambos bastiones de los puentes y el eje Y como aquella dirección perpendicular a X. Los ejes locales definen una dirección longitudinal, en el sentido del eje de la superestructura y una dirección transversal, la cual es perpendicular a esa dirección longitudinal. Estos ejes coordenados se muestran en la Figura V-1.

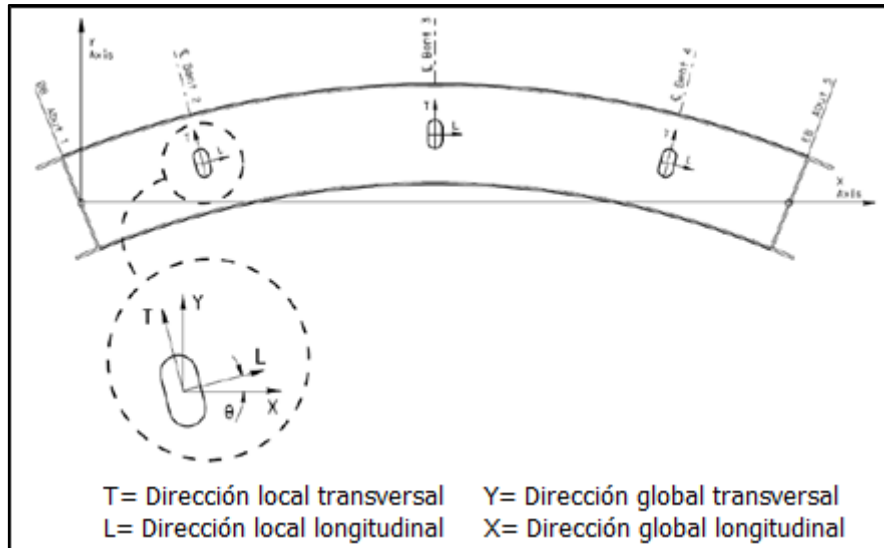


Figura V-1. Transformación de ejes coordenadas.

Fuente: (California Department of Transportation, 2015)

5.3. NOMENCLATURA

Para los modelos presentados en este Capítulo, se define una serie de abreviaturas que permiten describir los datos mostrados en las figuras. El Cuadro V-1 muestra dicha información.

Para ejemplificar su uso, se considera la información mostrada en la Figura V-2. En la que el título es "30G, 3C, RC 1"; esto quiere decir que la figura agrupa los datos de la razón dinámica de masa según el número de claros, para el modelo de puente con las siguientes características: "un ángulo subtendido en planta de 30 grados, con 3 claros y una relación entre longitudes de claros igual a 1". RC=1 implica que los 3 claros considerados poseen la misma longitud.

Para mayor claridad en este aspecto se puede consultar la sección 4.2.2. de esta investigación.

También se emplea el término "PR equivalente", "PR con RC=1" y "PR con RP=1" para describir las relaciones de cortante basal del puente curvo respecto al puente recto. El primero significa que tanto el puente curvo como el puente recto poseen las mismas dimensiones. El segundo corresponde a un puente recto cuya razón de longitudes entre claros es de 1, es decir, todos los claros del puente recto tienen la misma longitud. Y el tercero corresponde al puente recto en el que todas las pilas tienen la misma rigidez (RP=1).

Cuadro V-1. Nomenclatura de figuras

Abreviación	Significado
C	número de claros
G	grados ($^{\circ}$)
L	longitud de claros (m)
PC	punto curvo
PR	punto recto
R	rigidez de pilas
RC	relación entre longitudes de claros
RP	relación entre rigidez de pilas
Ux	dirección x
Uy	dirección y
U1	desplazamiento en x (m)
U2	desplazamiento en y (m)
V	cortante basal

5.4. ANÁLISIS MODAL

Se realiza un análisis modal espectral para obtener la respuesta sísmica de los distintos modelos para los puentes.

En el análisis multimodal espectral se recomienda que para puentes regulares, se considere una cantidad de modos de oscilación que brinden una masa participativa total de al menos un 90 % de la masa dinámica en elementos horizontales. Esto con el objetivo de que los resultados obtenidos del análisis multimodal espectral sean representativos. En esta investigación se definen al menos 120 modos de oscilación para alcanzar una participación de la masa modal al menos del 90 %.

La Figura V-2 y Figura V-3 muestran la participación modal para razón dinámica de masa, para los casos de variación en la relación entre longitud de claros y variación en la relación entre rigidez de pilas. En ambos casos se observa que en la dirección x (Ux) del modelo, se alcanza una participación modal de 90% en los primeros modos de oscilación, sin embargo en la dirección y (Uy) se requieren al menos 120 modos. El eje z no es de interés en esta investigación, sin embargo, se nota que con la misma cantidad de modos se alcanza al menos un 85% de la masa participativa dinámica en dicha dirección.

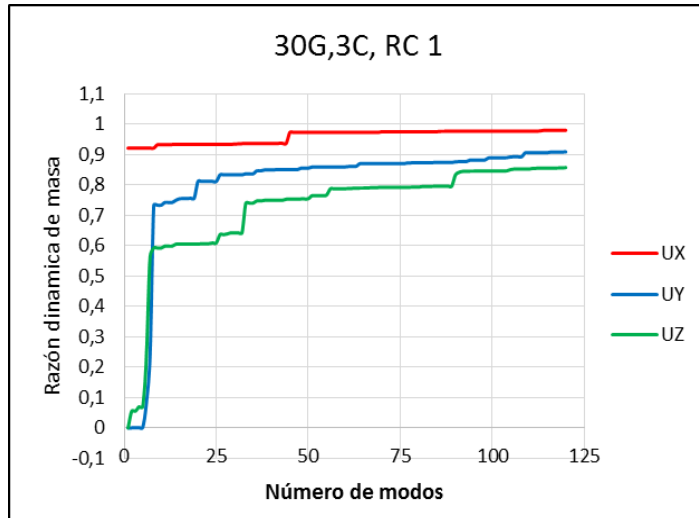


Figura V-2. Participación modal para razón dinámica de masa. Puente curvo, 30 °, 3 claros, RC=1.

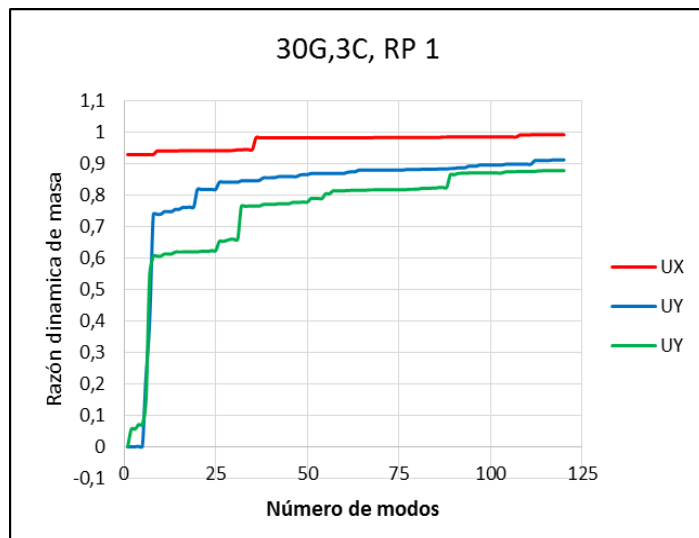


Figura V-3. Participación modal para razón dinámica de masa. Puente curvo, 30 °, 3 claros, RP=1.

5.5. VARIACIÓN DEL ÁNGULO SUBTENDIDO EN PLANTA

Se crean 32 modelos de puentes en los que se varía el ángulo subtendido en planta y se mantiene constante la longitud de claros (RC=1) y la rigidez de pilas (RP=1). Es decir, estos modelos cumplen el criterio de regularidad para longitud de claros y para rigidez de pilas. A continuación se describen los resultados:

5.5.1. Respuestas sísmicas debidas al sismo en X

Se estudia como interviene el sismo en X en las fuerzas máximas en pilas, presentando la variación de los cortantes en función de la relación entre longitudes de claros. También se consideran los desplazamientos de la superestructura.

5.5.1.1. **Subestructura**

5.5.1.1.1. Cortante basal longitudinal

El Cuadro V-2 y la Figura V-4 presentan el cortante basal longitudinal en función del ángulo subtendido en planta, los datos se agrupan según el número de claros.

Los resultados muestran que conforme aumenta el ángulo, el cortante basal longitudinal producto del sismo en X disminuye. Esto se debe a que al incrementar la curvatura de la superestructura, la rigidez también aumenta y la subestructura está sujeta a una demanda menor en sentido longitudinal.

Adicionalmente, en el Cuadro V-3 y la Figura V-5 se muestra la razón de cortante basal longitudinal del puente curvo respecto al puente recto equivalente. Se observa que conforme aumenta el ángulo subtendido en planta, mayor es la desviación en los datos. Es decir, la respuesta sísmica del puente recto es mayor que la del puente curvo. Esto implica que en sentido longitudinal, diseñar el puente curvo como puente recto es conservador.

Cuadro V-2. Cortante basal longitudinal según el ángulo. RC=1 y RP=1. Sismo X.

RC, RP	Cortante Basal Longitudinal (Ton)					
	Ángulo (°)					
C	0	30	60	70	80	90
2	952,92	941,34	906,14	889,46	870,45	849,23
3	1530,54	1512,91	1460,39	1434,47	1405,54	1373,32
4	2074,16	2050,28	1979,63	1945,76	1907,05	1863,83
5	2618,19	2588,17	2499,34	2456,88	2408,17	2354,03
6	3162,10	3125,96	3018,82	2967,70	2909,36	2843,88

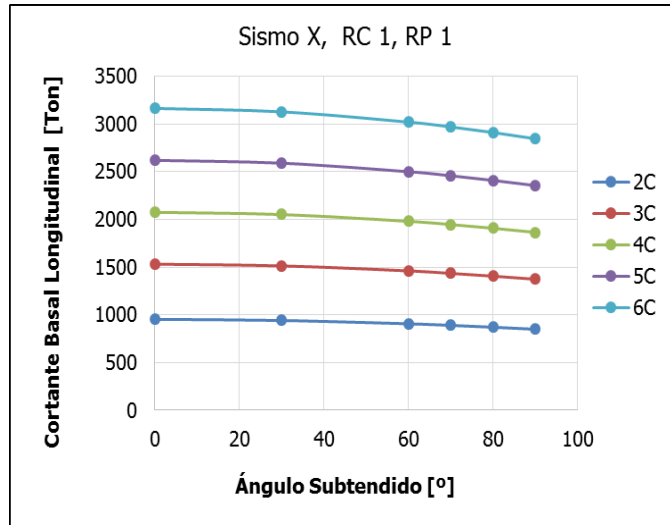


Figura V-4. Cortante basal longitudinal en función del ángulo. RC=1, RP=1. Sismo X.

Cuadro V-3. Comparación de cortante basal longitudinal según el ángulo. PC/PR equivalente. RC=1, RP=1. Sismo X.

RC, RP	Razón de Cortante Basal Longitudinal (PC/PR Equiv)					
	Ángulo (°)					
1	0	30	60	70	80	90
C	0	30	60	70	80	90
2	1,00	0,99	0,95	0,93	0,91	0,89
3	1,00	0,99	0,95	0,94	0,92	0,90
4	1,00	0,99	0,95	0,94	0,92	0,90
5	1,00	0,99	0,95	0,94	0,92	0,90
6	1,00	0,99	0,95	0,94	0,92	0,90

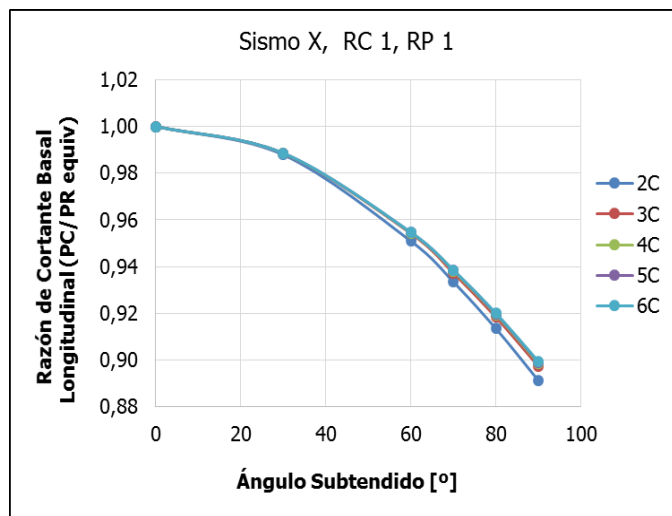


Figura V-5. Razón de cortante basal longitudinal en función del ángulo. RC=1, RP=1. Sismo X. Puente curvo respecto a puente recto equivalente.

5.5.1.2. Superestructura

5.5.1.2.1. Desplazamientos

La Figura V-6 muestra los desplazamientos en X (U1) producto del sismo en X. Los resultados se muestran en función del número de claros y se agrupan según el ángulo subtendido en planta.

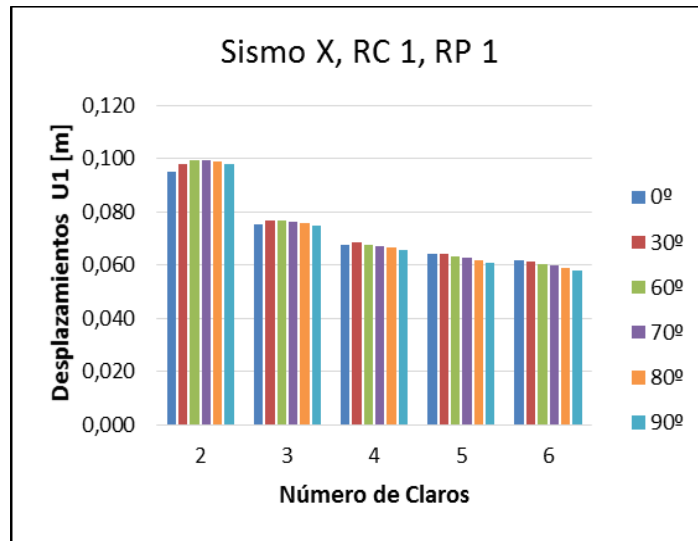


Figura V-6. U1 en función del número de claros. Sismo X, RC 1, RP 1.

Se observa que los mayores desplazamientos corresponden a los puentes con menor número de claros. Adicionalmente, para un número de claros definido, la máxima variación de U1 entre ángulos es de 0,002 m (0,187 cm).

5.5.2. Respuestas sísmicas debidas al sismo en Y

Se estudia como interviene el sismo en Y en las fuerzas máximas en pilas, presentando la variación de los cortantes en función de la relación entre longitudes de claros. También se consideran los desplazamientos de la superestructura.

5.5.2.1. Subestructura

5.5.2.1.1. Cortante basal transversal

El Cuadro V-4 y la Figura V-7 muestran los resultados correspondientes al cortante basal transversal según el ángulo subtendido en planta, producto del efecto del sismo en Y. En este caso, para cualquier número de claros dado, el incremento del ángulo produce un incremento en el cortante basal transversal del puente.

Cuadro V-4. Cortante basal transversal según el ángulo. RC=1 y RP=1. Sismo Y.

RC, RP	Cortante Basal Transversal (Ton)					
	Ángulo (°)					
1	0	30	60	70	80	90
C	0	30	60	70	80	90
2	379,82	394,86	412,46	410,65	433,70	479,33
3	813,36	793,13	803,54	850,70	906,38	966,99
4	1131,85	1102,14	1146,57	1193,80	1254,30	1322,13
5	1489,64	1481,38	1534,30	1594,26	1663,99	1756,88
6	1889,63	1884,59	1927,73	2012,64	2095,83	2197,30

Esto se debe a la condición de apoyos de los modelos, en los que los bastiones tienen libertad para desplazarse en X, mientras que en Y se restringe el desplazamiento. Esto implica que habrá un desplazamiento en X (U1) cuando la fuerza lateral de sismo se aplica en la dirección Y, y que permitirá que la curvatura de la superestructura disminuya, con lo que el puente se vuelve menos rígido. Así, esta estructura sufrirá mayor demanda sísmica en pilas. Dicho efecto se muestra en la Figura V-8.

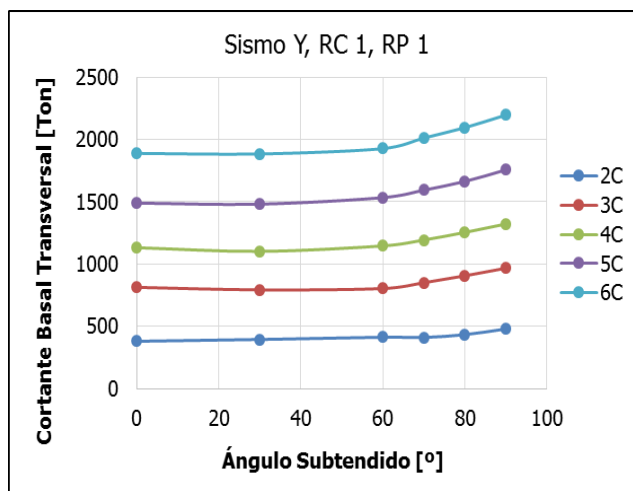


Figura V-7. Cortante basal transversal en función del ángulo. RC=1, RP=1. Sismo Y.

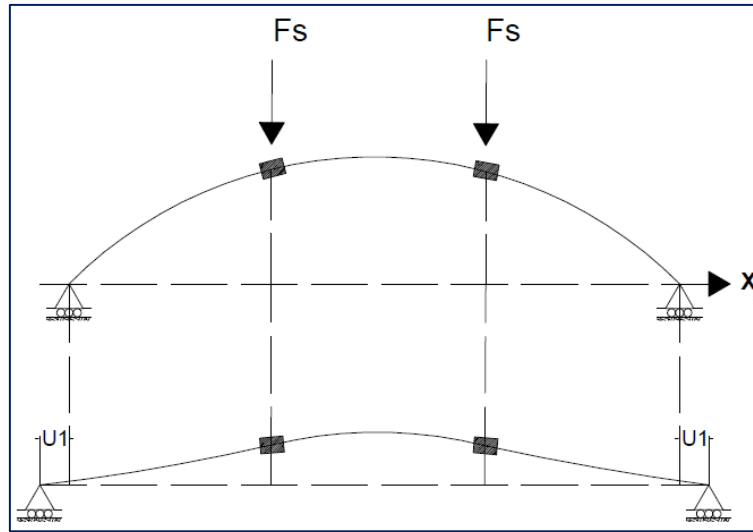


Figura V-8. Deformada transversal del puente curvo.

Mientras que, el Cuadro V-12 y la Figura V-9 resumen la razón del cortante basal transversal del puente curvo respecto al puente recto equivalente. Del análisis se obtiene que la demanda que experimenta el puente recto en sentido transversal es menor a la del puente curvo, por lo que en general la razón entre ambos modelos es mayor a 1.

A partir de este resultado, se concluye que en el sentido transversal, y cuando se aplica el sismo en Y, diseñar el puente curvo como puente recto implica subdiseñar la estructura.

Cuadro V-5. Comparación de cortante basal transversal según el ángulo. PC/ PR equivalente. RC=1, RP=1. Sismo Y.

RC, RP	Razón de Cortante Basal Transversal (PC/PR Equiv)					
	Ángulo (°)					
C	0	30	60	70	80	90
2	1,00	1,02	1,06	1,08	1,14	1,26
3	1,00	0,98	0,99	1,04	1,11	1,19
4	1,00	0,97	1,01	1,05	1,11	1,17
5	1,00	0,99	1,03	1,07	1,12	1,18
6	1,00	1,00	1,02	1,07	1,11	1,16

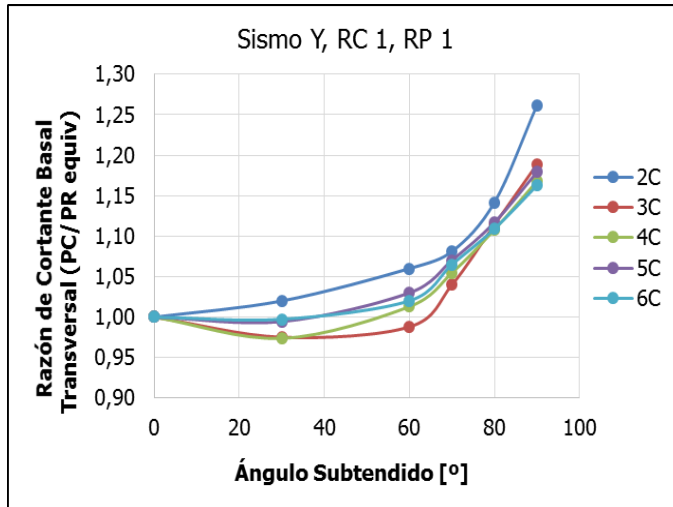


Figura V-9. Razón de cortante basal transversal en función del ángulo. RC=1, RP=1. Sismo X. Puente curvo respecto a puente recto equivalente.

5.5.2.2. Superestructura

5.5.2.2.1. Desplazamientos

La Figura V-10 muestra los desplazamientos en Y (U2) producto del sismo en Y. Los resultados se muestran en función del número de claros y se agrupan según el ángulo subtendido en planta.

Se observa que los desplazamientos U2 son mayores en los puentes que poseen solo dos claros. Los desplazamientos U2 disminuyen conforme aumenta el número de claros.

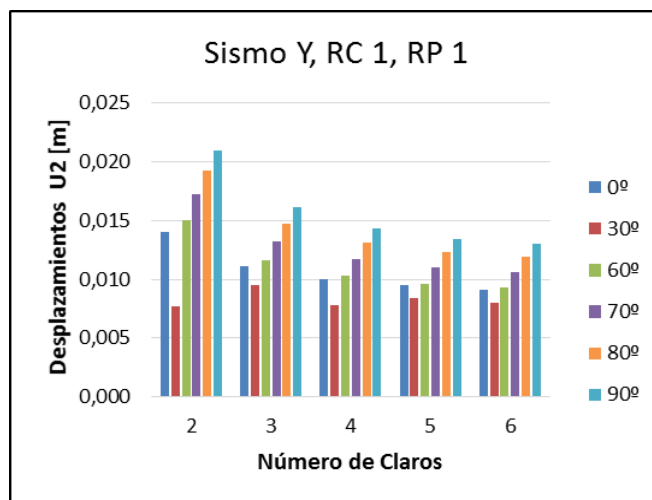


Figura V-10. U2 en función del número de claros. Sismo Y, RC 1, RP 1.

5.6. VARIACIÓN EN LA RELACIÓN DE LONGITUDES ENTRE CLAROS

Se crean 125 modelos de puentes curvos en los que se varía la relación de longitud entre claros adyacentes. Para todos los casos de esta sección, los puentes cumplen el criterio de regularidad de AASHTO para relación de rigidez entre pilas adyacentes, es decir todas las pilas poseen la misma dimensión. A continuación se describen los resultados:

5.6.1. Respuestas sísmicas debidas al sismo en X

Se estudia como interviene el sismo en X en las fuerzas máximas en pilas, presentando la variación de los cortantes en función de la relación entre longitudes de claros. También se consideran los desplazamientos de la superestructura. Se asigna el 100 % del sismo en X y el 30 % del sismo en Y.

Los resultados de los puentes curvos se comparan con los resultados obtenidos de los modelos de puentes rectos. Las mayores demandas de fuerza se obtienen en la dirección longitudinal.

5.6.1.1. Subestructura

5.6.1.1.1. Cortante basal longitudinal

Es de interés en esta sección mostrar el efecto de variar la relación entre longitudes de claros, y por lo tanto del criterio de regularidad correspondiente; en la respuesta sísmica de los puentes curvos, específicamente los efectos en la subestructura.

La Figura V-11, Figura V-12 y la Figura V-13 presentan la razón de cortante basal longitudinal del puente curvo respecto al puente recto equivalente, en función de la razón entre longitudes de claros. Se mantiene constante el ángulo subtendido y los datos se agrupan según el número de claros.

La Figura V-11 muestra la respuesta sísmica longitudinal de los puentes para un ángulo subtendido de 30°, la Figura V-12 para un ángulo de 60° y la Figura V-13 para un ángulo de 90°.

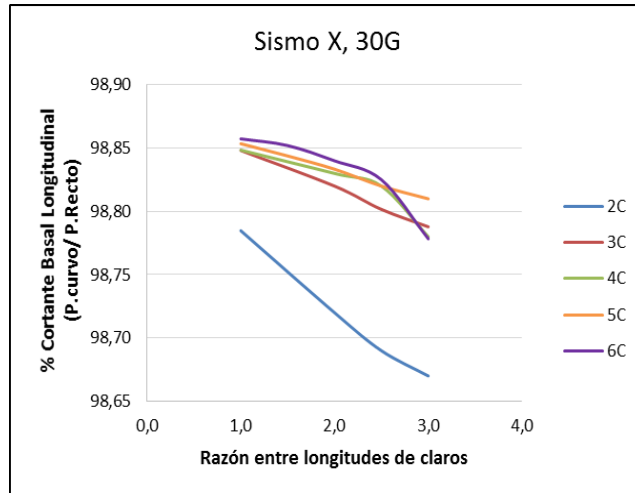


Figura V-11. Porcentaje de variación del cortante basal longitudinal (Puente Curvo/Puente Recto) en función de RC. Sismo X, 30°.

En todos los casos se observa que conforme aumenta la RC, la desviación de los datos se incrementa. Esto significa, que el puente recto equivalente experimenta una mayor demanda sísmica que el puente curvo, en sentido longitudinal; cuando se incrementa la RC. El criterio de regularidad para RC es de 2 para 2, 3 y 4 claros; y de 1,5 para 5 y 6 claros.

Asimismo de la Figura V-11 se concluye que para ángulos subtendidos en planta menores o iguales a 30°, modelar los puentes curvos como puentes rectos ofrece una buena aproximación, debido a que las fuerzas en el puente curvo varían en aproximadamente 2 % respecto al puente recto equivalente. El ángulo de 30° corresponde al criterio de regularidad establecido por AASHTO.

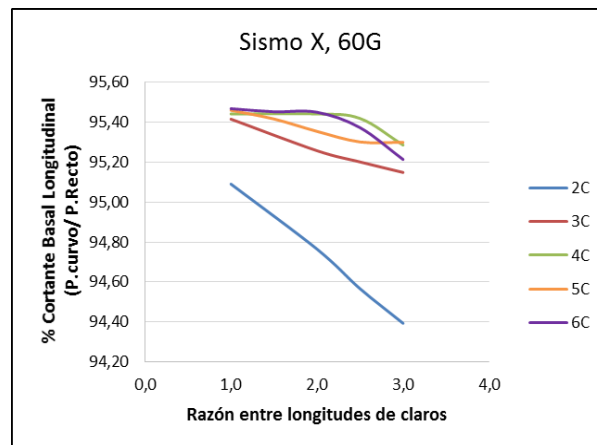


Figura V-12. Porcentaje de variación del cortante basal longitudinal (Puente Curvo/Puente Recto) en función de RC. Sismo X, 60°.

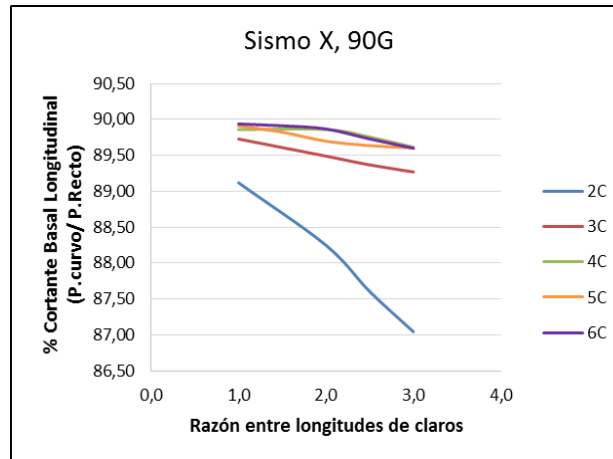


Figura V-13. Porcentaje de variación del cortante basal longitudinal (Puente Curvo/Puente Recto) en función de RC. Sismo X, 90°.

Sin embargo, para el caso en que el ángulo subtendido en planta es mayor a 30° (Figura V-12 y Figura V-13), analizar el puente curvo como puente recto es conservador. Debido a que la desviación en la respuesta de los puentes curvos respecto a los puentes rectos equivalentes aumenta conforme el ángulo subtendido se incrementa. Los valores difieren entre 6 % y 15 % para un ángulo de 60° y uno de 90° respectivamente.

En todos los casos, para el análisis de la respuesta longitudinal producto del sismo X; la diferencia es mayor una vez que se excede el criterio de regularidad para relación de longitudes de claros (Ver Cuadro III-1).

Además, entre menor sea la cantidad de claros menor será la diferencia, tal como se aprecia en los datos correspondientes a puentes de dos claros (2C) en las figuras anteriores.

En el Apéndice H y el Apéndice J se muestran todos los resultados de la razón de cortante basal longitudinal en función de la relación de longitudes de claros, esta vez agrupados según el ángulo de curvatura.

El Cuadro V-6 y la Figura V-14 muestran la comparación del cortante basal longitudinal del puente curvo respecto al cortante basal longitudinal del puente recto equivalente, es decir, aquel puente que posee las mismas características geométricas del curvo pero un ángulo de 0°.

Mientras que el Cuadro V-7 y la Figura V-15 presentan la comparación del cortante basal longitudinal del puente curvo respecto al cortante basal longitudinal del puente recto que cumple una relación de claros de 1, es decir, sus claros poseen la misma longitud.

La Figura V-14 y la Figura V-15 muestran los resultados de la acción del sismo en X y corresponden a un puente con 3 claros. Se escogen estos datos por ser representativos del resto de resultados. En ambos casos, se concluye que una mayor variación en la relación de longitudes entre claros adyacentes produce una mayor desviación entre los resultados de un puente curvo y el puente recto, en sentido longitudinal. Además se obtiene mayor desviación en los resultados si se varía la relación de longitudes entre claros que por variar el ángulo subtendido.

Sin embargo, se recomienda considerar un incremento mayor en la RC, para así analizar más cantidad de casos y establecer una tendencia más clara.

Cuadro V-6. Comparación del cortante basal longitudinal. PC y PR equivalente. Sismo X, 3C. RC.

Claros	Razón de Cortante Basal Longitudinal (PC/PR Equiv)					
	Ángulo (°)					
3	0	30	60	70	80	90
PC/PR	0	30	60	70	80	90
1,0	1,000	0,988	0,954	0,937	0,918	0,897
2,0	1,000	0,988	0,953	0,936	0,916	0,895
2,5	1,000	0,988	0,952	0,935	0,915	0,894
3,0	1,000	0,988	0,951	0,934	0,915	0,893
3,5	1,000	0,988	0,951	0,934	0,914	0,892

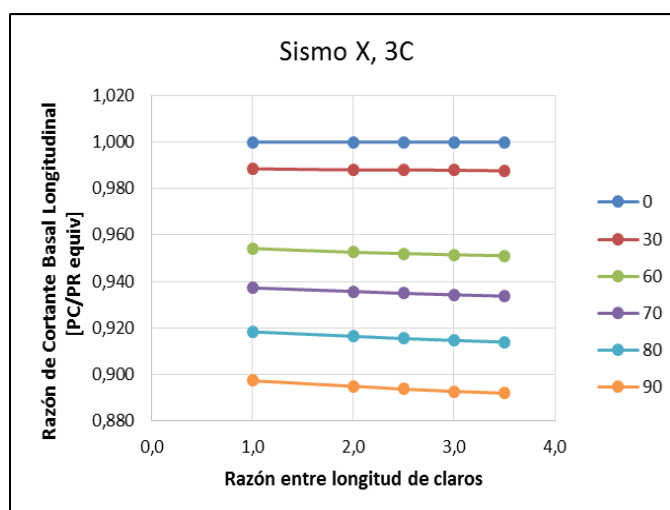


Figura V-14. Razón de cortante basal longitudinal en función de RC. Sismo X, 3C. Puente curvo respecto a puente recto equivalente.

Cuadro V-7. Comparación del cortante basal longitudinal. PC y PR con RC=1. Sismo X, 3C. RC.

Claros	Razón de Cortante Basal Longitudinal (PC/PR RC=1)					
	Ángulo (°)					
3	0	30	60	70	80	90
PC/PR						
1,0	1,000	0,988	0,954	0,937	0,918	0,897
2,0	1,000	0,988	0,953	0,936	0,917	0,895
2,5	1,000	0,988	0,952	0,935	0,916	0,894
3,0	1,000	0,988	0,952	0,934	0,915	0,893
3,5	1,000	0,988	0,951	0,934	0,914	0,892

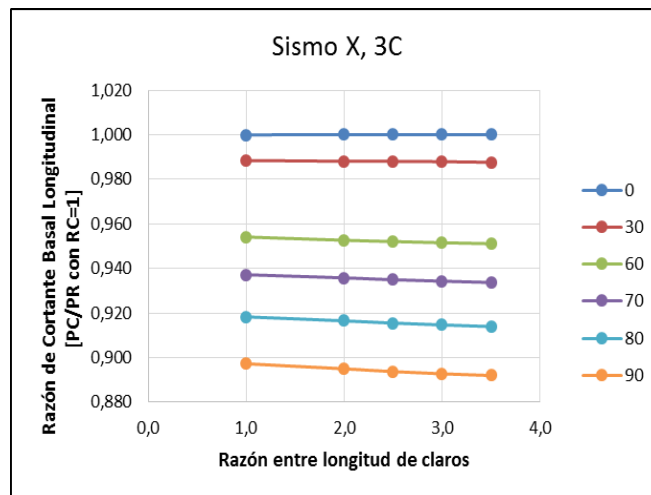


Figura V-15. Razón de cortante basal longitudinal en función de RC. Sismo X, 3C. Puente curvo respecto a puente recto con relación de claros de 1.

Asimismo, en el Apéndice N se resumen los datos de cortante basal longitudinal en función de RC. La Figura V-16 muestra la demanda longitudinal en la subestructura de los puentes, con un ángulo de 60°; según la cantidad de claros. De estos datos interesa que en sentido longitudinal a mayor cantidad de claros mayor es la demanda de cortante basal longitudinal. Se cumple que el puente recto posee mayor demanda que el puente curvo, tal como se explicó anteriormente. El aumento en el cortante basal se debe a que se adicionan elementos a la estructura, es decir, aumenta la cantidad de claros y con esto la masa del sistema.

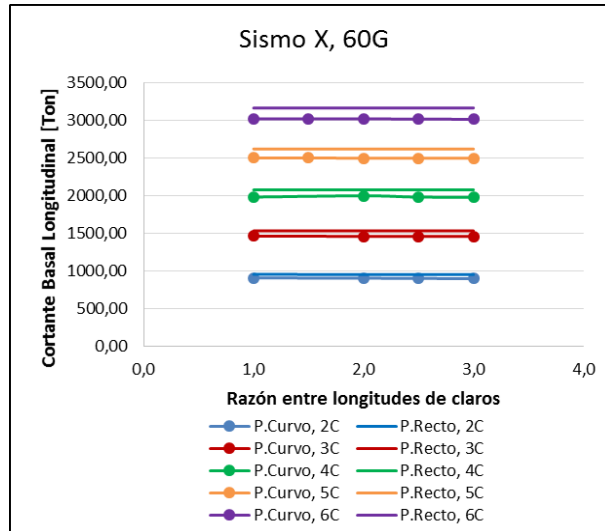


Figura V-16. Cortante basal longitudinal en función de RC. Sismo X, 60°.

5.6.1.2. Superestructura

5.6.1.2.1. Desplazamientos

La Figura V-17 presenta el desplazamiento longitudinal (U1) de la superestructura en función del número de claros, para el caso en el que la relación de longitud entre claros adyacentes es de 2. En la figura se muestra que conforme aumenta el ángulo subtendido en planta el desplazamiento longitudinal del puente disminuye.

Esta tendencia confirma el hecho de que a mayor curvatura el efecto axial es más importante porque se generan momentos adicionales y la estructura es por lo tanto más rígida que la del puente recto equivalente. Un ejemplo de estos resultados se muestra en la Figura V-18, en la que se aprecia adicionalmente que el incremento en la relación entre longitudes de claros contribuye en la disminución de U1.

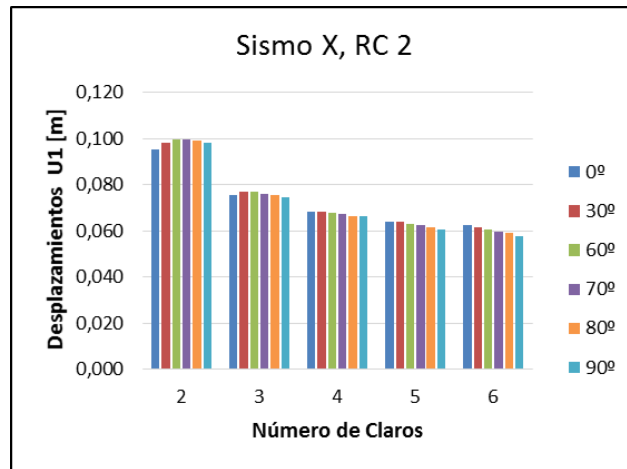


Figura V-17. U1 en función del número de claros. Sismo X, RC= 2.

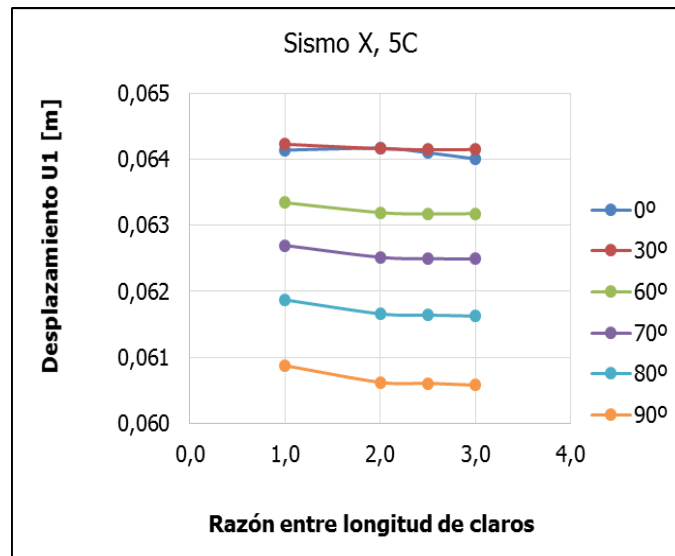


Figura V-18. U1 en función de RC. Sismo X, 5C.

5.6.2. Respuestas sísmicas debidas al Sismo Y

Se estudia como interviene el sismo en Y en las fuerzas máximas en pilas, presentando la variación de los cortantes en función de la relación de longitudes de claros. Se asigna el 30 % en X y 100 % del sismo en Y.

5.6.2.1. Subestructura

La Figura V-19, la Figura V-20 y la Figura V-21 muestran el porcentaje basal de cortante transversal del puente curvo respecto al puente recto, en función de la relación de longitudes

entre claros adyacentes. Los datos corresponden al efecto del sismo en Y y se agrupan según el número de claros.

La Figura V-19 muestra la respuesta sísmica transversal de los puentes para un ángulo subtendido de 30°, la Figura V-20 para un ángulo de 60° y la Figura V-21 para un ángulo de 90°.

Los datos de la Figura V-19 muestran como la razón de cortante basal transversal del puente curvo respecto al puente recto varía según la RC. Aunque, no se obtiene la misma tendencia para todos los casos analizados en esta figura, en general se observa que una vez que se excede el criterio de regularidad, la razón PC/PR disminuye. Por ejemplo, para un puente de 3 claros el criterio de regularidad es (RC= 3) y en la figura se observa que para la serie correspondiente, existe un punto de inflexión en la curva justo donde se cumple dicho criterio.

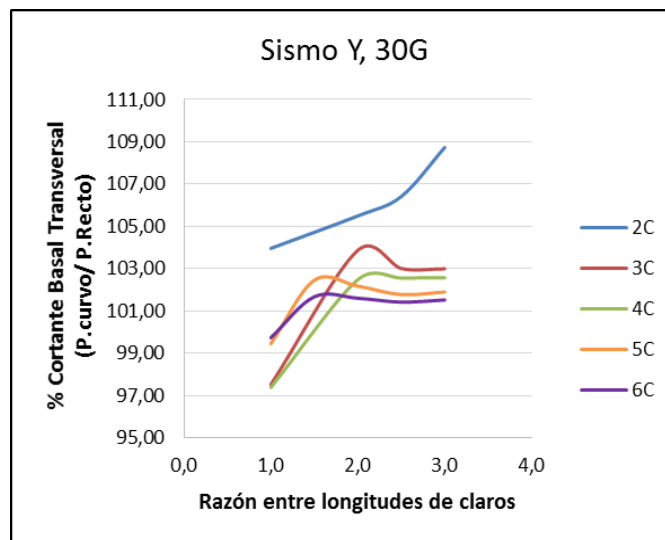


Figura V-19. Porcentaje de variación del cortante basal transversal (Puente Curvo/ Puente Recto) en función de RC. Sismo Y, 30°.

Asimismo, de la comparación entre los resultados de cortante basal transversal del puente curvo y su equivalente puente recto, se muestra que para un ángulo de curvatura de 30° la diferencia máxima entre los resultados es de un 10 %. El ángulo de 30° corresponde al límite de regularidad establecido por AASHTO. El 10 % de desviación de los datos corresponde al modelo de 2 claros y relación entre longitudes de 3,5. En la Figura V-19 se observa dicha variación.

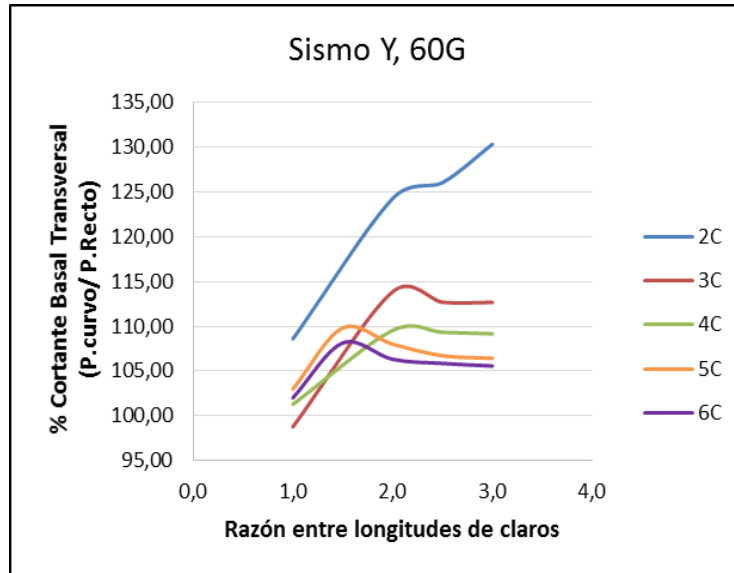


Figura V-20. Porcentaje de variación del cortante basal transversal (Puente Curvo/ Puente Recto) en función de RC. Sismo Y, 60°.

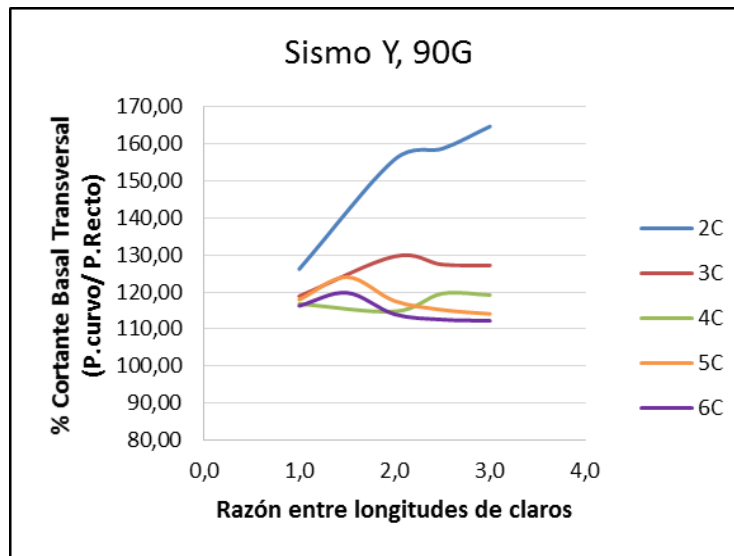


Figura V-21. Porcentaje de variación del cortante basal transversal (Puente Curvo/ Puente Recto) en función de RC. Sismo Y, 90°.

Al igual que para los datos de cortante basal longitudinal, la desviación de los resultados se incrementa conforme aumenta el ángulo de curvatura, tal como se concluye al analizar los datos de la Figura V-20 y la Figura V-21. Sin embargo, en estos casos la razón es mayor a 1, lo cual denota que el puente curvo en sentido transversal posee mayor demanda que el puente recto. Así, para aquellos ángulos mayores a 30°, modelar el puente curvo como puente recto implica subdiseñar la estructura.

No obstante, tal como se mostró en la sección 5.6.1.1. las demandas debidas al sismo en X en sentido longitudinal son mayores que las analizadas en esta sección. Por lo tanto, en general, se deben analizar ambas direcciones en el diseño de las pilas.

El Apéndice H y el Apéndice J, en la sección 2 muestran todos los resultados de la razón de cortante basal transversal en función de la relación de longitudes de claros, pero agrupados según el ángulo de curvatura.

El Cuadro V-8 y la Figura V-22 muestran la comparación del cortante basal transversal del puente curvo respecto al cortante basal transversal del puente recto equivalente, es decir, aquel puente que posee las mismas características geométricas del curvo pero un ángulo de 0°. Dichos efectos son producto del sismo en Y.

También, el Cuadro V-9 y la Figura V-23 presentan la comparación del cortante basal transversal del puente curvo respecto al cortante basal transversal del puente recto que cumple una relación de claros de 1, es decir, sus claros poseen la misma longitud.

Para el caso en que la comparación del puente curvo se realiza contra el puente recto equivalente (Figura V-22) se observa que la desviación de los datos disminuye una vez que se excede el criterio de regularidad para RC. Mientras que en el caso en que se compara el puente curvo contra el puente recto regular, los resultados muestran una tendencia creciente, conforme aumenta la relación de longitud entre claros adyacentes, es decir, la demanda del puente recto regular es mucho menor que para los distintos modelos de puente curvo.

Cuadro V-8. Comparación del cortante basal transversal. PC y PR equivalente. Sismo Y. 5C. RC.

Claros 5	Razón de Cortante Basal Transversal (PC/PR Equiv)					
	Ángulo (°)					
PC/PR	0	30	60	70	80	90
1,0	1,000	0,994	1,030	1,070	1,117	1,179
1,5	1,000	1,025	1,098	1,144	1,187	1,241
2,0	1,000	1,022	1,080	1,108	1,138	1,176
2,5	1,000	1,018	1,067	1,091	1,117	1,152
3,0	1,000	1,019	1,064	1,086	1,111	1,141

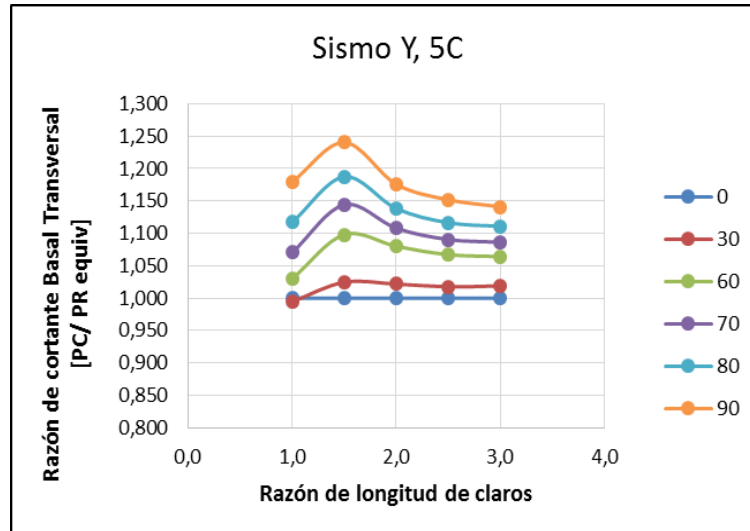


Figura V-22. Razón de cortante basal transversal en función de RC. Sismo Y, 5C. Puente curvo respecto a puente recto equivalente.

Cuadro V-9. Comparación del cortante basal transversal. PC y PR con RC=1. Sismo Y. 5C. RC

Claros	Razón de cortante basal transversal (PC/PR RC=1)					
	Ángulo (°)					
5	0	30	60	70	80	90
PC/PR	0	30	60	70	80	90
1,0	1,000	0,994	1,030	1,070	1,117	1,179
1,5	1,083	1,110	1,190	1,240	1,287	1,344
2,0	1,242	1,269	1,342	1,377	1,414	1,461
2,5	1,300	1,323	1,387	1,418	1,451	1,497
3,0	1,324	1,350	1,410	1,439	1,471	1,511

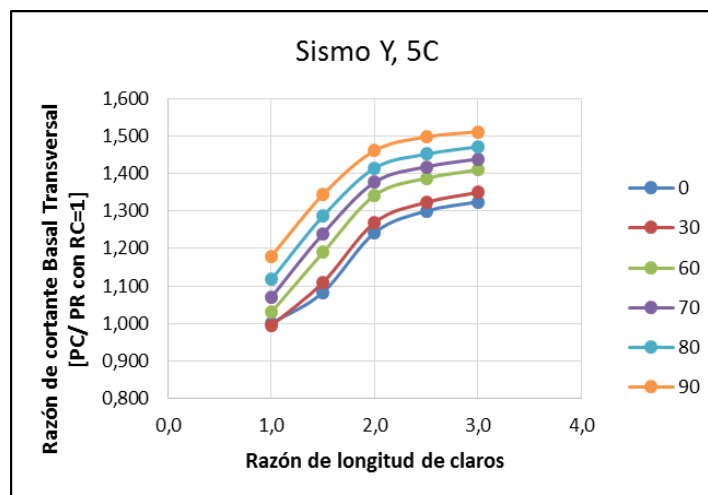


Figura V-23. Razón de cortante basal longitudinal en función de RC. Sismo Y, 5C. Puente curvo respecto a puente recto con relación de claros de 1.

Del mismo modo, en la sección 2 se resumen los datos de cortante basal transversal en función de RC. La Figura V-24 muestra la demanda transversal en la subestructura de los puentes cuyo ángulo subtendido es de 60°. Con esta representación se muestra que la demanda transversal del puente curvo siempre es mayor que la del puente recto equivalente. Igual que para el análisis del sismo en x, la demanda es mayor conforme se adicionan claros a los modelos de puentes.

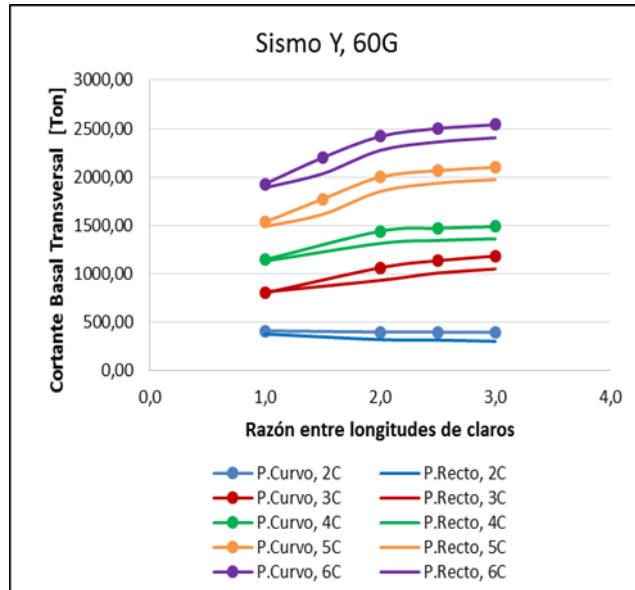


Figura V-24. Cortante Basal Transversal en función de RC. Sismo Y, 60°.

5.6.2.2. Superestructura

5.6.2.2.1. Desplazamientos

La Figura V-25 y la Figura V-26 muestran el desplazamiento U1 y U2 de la superestructura en función del número de claros. Los datos corresponden al caso en el que la relación entre longitudes de claros es de 2 y los desplazamientos son producto del Sismo Y.

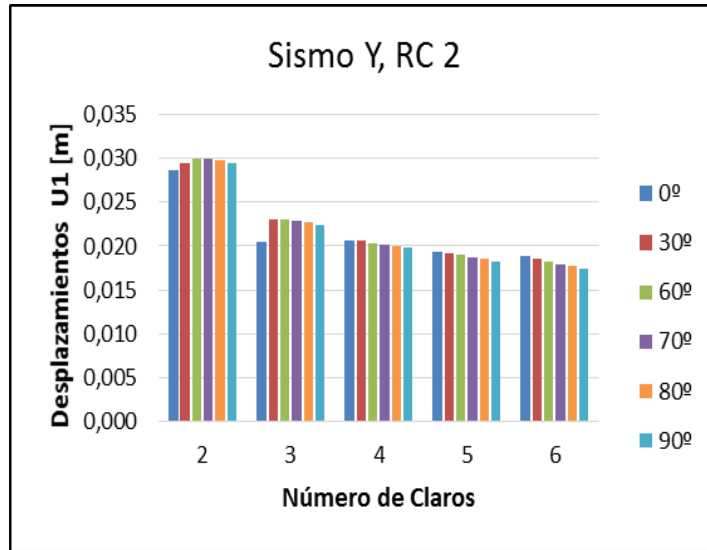


Figura V-25. U1 en función del número de claros. Sismo Y, RC=2.

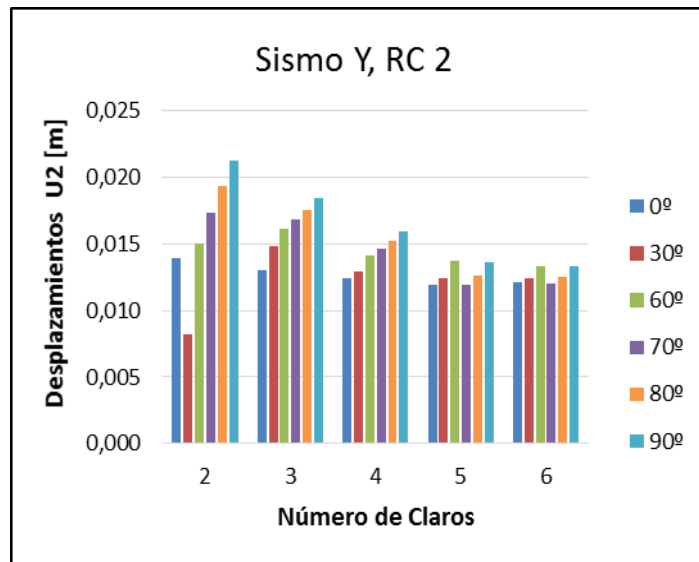


Figura V-26. U2 en función del número de claros. Sismo Y, RC=2.

Y aunque el Sismo Y aporta el 100% del valor absoluto de las fuerzas sísmicas y momentos en los elementos en la dirección transversal, se observa que los desplazamientos son mayores en sentido longitudinal (U1). Esto se puede relacionar con la condición de apoyos, debido a que el desplazamiento transversal está restringido mientras que el longitudinal no.

Por lo tanto, se recomienda desarrollar un estudio en el que se considere la influencia de la condición de apoyos de los puentes curvos en la respuesta sísmica cuando se exceden los criterios de regularidad establecidos por AASTHO.

En general, en la dirección transversal se incrementa la demanda que experimenta el puente debido a la condición de apoyos y también debido al efecto de pilas que se oponen al desplazamiento en esa dirección, es decir actúan como un resorte. Cuando el sismo Y interactúa con el puente curvo, el desplazamiento en sentido transversal es menor al de un puente sin restricción de desplazamiento transversal. Esto ocasiona que en X, donde el apoyo es un rodillo, la estructura se desplace y cambie la curvatura de la superestructura. Al disminuir la curvatura, la rigidez de la superestructura disminuye, por lo que las pilas están sujetas a una mayor demanda. Esto explica además porque los desplazamientos U1 son mayores que los desplazamientos U2.

5.7. VARIACIÓN EN LA RELACIÓN DE RIGIDEZ ENTRE PILAS

Se elaboran 120 modelos de puentes curvos en los que se varía la relación de rigidez entre pilas. La variación se realiza a partir del criterio de regularidad establecido por ASSHTO en las Especificaciones AASHTO LRFD (Cuadro III-1), para modelar un puente curvo como recto.

Los modelos de puentes curvos analizados en esta sección cumplen el criterio de regularidad para longitudes de claros adyacentes. El Apéndice D muestra todas las combinaciones posibles.

A continuación se describen los resultados:

5.7.1. Respuestas sísmicas debidas al sismo en X

Se estudia como interviene el sismo en X en las fuerzas máximas en pilas, presentando la variación de los cortantes en función de la relación de rigidez de pilas. Se asigna el 100 % en X y 30 % del sismo en Y.

Los resultados de los puentes curvos confirman el comportamiento esperado, las mayores demandas se dan en la dirección X. Se presentan los resultados para los puentes curvos y los puentes rectos equivalentes.

5.7.1.1. Subestructura

5.7.1.1.1. Cortante basal longitudinal

La Figura V-27 y la Figura V-28 muestran la comparación del cortante basal longitudinal del puente curvo respecto al puente recto equivalente. Los datos corresponden a un ángulo específico (30° y 90°, para la Figura V-27 y la Figura V-28, respectivamente) y se agrupan según el número de claros. Los resultados corresponden a la respuesta producto del sismo X.

En ambos casos se tiene que el porcentaje de desviación de los datos tiende a aumentar conforme aumenta la relación de rigidez entre pilas adyacentes. Si la demanda de ambos puentes es la misma, la razón obtenida sería de 1 (100%), no existiría desviación de los datos.

En la Figura V-27 se muestran los datos resumidos para un ángulo subtendido de 30°, el cual corresponde al criterio de regularidad de AASHTO. Para este caso, la desviación en el cortante basal longitudinal es de aproximadamente un 1,5%. Este valor es tan pequeño, que implica que modelar el puente curvo como puente recto ofrece resultados representativos del comportamiento real del puente curvo, aun cuando se exceda el criterio de regularidad para RP.

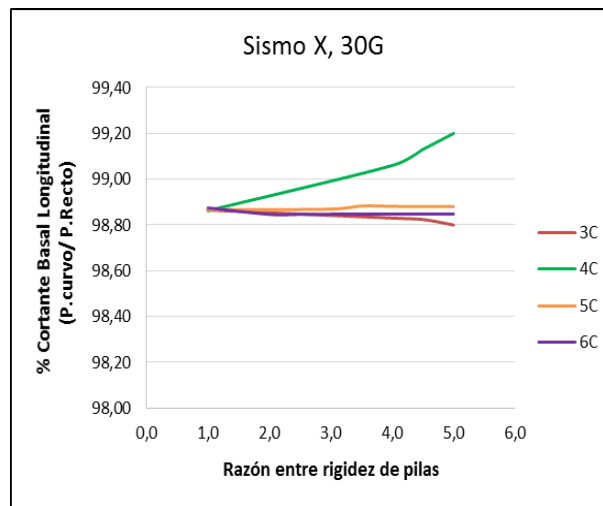


Figura V-27. Porcentaje de variación del cortante basal longitudinal (Puente Curvo/Puente Recto) en función de RP. Sismo X, 30°.

Sin embargo, cuando se aumenta el ángulo subtendido en planta, la desviación de los datos se incrementa hasta valores de un 11 % en la comparación del cortante basal longitudinal

producto del sismo en X. La Figura V-28 ejemplifica dicha tendencia, los datos corresponden a un ángulo de 90°.

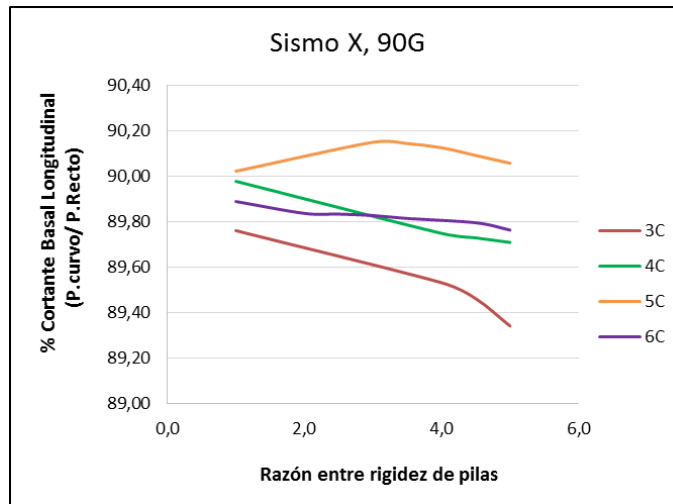


Figura V-28. Porcentaje de variación del cortante basal longitudinal (Puente Curvo/Puente Recto) en función de RP. Sismo X, 90°.

En el Apéndice I y el Apéndice K se muestran todos los resultados de la razón de cortante basal longitudinal en función de la relación de rigidez entre pilas (RP). Los datos se agrupan según el ángulo de curvatura. Y permiten determinar el efecto de variar la rigidez entre pilas adyacentes en puentes curvos y puentes rectos.

En el Cuadro V-10 y la Figura V-29 se presentan los resultados de comparar el cortante basal longitudinal del puente curvo respecto al cortante basal longitudinal del puente recto equivalente, es decir, aquel puente que posee las mismas características geométricas del curvo pero un ángulo de 0°. Los datos son dependientes de la RP.

Similarmente, el Cuadro V-11 y la Figura V-30 resumen los resultados que corresponden a la comparación del cortante basal longitudinal del puente curvo respecto al cortante basal longitudinal del puente recto que cumple una relación de rigidez entre pilas de 1, es decir, todas sus pilas poseen la misma rigidez.

Para el primer caso (Figura V-29) los resultados muestran que conforme aumenta la razón de rigidez entre pilas, mayor es la desviación de los resultados. Además esta tendencia se incrementa conforme se excede el criterio de regularidad de AASHTO (datos sombreados).

Igualmente, para el segundo caso (Figura V-30) se observa que existe mayor variación en los datos al variar la relación de rigidez que la que ocurre debido al ángulo subtendido.

Cuadro V-10. Comparación del cortante basal longitudinal. PC y PR equivalente. Sismo X, 4C. RP.

Claros	Cortante Basal Longitudinal (PC/PR Equiv)					
	Ángulo (°)					
4						
RP	0	30	60	70	80	90
1,0	1,000	0,989	0,955	0,939	0,920	0,900
4,0	1,000	0,989	0,954	0,937	0,918	0,896
4,5	1,000	0,991	0,956	0,939	0,919	0,897
5,0	1,000	0,993	0,957	0,940	0,920	0,898
5,5	1,000	0,993	0,957	0,939	0,919	0,897

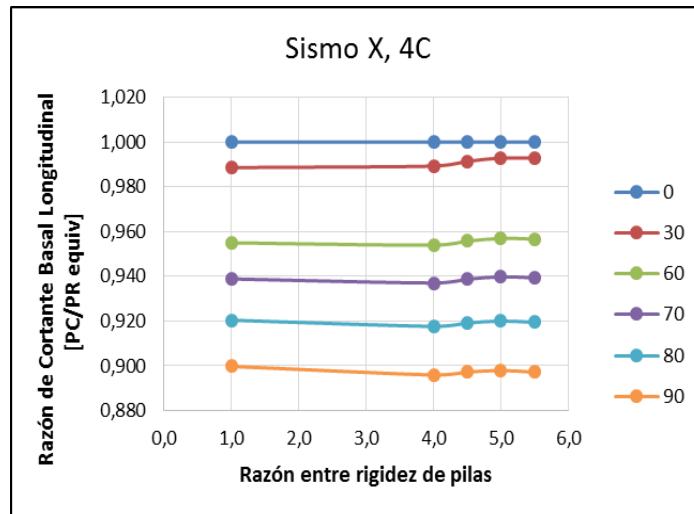


Figura V-29. Razón de cortante basal longitudinal en función de RP. Sismo X. 4C. Puente curvo respecto a puente recto equivalente.

Cuadro V-11. Comparación del cortante basal longitudinal. PC y PR con RP=1. Sismo X, 4C. RP.

Claros	Razón de cortante basal longitudinal (PC/PR RP=1)					
	Ángulo (°)					
4						
RP	0	30	60	70	80	90
1,0	1,000	0,991	0,957	0,941	0,922	0,902
4,0	1,187	1,179	1,137	1,117	1,094	1,068
4,5	1,191	1,182	1,140	1,120	1,096	1,070
5,0	1,194	1,185	1,143	1,122	1,099	1,072
5,5	1,197	1,189	1,145	1,125	1,101	1,074

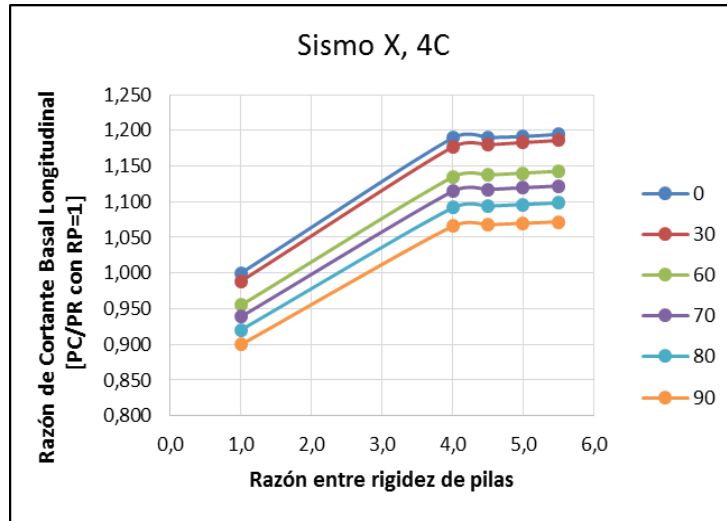


Figura V-30. Razón de cortante basal longitudinal en función de RP. Sismo X. 4C. Puente curvo respecto a puente recto con una relación de rigidez de pilas de 1.

La distribución del cortante en las pilas es proporcional a la rigidez y ubicación de estas en la configuración geométrica del puente. Por ejemplo, para un ángulo de 80 grados y 6 claros: si solamente se varía la rigidez de las pilas internas, se observa que la demanda en dichas pilas es mayor que la de las pilas externas. La Figura V-31 muestra dicho comportamiento.

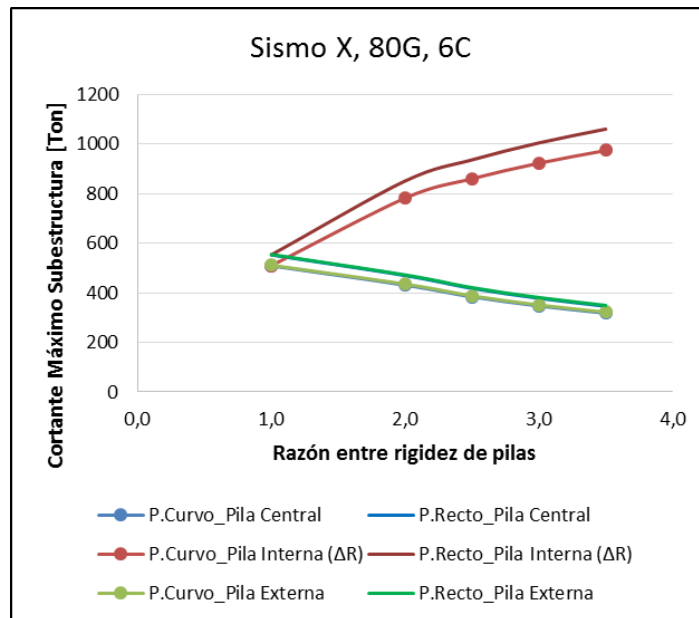


Figura V-31. Distribución del cortante basal longitudinal por pilas en función de RP. Sismo X, 80°, 6C.

Mientras que, en el puente curvo de 6 claros y con RC y RP igual a 1 (primer dato del gráfico), las pilas externas tienen mayor demanda, que la interna y la central. Para el resto de modelos mostrados en la Figura V-31, se cumple que las pilas internas (con cambio de rigidez) son los elementos que toman mayor carga y esto aumenta conforme aumenta la razón entre rigidez de pilas.

Igualmente, si se compara el comportamiento de cada pila del puente curvo respecto a su pila equivalente en el puente recto, se concluye que la variación en los datos es mayor para aquellas pilas en las que se ha variado la razón de rigidez (líneas rojas).

También, en el Apéndice O se resumen los datos de cortante basal longitudinal en función de RP. La Figura V-32 exhibe el cambio en el cortante basal longitudinal, producto del sismo X; y según la razón entre rigidez de pilas. Se tiene que para un ángulo subtendido dado, conforme aumenta la cantidad de claros aumenta el cortante basal de los puentes, debido a que se agregan más elementos a la estructura estudiada. Los mismos resultados se obtienen para la razón entre longitudes de claros.

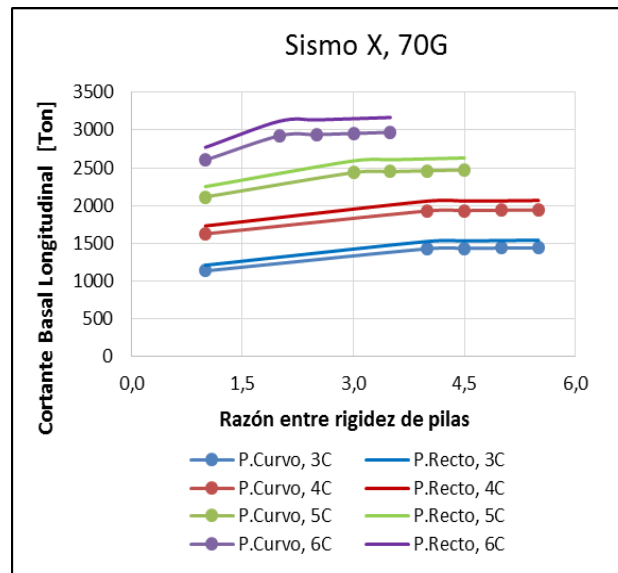


Figura V-32. Cortante Basal Longitudinal en función de RP. Sismo X, 70°.

Superestructura

5.7.1.1.2. Desplazamientos

De la respuesta sísmica de los puentes, interesa para la superestructura conocer los desplazamientos. La Figura V-33 muestra el desplazamiento longitudinal (U1) debido al sismo

X, según el número de claros. Los datos corresponden a una RP de 3 y se presentan en función del número de claros.

Para un número de claros dado, se observa que conforme aumenta el ángulo subtendido, U1 disminuye. Esto se debe a que la estructura se vuelve más rígida al aumentar la curvatura, adicionalmente no se cuenta con una distribución de rigidez de pilas uniforme, ya que $RP=3$.

Del mismo modo, a mayor relación de rigidez entre pilas, menor es el desplazamiento del puente, ya que al aumentar la rigidez de algunas pilas la rigidez de todo el puente se incrementa, tal como se aprecia en la Figura V-34.

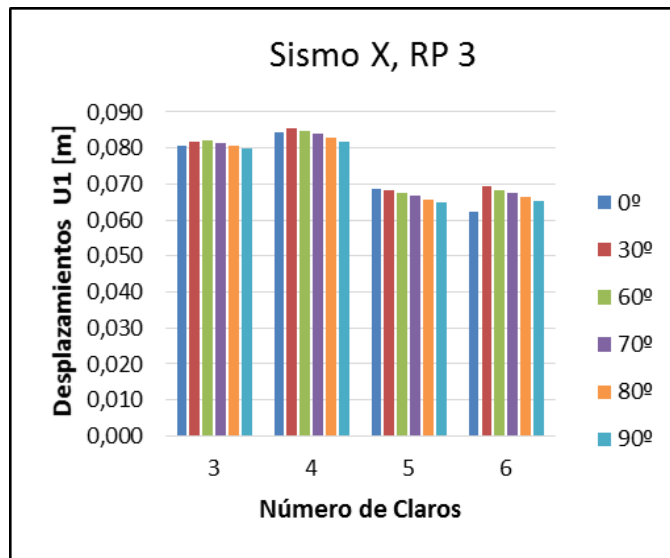


Figura V-33. U1 en función del número de claros. Sismo X, $RP=3$.

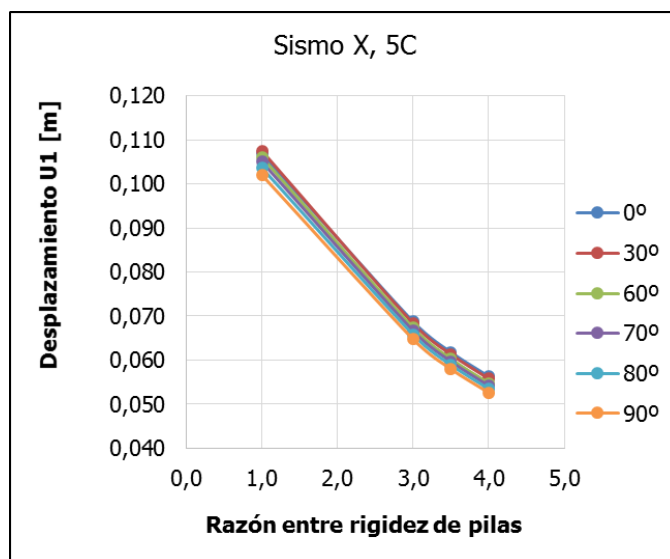


Figura V-34. U1 en función de RP. Sismo X. 5C.

5.7.2. Respuestas sísmicas debidas al sismo en Y

Se estudia como interviene el sismo en Y en las fuerzas máximas en pilas, presentando la variación de los cortantes en función de la relación de rigidez de pilas. Se asigna el 30 % en X y 100 % del sismo en Y.

Las mayores demandas se dan en el sentido transversal del puente. Se presentan los resultados para los puentes curvos y los puentes rectos equivalentes.

5.7.2.1. Subestructura

5.7.2.1.1. Cortante basal transversal

La Figura V-35 y la Figura V-36 muestran el porcentaje basal de cortante transversal del puente curvo respecto al puente recto, en función de la relación de rigidez entre pilas adyacentes. Los datos corresponden al efecto del sismo en Y y se agrupan según el número de claros.

La Figura V-35 muestra la respuesta sísmica transversal de los puentes para un ángulo subtendido de 30° y la Figura V-36 para un ángulo de 90° . No se encuentra una tendencia clara en estos resultados, sin embargo se cumple que a partir de una $RP=3$, para la mayoría de modelos, la desviación tiende a incrementarse. Conservándose la tendencia encontrada para los modelos de RC, en los que la demanda de los puentes curvos es mayor que la demanda que experimenta el puente recto con las mismas características geométricas.

Los datos de cortante basal transversal obtenidos para los modelos de puente curvo con un ángulo de 30° en función de la relación de rigidez entre pilas (Figura V-35), presentan una desviación de aproximadamente un 3 % respecto a los puentes rectos equivalentes.

Mientras que, para los resultados correspondientes a un ángulo subtendido de 90° (Figura V-36) es de 25 %, lo cual implica que los datos del puente recto equivalente, en sentido transversal; no representan la demanda de fuerzas para el puente curvo y su modelaje como puente recto induce un diseño con menor capacidad.

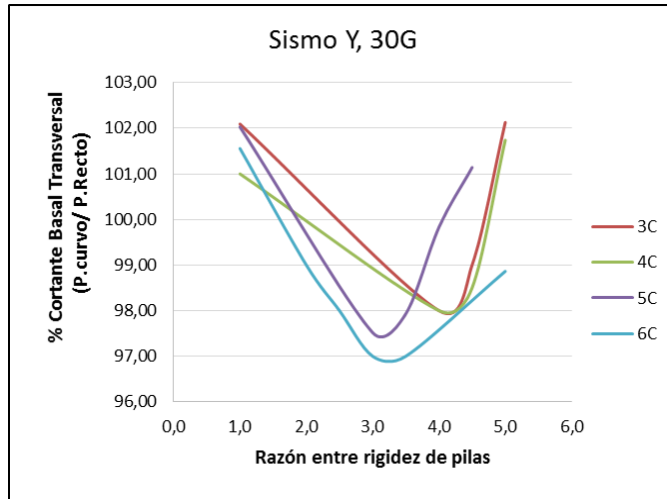


Figura V-35. Porcentaje de variación del cortante basal transversal (Puente Curvo/Puente Recto) en función de RP. Sismo Y, 30°.

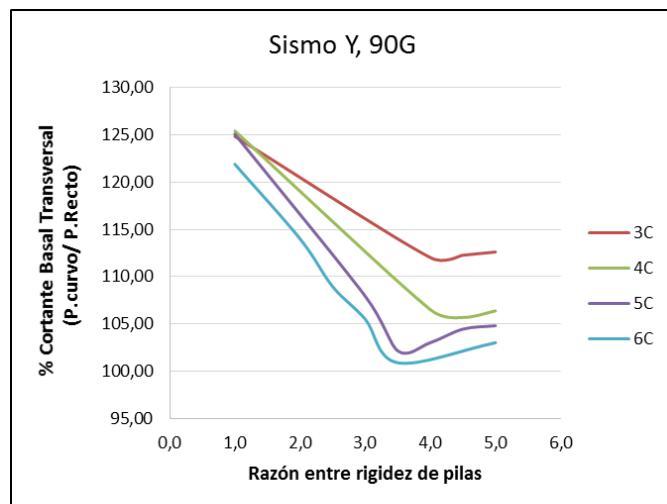


Figura V-36. Porcentaje de variación del cortante basal transversal (Puente Curvo/Puente Recto) en función de RP. Sismo Y, 90°.

En el Apéndice I y el Apéndice K, en la sección 2, se muestran todos los resultados de la razón de cortante basal transversal en función de la relación de rigidez entre pilas (RP). Los datos se agrupan según el ángulo de curvatura.

Las siguientes figuras permiten determinar el efecto de variar la rigidez entre pilas adyacentes en puentes curvos y puentes rectos. El Cuadro V-12 y la Figura V-37 muestran los resultados de comparar el cortante basal transversal del puente curvo respecto al cortante basal transversal del puente recto equivalente, es decir, aquel puente que posee las mismas

características geométricas del curvo pero un ángulo de 0°. Los datos son dependientes de la RP.

De igual forma, el Cuadro V-13 y la Figura V-38 se resumen los resultados que corresponden a la comparación del cortante basal transversal del puente curvo respecto al cortante basal transversal del puente recto que cumple una relación de rigidez entre pilas de 1, es decir, todas sus pilas poseen la misma rigidez.

En ambos casos se observa que la mayor variación se da para un ángulo de 90° cuando la RP=1 y tiende a disminuir cuando se incrementa la relación entre pilas.

Sin embargo, se cumple que una vez que se excede el criterio de regularidad (datos sombreados) la desviación de los datos se incrementa. El puente curvo tiene mayor demanda en sentido transversal debido al sismo Y, respecto al puente recto, tal como se observa en la Figura V-37.

Cuadro V-12. Comparación del cortante basal longitudinal. PC y PR equivalente. Sismo X, 3C. RP.

Claros 3	Razón de cortante basal transversal (PC/PR Equiv)					
	Ángulo (°)					
PC/PR	0	30	60	70	80	90
1,0	1,000	1,005	1,077	1,128	1,189	1,254
4,0	1,000	1,008	1,004	1,001	1,019	1,065
4,5	1,000	1,014	1,028	1,023	1,025	1,057
5,0	1,000	1,017	1,047	1,046	1,044	1,064
5,5	1,000	1,019	1,058	1,063	1,062	1,076

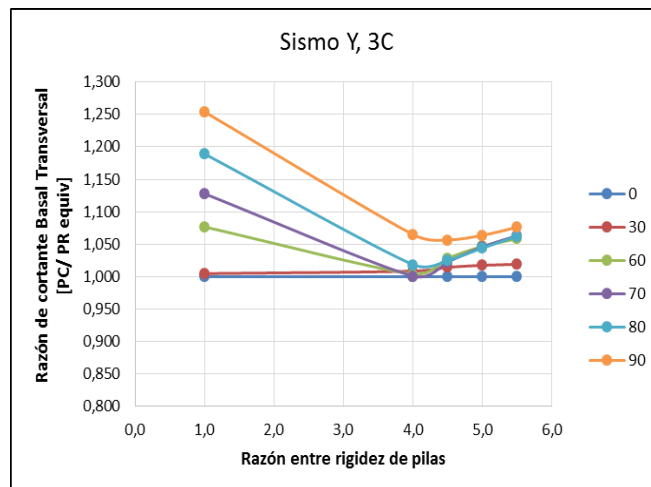


Figura V-37. Razón de cortante basal longitudinal en función de RP. Sismo Y. 3 claros. Puente curvo respecto a puente recto equivalente.

Cuadro V-13. Comparación del cortante basal longitudinal. PC y PR con RP=1. Sismo X, 3C. RP.

Claros	Razón de cortante basal transversal (PC/PR RP=1)					
	Ángulo (°)					
3	0	30	60	70	80	90
PC/PR	0	30	60	70	80	90
1,0	1,000	1,005	1,077	1,128	1,189	1,254
4,0	1,140	1,144	1,145	1,148	1,161	1,214
4,5	1,139	1,155	1,171	1,165	1,168	1,203
5,0	1,123	1,142	1,175	1,174	1,172	1,194
5,5	1,104	1,125	1,169	1,174	1,173	1,188

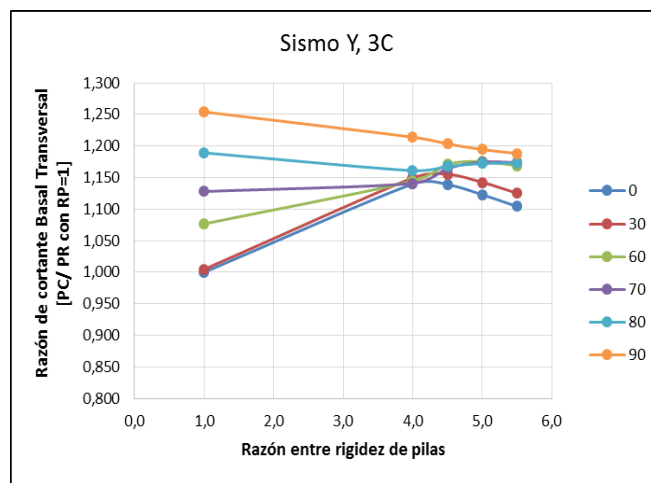


Figura V-38. Razón de cortante basal longitudinal en función de RP. Sismo Y. 3 claros. Puente curvo respecto a puente recto con relación entre pilas igual a 1.

Adicionalmente, interesa conocer la distribución de fuerzas transversales en cada pila de la subestructura, debido al efecto del sismo en Y. La Figura V-39 presenta los resultados para un ángulo de 80° y 4 claros. Así, cuando RP=1 las pilas externas tienen mayor demanda que la pila central. Sin embargo, conforme aumenta la relación entre rigidez de pilas la demanda de la pila central se incrementa respecto a las pilas externas, debido a que esta experimenta un aumento en la rigidez.

Dicho comportamiento también ocurre en sentido longitudinal y es análogo al análisis de fuerzas en sentido longitudinal debido al sismo X (Ver Figura V-40). En ambos casos se da una mayor demanda en la pila que aumenta la rigidez, la diferencia reside en que para la dirección longitudinal la demanda inicial en ambas pilas es similar, tanto para el puente curvo como para el recto equivalente, y en la dirección transversal esto no se cumple.

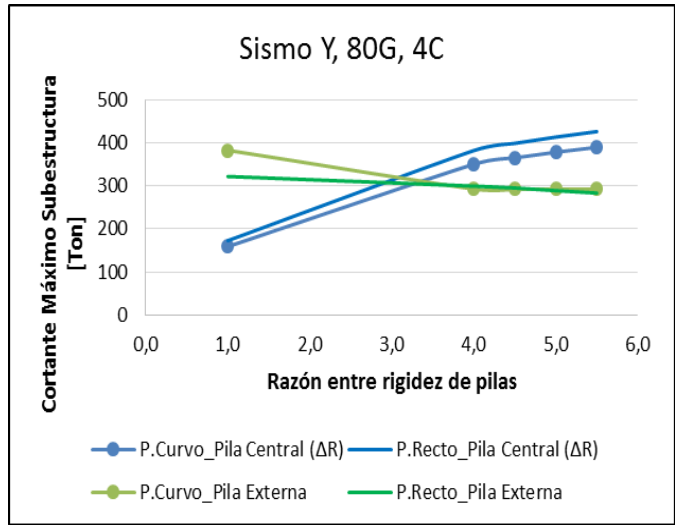


Figura V-39. Distribución del cortante basal transversal por pilas en función de RP. Sismo Y, 80°, 4C.

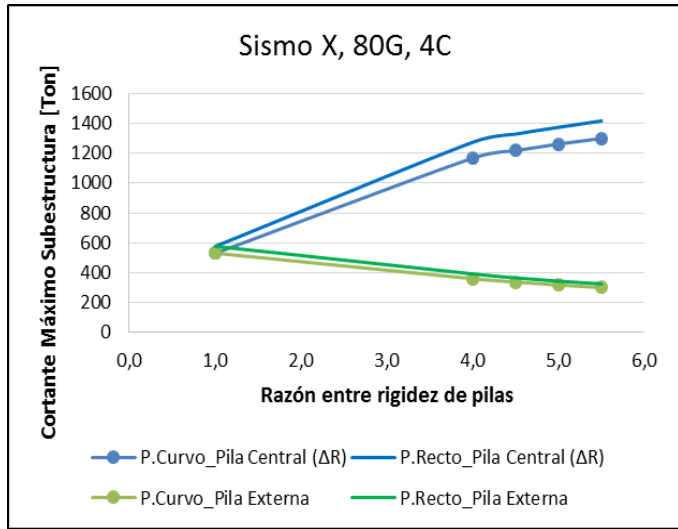


Figura V-40. Distribución del cortante basal longitudinal por pilas en función de RP. Sismo X, 80°, 4C.

En el Apéndice O, en la sección 2, se resumen los datos de cortante basal transversal en función de RP. La Figura V-41 presenta el cambio en el cortante basal transversal, producto del sismo en Y; y según la razón entre rigidez de pilas. Cada serie corresponde al puente curvo y su equivalente puente recto y distinto número de claros. Se cumple que conforme aumenta el número de claros aumenta la demanda de fuerzas, debido a que se adicionan masas al sistema.

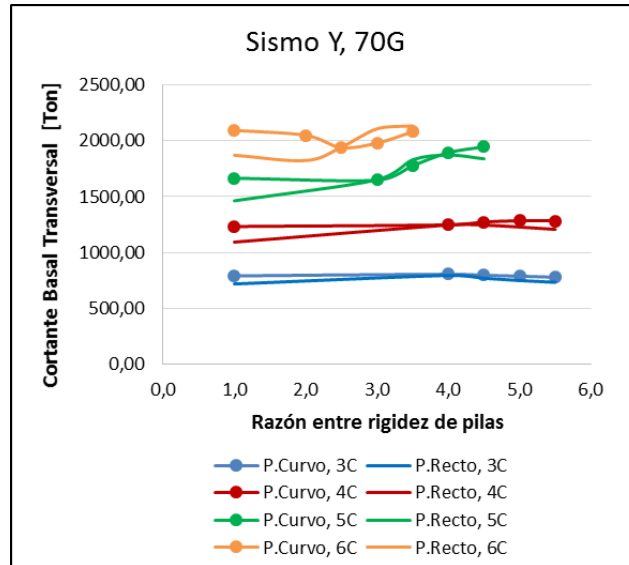


Figura V-41. Cortante Basal Transversal en función de RP. Sismo Y, 70°.

5.7.2.2. Superestructura

5.7.2.2.1. Desplazamientos

Los desplazamientos son mayores en sentido longitudinal aunque el 100 % del valor absoluto de las fuerzas sísmicas y momentos en los elementos corresponden al análisis en la dirección transversal. Se presenta a continuación los desplazamientos obtenidos en la dirección U1 (longitudinal) y en la dirección U2 (transversal) para una relación de rigidez de pilas de 3.

Tal como se muestra en la Figura V-43, para la dirección transversal, el desplazamiento del puente curvo, debido al sismo Y se incrementa conforme aumenta el ángulo subtendido y un número de claros dado. Lo cual concuerda con la tendencia del periodo en Y de la estructura analizada (Ver Figura V-47).

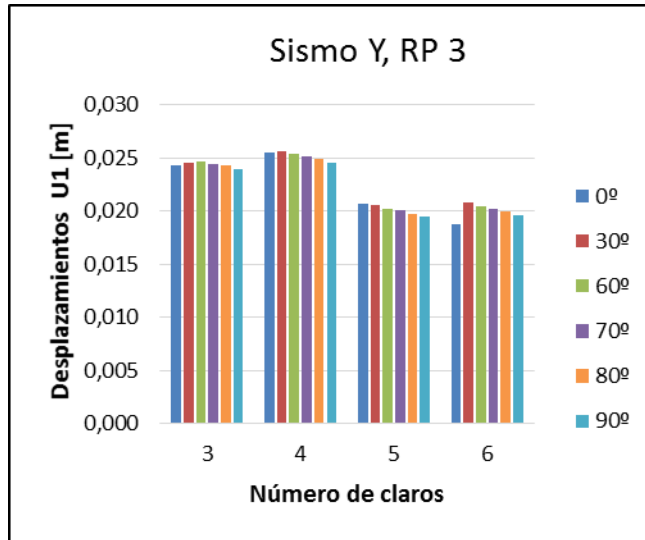


Figura V-42. U1 en función del número de claros. Sismo Y, RP=3.

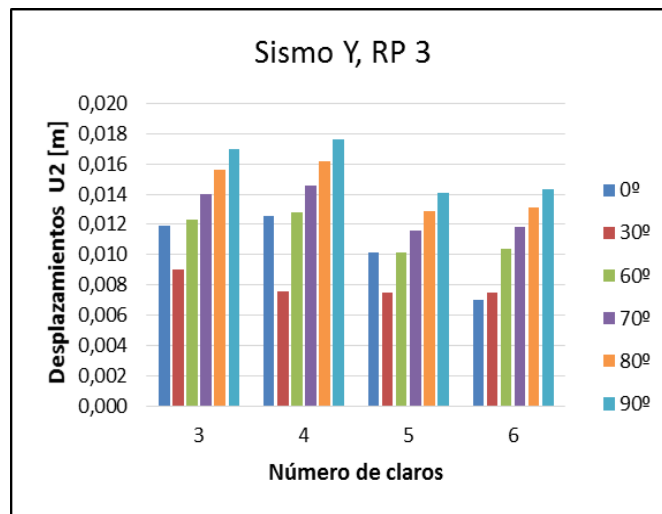


Figura V-43. U2 en función del número de claros. Sismo Y, RP= 3.

5.8. RESPUESTA MODAL

En esta sección, se presentan los periodos de los modelos de puentes, cuando se varia la relación de longitud entre claros adyacentes y la relación de rigidez entre pilas adyacentes. El periodo para los modelos con variación en el ángulo subtendido presenta la misma tendencia que los de la sección 5.8.1.

5.8.1. Relación de longitud entre claros adyacentes

5.8.1.1. Periodo en X

La Figura V-44 muestra el periodo en la dirección x en función del número de claros y los datos agrupados según el ángulo subtendido en planta, los datos se agrupan para una relación de longitud entre claros de 3 (RC 3).

A partir de los resultados de la respuesta modal se observa que para un ángulo y una RC dada al incrementar la cantidad de claros y por lo tanto de pilas del puente, el periodo en X disminuye. Esto se debe a que hay menor participación de masa por eje.

Asimismo, los datos de la Figura V-44 muestran que para una relación entre claros adyacentes dada y para la misma cantidad de claros no existe una diferencia significativa en el periodo en X de la estructura respecto al ángulo de curvatura.

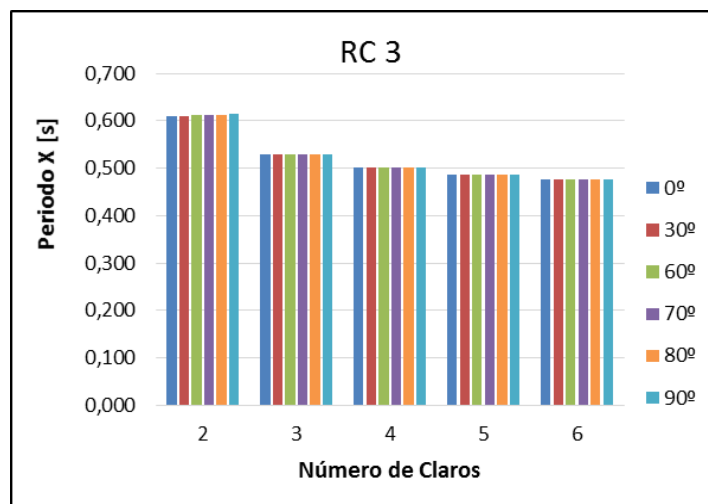


Figura V-44. Periodo X en función del número de claros. RC=3.

5.8.1.2. Periodo en Y

La Figura V-45 muestra el periodo en Y de los modelos de puentes curvos y rectos cuya relación entre longitudes de claros es de 3. Los datos muestran que para un número de claros dado el periodo aumenta conforme aumenta el ángulo de curvatura. Además el periodo del puente curvo en Y es mayor que el del puente recto equivalente.

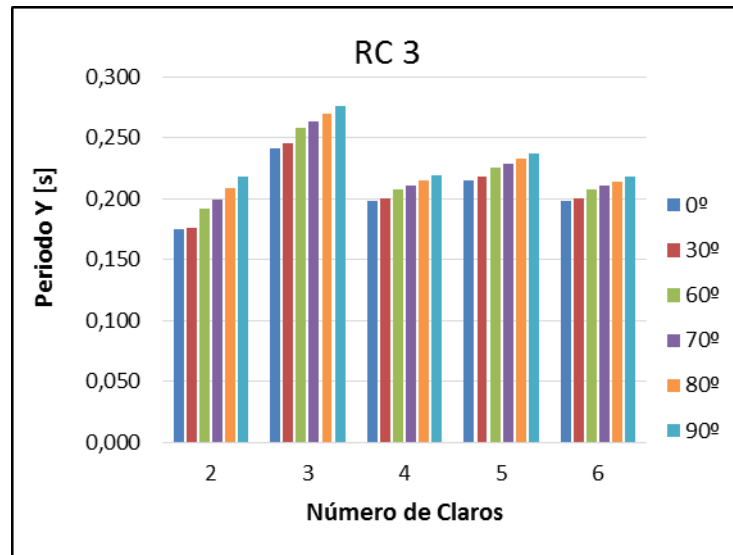


Figura V-45. Periodo Y en función del número de claros. RC=3.

5.8.2. Rigidez entre pilas adyacentes

5.8.2.1. Periodo en X

Los resultados obtenidos para los modelos de puentes en los que se varía la relación de rigidez entre pilas muestran que, conforme aumenta el número de claros, el periodo en X de la estructura disminuye. Dicho comportamiento se muestra en la Figura V-46, la cual presenta los resultados para una relación de rigidez entre pilas de 3. Según los criterios de regularidad de AASHTO para este caso específico, los modelos con ángulo subtendido de 30° y con 3, 4 y 5 claros son puentes regulares. Se observa además que el periodo de los puentes curvos es mayor al periodo de los puentes rectos equivalentes.

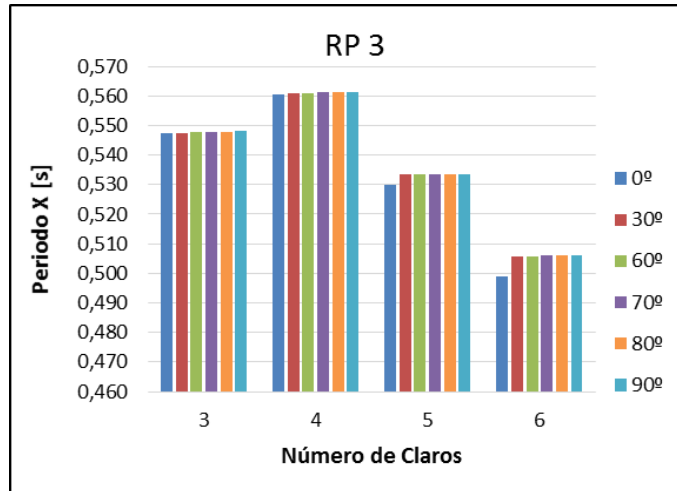


Figura V-46. Periodo X en función del número de claros. RP=3.

5.8.2.2. Periodo en Y

En la Figura V-47 se muestra el periodo Y de los modelos de puentes cuando la relación de rigidez entre pilas es de 1. De la figura se sabe que cumpliendo el criterio de regularidad para longitud de claros, conforme aumenta el ángulo subtendido en planta aumenta el periodo. La misma tendencia ocurre al aumentar la relación entre longitudes de claros. Además el periodo de los puentes con curvatura en planta es mayor que el del puente recto equivalente.

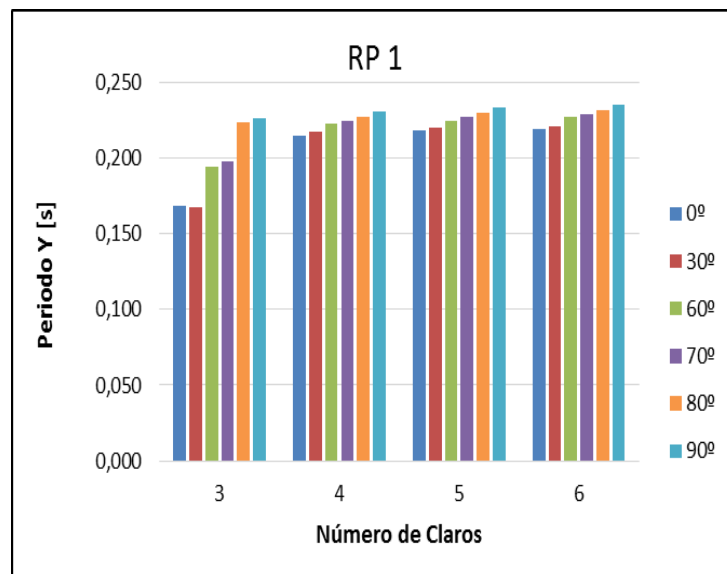


Figura V-47. Periodo Y en función del número de claros. RP=1.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

El propósito de esta investigación es el de evaluar la hipótesis de las Especificaciones AASHTO LRFD, en la que se establece que mientras se cumplan los requisitos de regularidad, los puentes curvos pueden ser analizados como puentes rectos. Para este propósito se elaboran distintos modelos de puentes curvos y su equivalente puente recto, en los que modifican dichos parámetros de regularidad (Ver Cuadro III-1).

A partir de los resultados obtenidos de los distintos modelos de puentes, los criterios de regularidad de AASHTO LRFD, la condición de apoyos seleccionada y el análisis de resultados realizado en el CAPÍTULO V. se presentan las conclusiones de este estudio.

Dichas conclusiones se refieren al efecto del Sismo X y del Sismo Y en los modelos de puentes curvos y rectos. Las conclusiones corresponden a la fuerza cortante basal del puente. Los datos se agrupan según el periodo y los desplazamientos obtenidos y según la variable que se modifica: ángulo subtendido en planta, relación de longitud entre claros adyacentes y relación de rigidez entre pilas adyacentes.

En general, la configuración geométrica de los puentes con curvatura en planta determina la respuesta sísmica de estas estructuras. Específicamente, las siguientes variables: la cantidad de claros, el ángulo subtendido en planta, la relación de longitudes entre claros adyacentes y la relación de rigidez entre pilas adyacentes.

6.1.1. Periodo

- Conforme se incrementa la cantidad de claros del puente (curvo y recto) menor es el periodo en la dirección X. Esto ocurre debido a la menor cantidad de masa por eje (por pila).
- Para el periodo X, no hay variación significativa para un número dado de claros, cuando se incrementa el ángulo de curvatura.
- Mientras que para un número dado de claros, el periodo en Y de las estructuras aumenta cuando se incrementa el ángulo subtendido en planta.
- En todos los casos, el periodo en Y del puente curvo es mayor que el del puente recto.

6.1.2. Ángulo subtendido en planta

- Conforme aumenta el ángulo, el cortante basal longitudinal producto del sismo en X disminuye. Mientras que cuando se aplica el sismo en Y, al aumentar el ángulo, el cortante basal transversal aumenta.
- En el primer caso, esta respuesta sísmica del puente se debe a que al incrementar la curvatura de la superestructura, la rigidez también aumenta y la subestructura está sujeta a una menor demanda en sentido longitudinal.
- No obstante, en el segundo caso se debe considerar la condición de apoyos, la cual permite que exista desplazamiento en la dirección en X, esto produce un cambio en la curvatura de modo que el puente pierde rigidez y está sujeto a una demanda de fuerzas mayor.

6.1.3. Relación de longitudes entre claros adyacentes

- En todos los modelos a los que se les aplica el sismo en X, si se aumenta la relación de longitud entre claros adyacentes, la razón PC/PR disminuye. Esto quiere decir, que el puente recto equivalente experimenta una mayor demanda sísmica que el puente curvo, en sentido longitudinal; cuando se incrementa la RC.
- Al comparar los resultados del sismo X y tomando el ángulo subtendido como constante, se concluye que en los casos en los que se analiza la razón PC/PR longitudinal en función de RC, para ángulos menores o iguales a 30° , la desviación de los datos permite concluir que modelar el puente curvo como puente recto no es conservador.
- Mientras que para ángulos mayores la desviación aumenta hasta un 15%, por lo que si se diseña el puente curvo como recto se estará sobrediseñando el puente.
- Para el caso en que se analiza el efecto del sismo en Y, en general, si se aumenta la relación de longitudes entre claros adyacentes y una vez que se excede el criterio de regularidad para RC; la razón PC/PR transversal disminuye.
- Al mantener el ángulo constante y comparar los resultados, se concluye que para ángulos menores a 30° , la comparación PC/PR transversal en función de RC, ofrece una desviación de aproximadamente un 10%. Para ángulos mayores este porcentaje aumenta.

- En todos los casos en los que se analiza el sismo en Y, se obtiene una razón de PC/PR transversal mayor a 1, lo cual denota que el puente recto experimenta una menor demanda que el puente curvo, transversalmente. Lo cual implica que si se modela el puente curvo como puente recto, una vez excedido el criterio de regularidad; se subdiseñará la estructura.
- En ambas direcciones de análisis, se obtiene una mayor desviación en los resultados si se varía RC que por variar el ángulo subtendido.

6.1.4. Relación de rigidez entre pilas

- De la respuesta sísmica longitudinal del sismo en X, se concluye que cuando se compara la razón de cortante basal longitudinal del puente curvo respecto al puente recto, el porcentaje de desviación de los datos aumenta conforme aumenta la relación de rigidez entre pilas adyacentes.
- Manteniendo constante el ángulo subtendido en planta y al comparar el cortante basal longitudinal del PC/PR en función de RP, se obtiene que para ángulos menores o iguales a 30°, la desviación máxima es de un 1,5%. Dicho ángulo corresponde al límite de regularidad establecido por AASHTO.
- Para ángulos mayores a 30°, la desviación en la razón de cortante basal longitudinal (PC/PR) se incrementa. Esto implica que diseñar el puente curvo como puente recto implica sobrediseñar la estructura hasta en un 11%.
- De la respuesta sísmica transversal producto de aplicar el sismo en Y, se concluye que en general cuando se incrementa RP, y una vez excedido el criterio de regularidad correspondiente; la desviación de los datos (PC/PR) tiende a incrementarse.
- De la comparación del cortante basal transversal de PC/PR en función de RP, y manteniendo el ángulo subtendido en planta constante, se concluye que para ángulos menores a 30° la desviación de los datos es de un 3% mientras que para ángulos mayores es de aproximadamente un 25%.
- En todos los casos en los que se analiza la respuesta sísmica transversal, se obtiene una razón de PC/PR mayor a 1, es decir, la demanda del puente recto es mayor que la demanda de cortante transversal del puente curvo.

- En ambas direcciones de análisis, se obtiene una mayor desviación en los resultados por variar RP que por variar el ángulo subtendido.

6.1.5. Desplazamientos

- Para el sismo en X conforme aumenta el ángulo subtendido en planta el desplazamiento longitudinal U1 del puente disminuye. Esta tendencia confirma el hecho de que a mayor curvatura el efecto axial es más importante porque se generan momentos adicionales y la estructura es por lo tanto más rígida que la del puente recto equivalente.
- Para el sismo en Y, los desplazamientos del puente curvo en sentido transversal son mayores a los del puente recto equivalente. Sin embargo, en general el desplazamiento U1 es mayor que U2, esto debido a la condición de apoyos.

Finalmente, en todos los casos analizados, se observa que la máxima desviación obtenida en los datos es del 25% (para un ángulo de 90°). Queda a criterio del diseñador considerar si está variación en los datos es significativa. Ya que al modelar el puente curvo como puente recto se desprecia el momento adicional en las pilas producto de la excentricidad de la carga gravitacional y la torsión que experimentan las vigas longitudinales.

Se concluye, que al cumplir el criterio de regularidad para el ángulo subtendido, en ambas direcciones (longitudinal y transversal) modelar el puente curvo como puente recto ofrece una buena aproximación en las fuerzas reales que experimenta el puente. Aun cuando se exceda RC y RP.

Sin embargo, la desviación de los datos (comparación del cortante basal PC/PR) aumenta conforme los criterios de regularidad establecidos por AASHTO se exceden. En general, para la condición de apoyos dada, la demanda longitudinal es mayor en puentes rectos y en sentido transversal la demanda mayor la experimentan los puentes curvos.

6.2. RECOMENDACIONES

- Se propone establecer mayor cantidad de casos para los modelos de relación entre longitud de claros. En esta investigación se consideran los casos para un factor de incremento de 0,5 y va de una relación entre longitud de claros adyacentes de 1 hasta 3,5 en la mayoría de casos.
- Se propone establecer una única longitud de la superestructura y variar la cantidad de claros y la longitud de estos, para verificar a partir de estos modelos los criterios de regularidad establecidos en las Especificaciones AASHTO LRFD.
- Debido a que la condición de apoyos en los bastiones puede impactar significativamente la respuesta sísmica de puentes curvos, se recomienda realizar una investigación en la que se consideren distintos tipos de restricción en los bastiones.
- Se recomienda estudiar el comportamiento de apoyos con aislamiento sísmico en la respuesta ante sismo de los puentes curvos.
- Se propone considerar en futuras investigaciones, el efecto de variar la superelevación en la respuesta sísmica de puentes curvos.
- Se pueden realizar modelos de puentes curvos en los que se modifique la rigidez de la superestructura y se contraste con los modelos en que se varía la relación entre rigidez de pilas adyacentes.

BIBLIOGRAFÍA

Artículos

- Abdel Salam, N., & Heins, C. (1998). Seismic Response of Curved Steel Box Girder Bridges. *Journal of Structural Engineering*, 2790-2800. Obtenido de www.ascelibrary.org
- Amorn, W., Tuan, C., & Tadros, M. (2008). Curved, Precast, Pretensioned Concrete I-Girder Bridges. *Civil Engineering Faculty Publications. Paper 3*. Obtenido de <http://digitalcommons.unomaha.edu/civilengfacpub/3>
- Chavel, B. (2008). *Construction and Detailing Methods of Horizontally Curved Steel I Girder Bridges*. For Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, University of Pittsburgh, Swanson School of Engineering , USA. Obtenido de http://d-scholarship.pitt.edu/6439/1/Chavel_ETD_27MAR08.pdf
- González, R., Villarreal, G., & Martines, S. (Enero-Abril de 2007). Puentes Curvos de Trabes de Acero y Losa de Concreto: Sus Dilemas de Diseño y Construcción. *Ciencia Fic*, 1(1), 19-31.
- Hall, D., Grubb, M., & Yoo, C. (1999). *Improved Design Specifications for Horizontally Curved Steel Girder Highway Bridges*. NCHRP Report 424. Washington, DC: Transportation Research Board. National Research Council.
- Hoffman, J. J. (2013). *Analytical and Field Investigation of Horizontally Curved Girder Bridges*. *Graduate Theses and Dissertations. Paper 13104*. Iowa State University.
- Itani, A., & Reno, M. (2000). Horizontally Curved Bridges. En W.-F. Chen, & L. Duan, *Bridge Engineering Handbook*. Boca Ratón: CRC Press. Obtenido de <http://freeit.free.fr/Bridge%20Engineering%20HandBook/ch15.pdf>
- Jung, S.-K., & White, D. (2011). *Inelastic Strength Behavior of Horizontally Curved Composite I-Girder Bridge Structural System Fixed-End Bridge FEA Study*. Atlanta, USA: Georgia Institute of Technology.
- Khan, E., Kowalsky, M., & Nau, J. (2012). *Comparison of the Seismic Performance of Equivalent Straight and Curved Bridges due to Transverse Seismic Excitation*. North Carolina State University, USA: 15 WCEE Lisboa 2012.

- Klikowicz, P., Salamak, M., Pradelok, S., & Lazinsky, P. (2013). *Specific Problems of Bridges with Big Curvature in Plan*. Silesian University of Technology. Institute of Civil Engineering, Roads and Bridges Department. Poland: Congress on Concrete Engineering CCC 2013.
- Levi, M., Monzon, E., Saad, A., Sanford, D., Wibowo, H., Wieser, J., . . . Sanders, D. (2012). Seismic Response of Horizontally Curved Bridges. Universidad de Nebraska Reno. Obtenido de http://www.pwri.go.jp/eng/ujnr/tc/g/pdf/28/28-6-4_Sanders.pdf
- Linzell, D., & Nadakuditi, V. (2011). Parameters influencing seismic response of horizontally curved, steel, I-girder bridges. *Steel and Composite Structures Journal*. Volume 11, Issue 1, 21-38.
- Liu, Z., & Wang, T. (2011). 291-Application of Lead Rubber Bearing in Curved Continuous Bridge. En G. H. Li, & C. Yon Chen, *Advanced Building Materials*. Trans Tech Publications Ltd. Obtenido de <http://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt009LEMNO/advanced-building-materials/application-lead-rubber>
- Lydzinski, J., & Baber, T. (2008). *Finite Element Analysis of the Wolf Creek Multispan Curved Girder Bridge*. Charlottesville, Virginia: Virginia Transportation Research Council, FHWA/VTRC 08-CR8.
- Manterola, J. (2006). *Puentes: Apuntes para su Diseño, Cálculo y Construcción*. CICCIP (Colección Escuelas).
- Mendez, C., Hayashikawa, T., & Gil, J. (2009). Damage Evaluation of Curved Steel Bridges Upgraded with Isolation Bearings and Unseating Prevention Cable Restrainers. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 3, 49-57.
- Pla-Junca, P. (2010). *Behavior of Typical Skewed and Curved Bridges in Extreme Seismic Events*. Irvine: University of California, Irvine. Obtenido de http://balsells.eng.uci.edu/files/2014/11/MStthesis_PPla10.pdf
- Saad, A., Sanders, D., & Buckle, I. (2012). *Impact of Rocking Foundations on horizontally Curved Bridge Systems Subjected to Seismic Loading*. <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784412367.056>: Structures Congress 2012: pp. 625-635.

- W.F., C., & Lian, D. (2014). *Bridge Engineering Handbook, Second Edition: Seismic Design*. CRC Press.
- Wibowo, H., Sanford, D. B., & Sanders, D. (2013). *The Effect of Live Load on the Seismic Response of Bridges*. Center for Civil Engineering Earthquake Research, Department of Civil and Environmental Engineering, Universidad de Nevada, Reno: California Department of Transportation.
- Williams, D., & Godden, W. (1976). Multidirectional seismic response of a curved highway bridge. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 9(2).
- Wilson, T., Mahmoud, H., & Chen, S. (2014). Seismic performance of skewed and curved reinforced concrete bridges. *Engineering Structures*, 70, 158-167. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.03.039>

Códigos y Normas

- AASHTO. (2010). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (5th Edition) with 2010 Interim Revisions*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials. Obtenido de <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpAASHTO11/aashto-lrfd-bridge-design/aashto-lrfd-bridge-design>
- AASHTO. (2011; 2012; 2014). *AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design (2nd Edition) with 2012 and 2014 Interim Revisions*. Washington, D.C.: American Association of Highway Bridges and Transportation Officials. Obtenido de <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpAASHTO53/aashto-guide-specifications/aashto-guide-specifications>
- California Department of Transportation. (1995). Seismic Analysis of Bridge Structures, Section 8. En Caltrans, *Bridge Manual: Bridge Design Practice*. California. Obtenido de <http://www.dot.ca.gov/hq/esc/techpubs/manual/bridgemanuals/bridge-design-practice/page/section8.pdf>
- California Department of Transportation. (2015). Structural Modeling and Analysis. Chapter 4. En Caltrans, *Bridge Design Practice*. California. Obtenido de

http://www.dot.ca.gov/hq/esc/techpubs/manual/bridgemanuals/bridge-design-practice/pdf/bdp_4.pdf

Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA), Comisión permanente de estudio y revisión del CSCR. (2010). *Código Sísmico de Costa Rica 2010*. Cartago, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIAC). (2013). *Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes*. San José, Costa Rica: LanammeUCR.

Libros

Priestley, M. J., & Calvi, G. M. (1996). *Seismic Design and Retrofit of Bridges*. United States of America: John Wiley and Sons, Inc.

W.F., C., & Lian, D. (2014). *Bridge Engineering Handbook, Second Edition: Seismic Design*. CRC Press.

Tesis

Acero, J. A. (2004). *Comparación de las Normas Sísmicas más utilizadas para el Perú y sus Métodos de Análisis*. Lima: Tesis para optar por el grado Magister en Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Católica del Perú. Obtenido de http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/136/ACERO_JOSE_COMPARACION_NORMAS_SISMICAS.pdf?sequence=1

Chavel, B. (2008). *Construction and Detailing Methods of Horizontally Curved Steel I Girder Bridges*. Theses For Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, University of Pittsburgh, Swanson School of Engineering , USA. Obtenido de http://d-scholarship.pitt.edu/6439/1/Chavel_ETD_27MAR08.pdf

Grant, J. (2011). *Determinación de la respuesta sísmica de puentes sesgados de dos claros con libertad de movimiento en los bastiones*. San José: Tesis para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica.

Solís, T. (2010). *Determinación de la respuesta sísmica de puentes sesgados de un solo claro y con apoyos parcialmente restringidos*. San José: Tesis para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica.

APÉNDICE A: PUENTE CURVO SOBRE EL RÍO BARRANCA



Figura A-1. Vista lateral- Puente sobre el Río Barranca

Fuente: <http://asoprocarretera.blogspot.com/p/fotografias.html>



Figura A-2. Vista a lo largo de la línea de centro- Puente sobre el Río Barranca

Fuente: <http://asoprocarretera.blogspot.com/p/fotografias.html>

APÉNDICE B: ESPECTRO DE DISEÑO

DETERMINACIÓN DEL ESPECTRO DE DISEÑO

Para la construcción del espectro de diseño se emplea el procedimiento general de la sección 2.4 de los Lineamientos (2013). La Figura B-1 muestra la forma espectral y las ecuaciones empleadas.

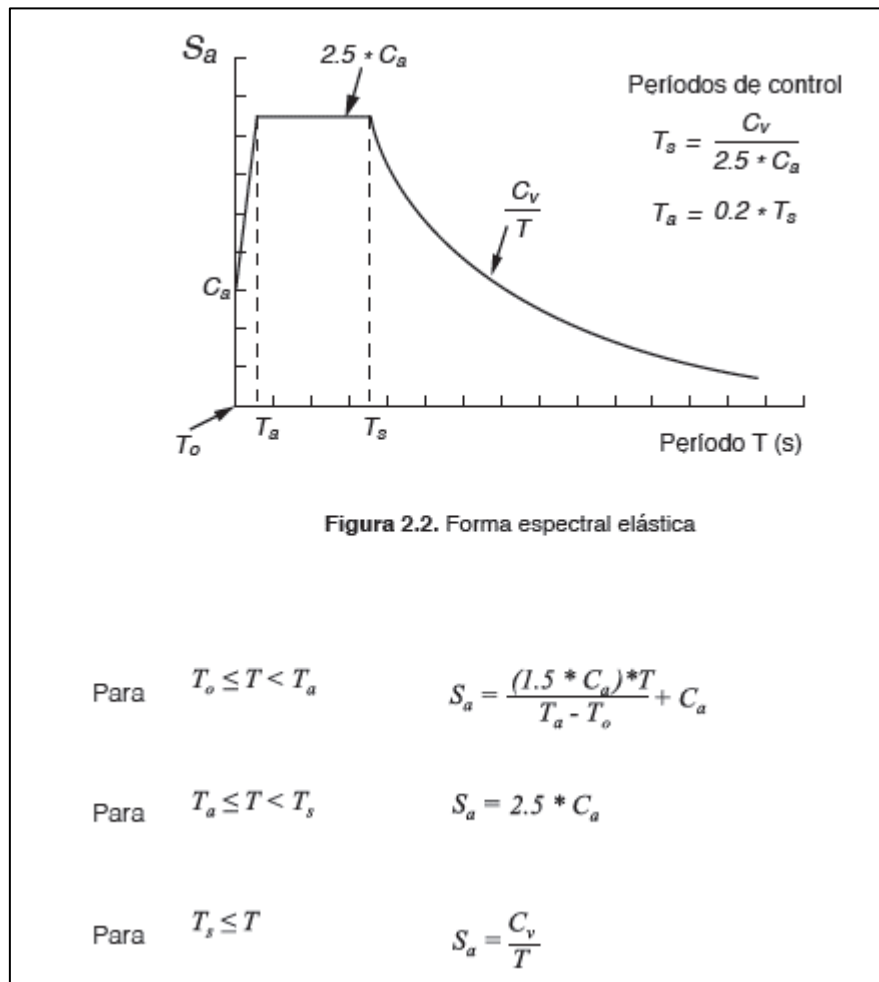


Figura B-1. Determinación del espectro de diseño

Fuente: (CFIA, 2013)

Además se emplean los siguientes parámetros, obtenidos de la sección 2.3.2 de los Lineamientos:

Cuadro B-1. Coeficientes sísmicos espectrales C_a y C_v

Coeficientes Sísmicos Espectrales	Ca			Cv		
	Zona de Amenaza Sísmica			Zona de Amenaza Sísmica		
Sitio de Cimentación	II	III	IV	II	III	IV
S3	0,317	0,410	0,490	0,461	0,605	0,730

Los valores de C_a y C_v correspondientes a una zona de amenaza sísmica III se sustituyen en las ecuaciones de la Figura B-1 y se emplea un periodo bajo (T_0) de 0,01 s. C_a y C_v se denominan coeficientes sísmicos espectrales para los periodos corto y largo, respectivamente.

El espectro de diseño obtenido para un sitio de cimentación S3 y una zona Z3 se muestra en la siguiente figura.

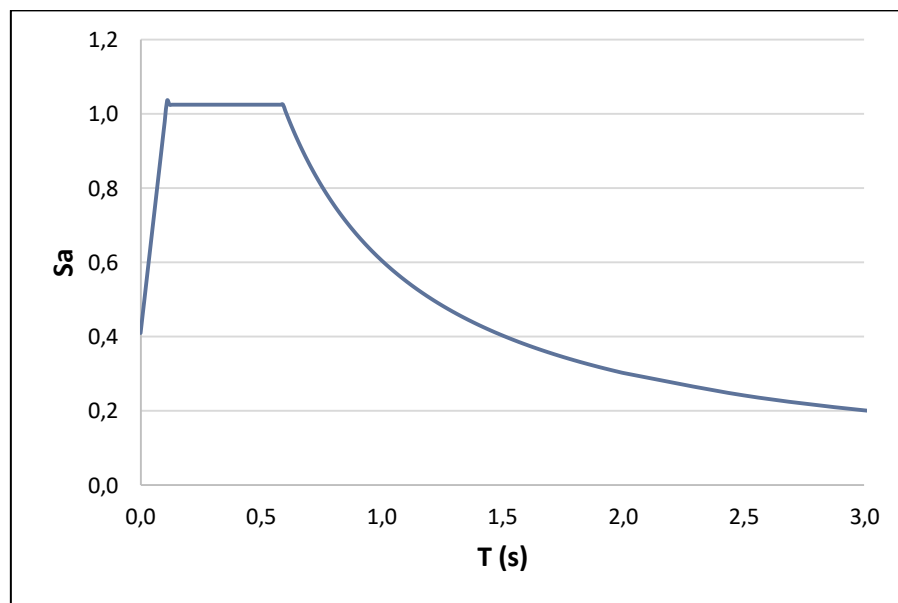


Figura B-2. Espectro de diseño para sitio de cimentación S3 y zona de amenaza sísmica Z3

APÉNDICE C: SECCIONES

SUPERESTRUCTURA

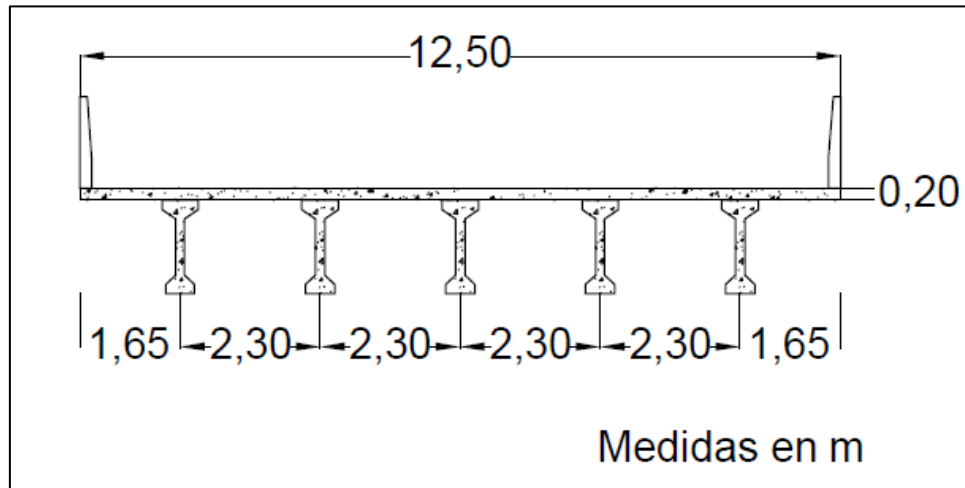


Figura C-1. Dimensiones de la superestructura

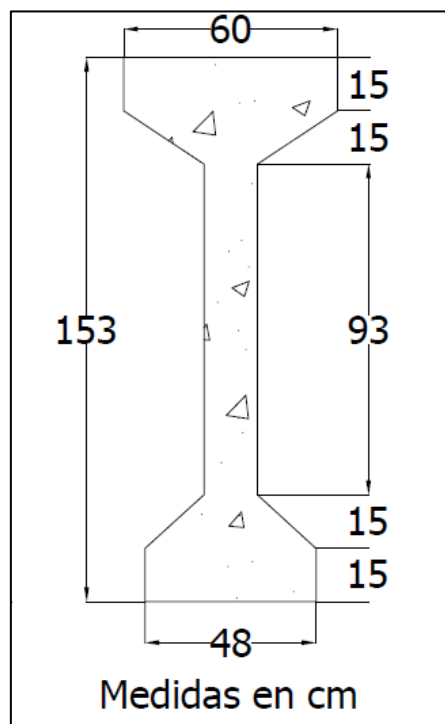


Figura C-2. Dimensiones de las vigas longitudinales

SUBESTRUCTURA

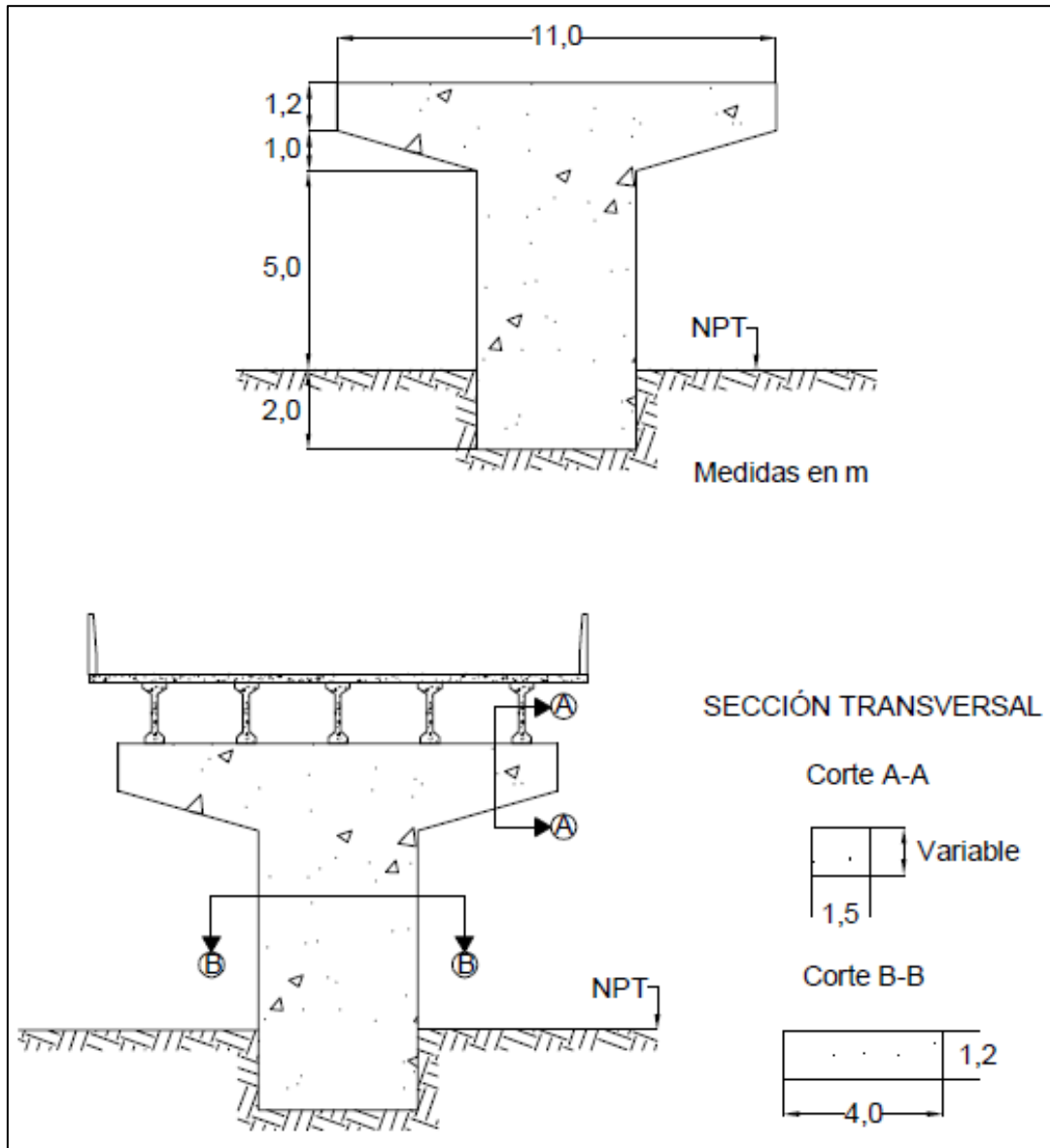


Figura C-3. Dimensiones de la subestructura

APÉNDICE D: NOMENCLATURA Y PARÁMETROS DE MODELOS

Cuadro D- 1. Descripción y nomenclatura de modelos con variación en la relación de longitudes entre claros.

Ángulo (°)	Relación entre longitud de claros	Número de claros				
		2	3	4	5	6
0	1	V_0G, 2C, 1RC	V_0G, 3C, 1RC	V_0G, 4C, 1RC	V_0G, 5C, 1RC	V_0G, 6C, 1RC
	1,5	-	-	-	V_0G, 5C, 1,5RC	V_0G, 6C, 1,5RC
	2	V_0G, 2C, 2RC	V_0G, 3C, 2RC	V_0G, 4C, 2RC	V_0G, 5C, 2RC	V_0G, 6C, 2RC
	2,5	V_0G, 2C, 2,5RC	V_0G, 3C, 2,5RC	V_0G,4C, 2,5RC	V_0G, 5C, 2,5RC	V_0G,6C, 2,5RC
	3	V_0G, 2C, 3RC	V_0G, 3C, 3RC	V_0G_4C_3RC	V_0G, 5C, 3RC	V_0G, 6C, 3RC
	3,5	V_0G, 2C, 3,5RC	V_0G,3C, 3,5RC	V_0G,4C, 3,5RC	-	-
30	1	V_30G, 2C, RC	V_30G, 3C, 1RC	V_30G, 4C, 1RC	V_30G, 5C, 1RC	V_30G, 6C, 1RC
	1,5	-	-	-	V_30G, 5C, 1,5RC	V_30G,6C, 1,5RC
	2	V_30G, 2C, 2RC	V_30G, 3C, 2RC	V_30G, 4C, 2RC	V_30G, 5C, 2RC	V_30G, 6C, 2RC
	2,5	V_30G, 2C, 2,5RC	V_30G,3C, 2,5RC	V_30G, 4C, 2,5RC	V_30G, 5C, 2,5RC	V_30G,6C, 2,5RC
	3	V_30G, 2C, 3RC	V_30G, 3C, 3RC	V_30G, 4C, 3RC	V_30G, 5C, 3RC	V_30G, 6C, 3RC
	3,5	V_30G, 2C, 3,5RC	V_30G,3C, 3,5RC	V_30G,4C, 3,5RC	-	-
60	1	V_60G, 2C, 1RC	V_60G, 3C, RC	V_60G, 4C, 1RC	V_60G, 5C, 1RC	V_60G, 6C, 1RC
	1,5	-	-	-	V_60G,5C, 1,5RC	V_60G, 6C, 1,5RC
	2	V_60G, 2C, 2RC	V_60G, 3C, 2RC	V_60G, 4C, 2RC	V_60G, 5C, 2RC	V_60G, 6C, 2RC
	2,5	V_60G, 2C, 2,5RC	V_60G,3C, 2,5RC	V_60G,4C, 2,5RC	V_60, 5C, 2,5RC	V_60G,6C, 2,5RC
	3	V_60G, 2C, 3RC	V_60G, 3C, 3RC	V_60G, 4C, 3RC	V_60G, 5C, 3RC	V_60G, 6C, 3RC
	3,5	V_60G,2C, 3,5RC	V_60G,3C, 3,5RC	V_60G,4C, 3,5RC	-	-
70	1	V_70G, 2C, 1RC	V_70G, 3C, RC	V_70G, 4C, 1RC	V_70G, 5C, 1RC	V_70G, 6C, 1RC
	1,5	-	-	-	V_70G, 5C, 1,5RC	V_70G,6C, 1,5RC
	2	V_70G, 2C, 2RC	V_70G, 3C, 2RC	V_70G, 4C, 2RC	V_70G, 5C, 2RC	V_70G, 6C, 2RC
	2,5	V_70G,2C, 2,5RC	V_70G,3C, 2,5RC	V_70G,4C, 2,5RC	V_70G,5C, 2,5RC	V_70G, 6C, 2,5RC
	3	V_70G, 2C, 3RC	V_70G, 3C, 3RC	V_70G, 4C, 3RC	V_70G, 5C, 3RC	V_70G, 6C, 3RC
	3,5	V_70G, 2C, 3,5RC	V_70G, 3C, 3,5RC	V_70G,4C, 3,5RC	-	-
80	1	V_80G, 2C, 1RC	V_80G, 3C, RC	V_80G, 4C, 1RC	V_80G, 5C, 1RC	V_80G, 6C, 1RC
	1,5	-	-	-	V_80G, 5C, 1,5RC	V_80G, 6C, 1,5RC
	2	V_80G, 2C, 2RC	V_80G, 3C, 2RC	V_80G, 4C,2RC	V_80G, 5C, 2L	V_80G, 6C, 2RC
	2,5	V_80G,2C, 2,5RC	V_80G,3C, 2,5RC	V_80G,4C, 2,5RC	V_80G,5C, 2,5L	V_80G, 6C, 2,5RC
	3	V_80G, 2C, 3RC	V_80G, 3C, 3RC	V_80G, 4C, 3RC	V_80, 5C, 3L	V_80G, 6C, 3RC
	3,5	V_80G,2C, 3,5RC	V_80G, 3C, 3,5RC	V_80G, 4C, 3,5RC	-	-
90	1	V_90G, 2C, 1RC	V_90G, 3C, 1RC	V_90G, 4C, 1RC	V_90G, 5C, L	V_90G, 6C, 1RC
	1,5	-	-	-	V_90G, 5C, 1,5L	V_90G,6C, 1,5RC
	2	V_90G, 2C, 2RC	V_90G, 3C, 2RC	V_90G, 4C, 2RC	V_90G, 5C_2L	V_90G, 6C, 2RC
	2,5	V_90G,2C, 2,5RC	V_90G, 3C, 2,5RC	V_90G,4C, 2,5RC	V_90G, 5C_2,5L	V_90G,6C, 2,5RC
	3	V_90G, 2C, 3RC	V_90G, 3C, 3RC	V_90G, 4C, 3RC	V_90G, 5C, 3L	V_90G, 6C, 3RC
	3,5	V_90G,2C, 3,5RC	V_90G,3C, 3,5RC	V_90G,4C, 3,5RC	-	-

Cuadro D- 2. Descripción y nomenclatura de modelos con variación en la relación entre rigidez de pilas.

Ángulo (°)	Relación entre rigidez de pilas	Número de claros			
		3	4	5	6
0	1	V_0G, 3C, 1RP	V_0G, 4C, 1RP	V_0G, 5C, 1RP	V_0G, 6C, 1RP
	2	-	-	-	V_0G, 6C, 2RP
	2,5	-	-	-	V_0G, 6C, 2,5RP
	3	V_0G, 3C, 3RP	V_0G, 4C, 3RP	V_0G, 5C, 3RP	V_0G, 6C, 3RP
	3,5	-	-	V_0G, 5C, 3,5RP	V_0G, 6C, 3,5RP
	4	V_0G, 3C, 4RP	V_0G, 4C, 4RP	V_0G, 5C, 4RP	-
	4,5	V_0G, 3C, 4,5RP	V_0G, 4C, 4,5RP	V_0G, 5C, 4,5RP	-
	5	V_0G, 3C, 5RP	V_0G, 4C, 5RP	-	-
30	5,5	V_0G, 3C, 5,5RP	V_0G, 4C, 5,5RP	-	-
	1	V_30G, 3C, 1RP	V_30G, 4C, 1RP	V_30G, 5C, 1RP	V_30G, 6C, 1RP
	2	-	-	-	V_30G, 6C, 2RP
	2,5	-	-	-	V_30G, 6C, 2,5RP
	3	V_30G, 3C, 3RP	V_30G, 4C, 3RP	V_30G, 5C, 3RP	V_30G, 6C, 3RP
	3,5	-	-	V_30G, 5C, 3,5R	V_30G, 6C, 3,5RP
	4	V_30G, 3C, 4RP	V_30G, 4C, 4RP	V_30G, 5C, 4R	-
	4,5	V_30G, 3C, 4,5RP	V_30G, 4C, 4,5RP	V_30G, 5C, 4,5R	-
60	5	V_30G, 3C, 5RP	V_30G, 4C, 5RP	-	-
	5,5	V_30G, 3C, 5,5RP	V_30G, 4C, 5,5RP	-	-
	1	V_60G, 3C, 1RP	V_60G, 4C, 1RP	V_60G, 5C, 1RP	V_60G, 6C, 1RP
	2	-	-	-	V_60G, 6C, 2RP
	2,5	-	-	-	V_60G, 6C, 2,5RP
	3	V_60G, 3C, 3RP	V_60G, 4C, 3RP	V_60G, 5C, 3RP	V_60G, 6C, 3RP
	3,5	-	-	V_60G, 5C, 3,5RP	V_60G, 6C, 3,5RP
	4	V_60G, 3C, 4RP	V_60G, 4C, 4RP	V_60G, 5C, 4RP	-
70	4,5	V_60G, 3C, 4,5RP	V_60G, 4C, 4,5RP	V_60G, 5C, 4,5RP	-
	5	V_60G, 3C, 5RP	V_60G, 4C, 5RP	-	-
	5,5	V_60G, 3C, 5,5RP	V_60G, 4C, 5,5RP	-	-
	1	V_70G, 3C, 1RP	V_70G, 4C, 1RP	V_70G, 5C, 1RP	V_70G, 6C, 1RP
	2	-	-	-	V_70G_6C_2RP
	2,5	-	-	-	V_70G_6C_2,5RP
	3	V_70G, 3C, 3RP	V_70G, 4C, 3RP	V_70G, 5C, 3RP	V_70G_6C_3RP
	3,5	-	-	V_70G, 5C, 3,5RP	V_70G_6C_3,5RP
80	4	V_70G, 3C, 4RP	V_70G, 4C, 4RP	V_70G, 5C, 4RP	-
	4,5	V_70G, 3C, 4,5RP	V_70G, 4C, 4,5RP	V_70G, 5C, 4,5RP	-
	5	V_70G, 3C, 5RP	V_70G, 4C, 5RP	-	-
	5,5	V_70G, 3C, 5,5RP	V_70G, 4C, 5,5RP	-	-
	1	V_80G, 3C, 1RP	V_80G, 4C, 1RP	V_80G, 5C, 1RP	V_80G, 6C, 1RP
	2	-	-	-	V_80G, 6C, 2RP
	2,5	-	-	-	V_80G, 6C, 2,5RP
	3	V_80G, 3C, 3RP	V_80G, 4C, 3RP	V_80G, 5C, 3RP	V_80G, 6C, 3RP
90	3,5	-	-	V_80G, 5C, 3,5RP	V_80G, 6C, 3,5RP
	4	V_80G, 3C, 4RP	V_80G, 4C, 4RP	V_80G, 5C, 4RP	-
	4,5	V_80G, 3C, 4,5RP	V_80G, 4C, 4,5RP	V_80G, 5C, 4,5RP	-
	5	V_80G, 3C, 5RP	V_80G, 4C, 5RP	-	-
	5,5	V_80G, 3C, 5,5RP	V_80G, 4C, 5,5RP	-	-
	1	V_90G, 3C, 1RP	V_90G, 4C, 1RP	V_90G, 5C, 1RP	V_90G, 6C, 1RP
	2	-	-	-	V_90G, 6C, 2RP
	2,5	-	-	-	V_90G, 6C, 2,5RP
90	3	V_90G, 3C, 3RP	V_90G, 4C, 3RP	V_90G, 5C, 3RP	V_90G, 6C, 3RP
	3,5	-	-	V_90G, 5C, 3,5RP	V_90G, 6C, 3,5R
	4	V_90G, 3C, 4RP	V_90G, 4C, 4RP	V_90G, 5C, 4RP	-
	4,5	V_90G, 3C, 4,5RP	V_90G, 4C, 4,5RP	V_90G, 5C, 4,5RP	-
	5	V_90G, 3C, 5RP	V_90G, 4C, 5RP	-	-

APÉNDICE E: VARIACIÓN DE PARÁMETROS

RELACIÓN DE LONGITUDES DE CLAROS

Los siguientes cuadros muestran las longitudes de claros (L_i) según la relación de claros para puentes rectos. Los valores de longitud de los claros deben ser iguales al arco de cada claro para un puente con curvatura en planta, por lo que en este caso, los cuadros corresponden a un ángulo subtendido en planta de 30° (Ver Figura E- 1). Estos valores varían también según la cantidad de claros (N_c) y por lo tanto según la longitud total del puente (L_t).

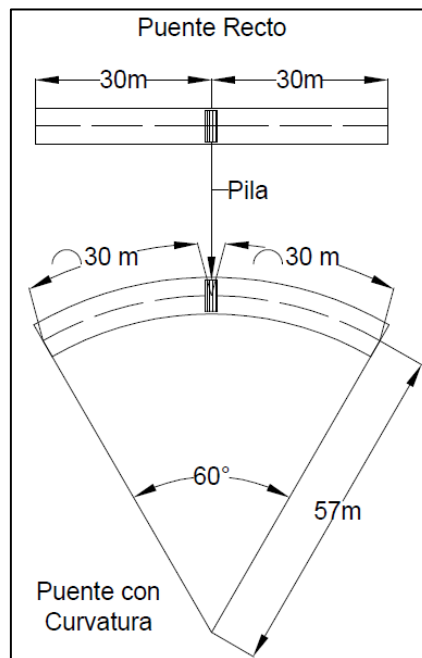


Figura E- 1. Comparación de la longitud del claro del puente recto y del arco del puente curvo

Cuadro E- 1. Relación de longitud entre claros adyacentes, para 2 claros

Caso	Ángulo ($^\circ$)		30	Nc	2
	L1 (m)	L2 (m)	Lt (m)	Relación	Regular
1	30,0	30,0	60,0	1,0	Sí
2	20,0	40,0	60,0	2,0	Sí
3	17,1	42,9	60,0	2,5	No
4	15,0	45,0	60,0	3,0	No
5	13,3	46,7	60,0	3,5	No

Cuadro E- 2. Relación de longitud entre claros adyacentes, para 3 claros

Caso	Ángulo (°) 30				Nc	3
	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	Lt (m)	Relación	Regular
1	30,0	30,0	30,0	90,0	1,0	Sí
2	22,5	45,0	22,5	90,0	2,0	Sí
3	20,0	50,0	20,0	90,0	2,5	No
4	18,0	54,0	18,0	90,0	3,0	No
5	16,4	57,3	16,4	90,0	3,5	No

Cuadro E- 3. Relación de longitud entre claros adyacentes, para 4 claros

Caso	Ángulo (°) 30					Nc	4
	L1 (m)	L2 (m)	L2 (m)	L4 (m)	Lt (m)	Relación	Regular
1	30,0	30,0	30,0	30,0	120,0	1,0	Sí
2	20,0	40,0	20,0	40,0	120,0	2,0	Sí
3	17,1	42,9	17,1	42,9	120,0	2,5	No
4	15,0	45,0	15,0	45,0	120,0	3,0	No
5	13,3	46,7	13,3	46,7	120,0	3,5	No

Cuadro E- 4. Relación de longitud entre claros adyacentes, para 5 claros

Caso	Ángulo (°) 30						Nc	5
	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	L5 (m)	Lt (m)	Relación	Regular
1	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	150,0	30,0	30,0
2	25,0	37,5	25,0	37,5	25,0	150,0	37,5	25,0
3	21,4	42,9	21,4	42,9	21,4	150,0	42,9	21,4
4	18,8	46,9	18,8	46,9	18,8	150,0	46,9	18,8
5	16,7	50,0	16,7	50,0	16,7	150,0	50,0	16,7

Cuadro E- 5. Relación de longitud entre claros adyacentes, para 6 claros

Caso	Ángulo (°) 30							Nc	6
	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)	L5 (m)	L6 (m)	Lt (m)	Relación	Regular
1	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	180,0	1,0	Sí
2	24,0	36,0	24,0	36,0	24,0	36,0	180,0	1,5	Sí
3	20,0	40,0	20,0	40,0	20,0	40,0	180,0	2,0	No
4	17,1	42,9	17,1	42,9	17,1	42,9	180,0	2,5	No
5	15,0	45,0	15,0	45,0	15,0	45,0	180,0	3,0	No

RELACIÓN DE RIGIDEZ ENTRE PILAS ADYACENTES

Los siguientes cuadros muestran la proporción de K (I/H^3) para cada pila de los puentes curvos, en este caso 30°; y para el respectivo puente recto equivalente. Se muestran también las dimensiones de las columnas rectangulares con mayor rigidez (n_2k_2): el ancho (a), el largo (b) y la altura de la columna (H). Las abreviación Nc y Nh significan: número de claros y número de pilas respectivamente.

El caso 1 de todas las tablas de esta sección es igual al caso 1 de la relación de longitudes de claros.

Cuadro E- 6. Relación entre rigidez de columnas/pilas de claros adyacentes, para 2 pilas

Caso	Ángulo (°) 30		Nc	3	Nh	2	
	Proporción K (m)		Relación	Regular	Columna II		
	I_1/H_1^3	I_2/H_2^3			a(m)	b(m)	H (m)
1	0,0017	0,0017	1,0	Sí	1,20	4,0	7,0
2	0,0017	0,0067	4,0	Sí	1,45	5,7	6,0
3	0,0017	0,0076	4,5	No	1,45	6,4	6,0
4	0,0017	0,0084	5,0	No	1,45	7,1	6,0
5	0,0017	0,0092	5,5	No	1,45	7,9	6,0

Cuadro E- 7. Relación entre rigidez de columnas/pilas de claros adyacentes, para 3 pilas

Caso	Ángulo (°) 30			Nc	4	Nh 3		
	Proporción K (m)			Relación	Regular	Columna II		
	I_1/H_1^3	I_2/H_2^3	I_3/H_3^3			a (m)	b (m)	H (m)
1	0,0017	0,0017	0,0017	1,0	Sí	1,20	4,0	7,0
2	0,0017	0,0067	0,0017	4,0	Sí	1,45	5,7	6,0
3	0,0017	0,0076	0,0017	4,5	No	1,45	6,4	6,0
4	0,0017	0,0084	0,0017	5,0	No	1,45	7,1	6,0
5	0,0017	0,0092	0,0017	5,5	No	1,45	7,9	6,0

Cuadro E- 8. Relación entre rigidez de columnas/pilas de claros adyacentes, para 4 pilas

Caso	Ángulo (°) 30				Nc	5	Nh 4		
	Proporción K (m)				Relación	Regular	Columna II y IV		
	I_1/H_1^3	I_2/H_2^3	I_3/H_3^3	I_4/H_4^3			a (m)	b (m)	H (m)
1	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	1,0	Sí	1,20	4,0	7,0
2	0,0017	0,0050	0,0017	0,0050	3,0	Sí	1,45	4,3	6,0
3	0,0017	0,0059	0,0017	0,0059	3,5	No	1,45	5,0	6,0
4	0,0017	0,0067	0,0017	0,0067	4,0	No	1,45	5,7	6,0
5	0,0017	0,0076	0,0017	0,0076	4,5	No	1,45	6,4	6,0

Cuadro E- 9. Relación entre rigidez de columnas/pilas de claros adyacentes, para 5 pilas

Caso	Ángulo (°) 30					Nc	6	Nh 5		
	Proporción K (m)					Relación	Regular	Columna II y IV		
	I_1/H_1^3	I_2/H_2^3	I_3/H_3^3	I_4/H_4^3	I_5/H_5^3			a (m)	b (m)	H (m)
1	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	0,0017	1,0	Sí	1,20	4,0	7,0
2	0,0017	0,0034	0,0017	0,0034	0,0017	2,0	Sí	1,45	3,6	6,5
3	0,0017	0,0042	0,0017	0,0042	0,0017	2,5	No	1,45	4,5	6,5
4	0,0017	0,0050	0,0017	0,0050	0,0017	3,0	No	1,45	5,4	6,5
5	0,0017	0,0059	0,0017	0,0059	0,0017	3,5	No	1,45	6,4	6,5

APÉNDICE F: VALIDACIÓN DEL MODELO

VERIFICACIÓN DE LA SUPERESTRUCTURA

Modelo

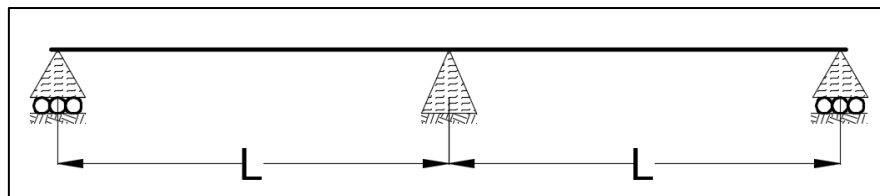


Figura F- 1. Modelo de viga continua

Determinación del peso propio de elementos

Cuadro F- 1. Peso propio de los elementos de la superestructura

Elemento*	Característica		Valor
Viga Longitudinal	Área	(m ²)	0,41
	Volumen	(m ³)	24,30
	Densidad	(Ton/m ³)	2,40
	Peso	(Ton/viga)	58,32
Losa	Área	(m ²)	2,50
	Volumen	(m ³)	150,00
	Densidad	(Ton/m ³)	2,40
	Peso	(Ton)	360,00

*/ Todos los elementos poseen una longitud de 60 m

Peso de losa según área tributaria

Cuadro F-2. Peso de losa según área tributaria para vigas longitudinales

Elemento	Característica		Valor
Viga Externa	Ancho Tributario	(m)	2,80
	Peso	(Ton/viga)	80,64
Viga Interna	Ancho Tributario	(m)	2,30
	Peso	(Ton/viga)	66,24

Carga permanente uniformemente distribuida

Se emplea la siguiente ecuación para el cálculo de las cargas distribuidas mostradas en el Cuadro F-3. La Figura F- 2 muestra la representación gráfica de la carga uniformemente distribuida.

$$w_p = \frac{\text{Peso viga} + \text{Peso losa}_{\text{tributario}}}{\text{Longitud de viga}} \quad [F - 1]$$

Cuadro F-3. Carga permanente uniformemente distribuida en vigas

Elemento	Característica	Valor
Viga Externa	Peso total (Ton/viga)	138,96
	Carga distribuida (Ton/m)	2,32
Viga Interna	Peso total (Ton/viga)	124,56
	Carga distribuida (Ton/m)	2,08

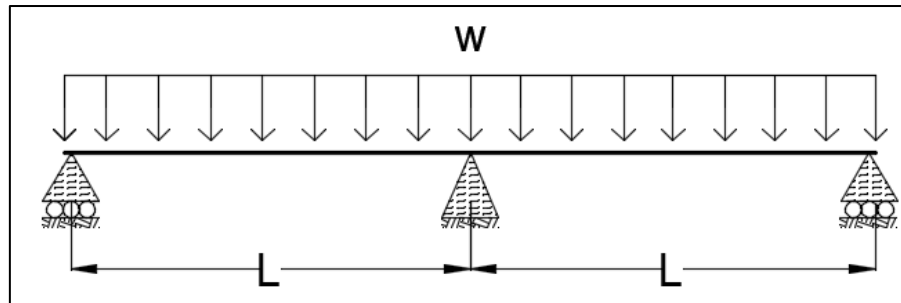


Figura F- 2. Carga uniformemente distribuida, modelo de viga continua

Determinación de Cortante, Momento y Reacciones

Debido a que la viga es continua y simétrica, se puede analizar solamente la mitad del modelo de la superestructura con el siguiente modelo auxiliar:

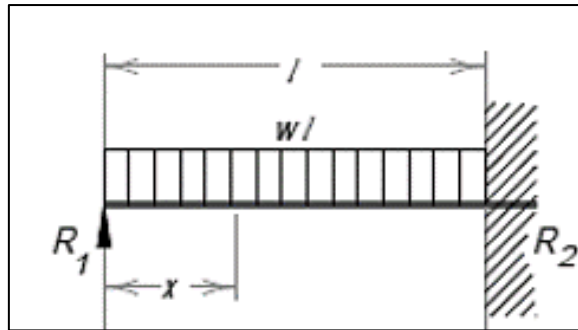


Figura F- 3. Estructura auxiliar

Fuente: American Institute of Steel

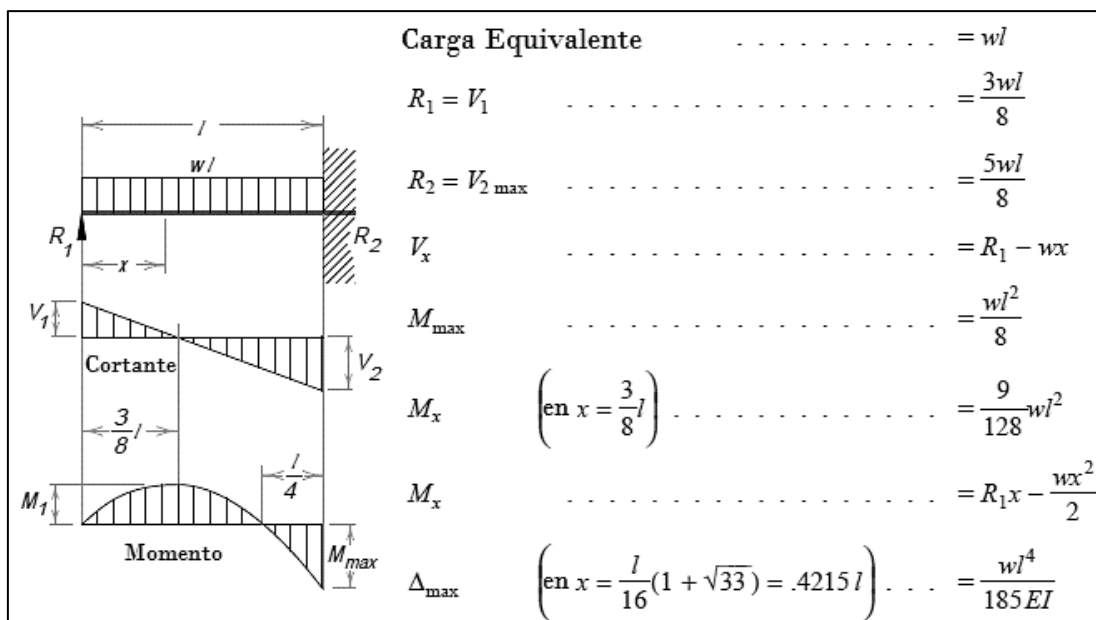


Figura F- 4. Diagramas $V(x)$ y $M(x)$ teóricos, viga empotrada en extremo

Fuente: American Institute of Steel

Modificado por: Salazar, 2015

Se considera solamente el peso propio de los elementos de la superestructura para determinar la carga w_p . No se mayoran las cargas para la revisión por carga permanente de la superestructura.

A continuación se muestran los diagramas de momento flector y esfuerzo cortante de las vigas externas del modelo de puente recto elaborado mediante el programa CSI Bridge.

- Momento (Ton.m)



Figura F- 5. Diagramas $M(x)$, viga externa

- Cortante (Ton)



Figura F- 6. Diagramas $V(x)$, viga externa

Comparación de resultados

El Cuadro F-4 muestra los valores de momento y cortante máximos y mínimos para los distintos casos considerados (modelo teórico, simplificado y real). Así, como el porcentaje de error de estas representaciones respecto al modelo teórico.

Cuadro F-4. Comparación de resultados para los modelos

Elemento	Esfuerzo	Valor	Modelo			% Error	
			Teorico ^A	Simplificado ^B	Real ^C	Simplificado	Real
Viga Externa	Momento	Apoyo interno (Ton.m)	260,55	259,95	261,74	0,23	0,46
		Centro claro (Ton.m)	146,56	147,14	151,87	0,40	3,61
	Cortante	Apoyo interno (Ton)	43,43	43,47	43,78	0,10	0,82
		Apoyo externo (Ton)	26,06	26,13	27,34	0,29	4,92
Viga Interna	Momento	Apoyo interno (Ton.m)	233,55	233,06	230,97	0,21	1,11
		Centro claro (Ton.m)	131,37	131,92	130,06	0,42	1,00
	Cortante	Apoyo interno (Ton)	38,93	38,97	42,04	0,12	8,00
		Apoyo externo (Ton)	23,36	23,43	22,80	0,32	2,37

^A/ Ver Figura F- 4

^B/ Modelo de viga continua

^C/ Modelo de puente recto de dos claros

Los resultados obtenidos de % de error se consideran aceptables debido a que aunque se idealiza la pila y viga cabezal como un apoyo de cuchilla, en el CSI Bridge para el ensamblaje de la superestructura y la subestructura se emplean apoyos tipo *Bearing*, a los cuales se les restringe los grados de libertad correspondientes a rotaciones. El porcentaje de error mayor es de 8% y corresponde al cortante en el apoyo interno para la viga interna.

APÉNDICE G: DESPLAZAMIENTOS

Cuadro G- 1. Resumen de desplazamientos para Sismo X y Sismo Y. RC.

Caso	Sismo X				Sismo Y			
	P. Curvo		P. Recto		P. Curvo		P. Recto	
	U1	U2	U1	U2	U1	U2	U1	U2
V_ 30G, 2C, 1RC	0,0983	0,0951	0,0256	0,0466	0,0295	0,0285	0,0077	0,0140
V_ 30G, 2C, 2RC	0,0985	0,0952	0,0256	0,0465	0,0295	0,0287	0,0082	0,0139
V_ 30G, 2C, 2,5RC	0,0986	0,0952	0,0256	0,0464	0,0296	0,0287	0,0092	0,0139
V_ 30G, 2C, 3RC	0,0987	0,0952	0,0256	0,0463	0,0296	0,0287	0,0101	0,0139
V_ 30G, 2C, 3,5RC	0,0988	0,0950	0,0256	0,0462	0,0296	0,0287	0,0110	0,0139
V_ 30G, 3C, 1RC	0,0769	0,0754	0,0200	0,0371	0,0231	0,0227	0,0095	0,0111
V_ 30G, 3C, 2RC	0,0770	0,0754	0,0199	0,0370	0,0231	0,0204	0,0149	0,0100
V_ 30G, 3C, 2,5RC	0,0770	0,0754	0,0199	0,0370	0,0231	0,0206	0,0179	0,0137
V_ 30G, 3C, 3RC	0,0770	0,0754	0,0199	0,0370	0,0232	0,0207	0,0207	0,0144
V_ 30G, 3C, 3,5RC	0,0771	0,0754	0,0199	0,0370	0,0232	0,0207	0,0233	0,0148
V_ 30G, 4C, 1RC	0,0685	0,0679	0,0178	0,0334	0,0205	0,0204	0,0078	0,0100
V_ 30G, 4C, 2RC	0,0685	0,0683	0,0179	0,0332	0,0206	0,0206	0,0130	0,0124
V_ 30G, 4C, 2,5RC	0,0685	0,0684	0,0179	0,0331	0,0206	0,0206	0,0142	0,0137
V_ 30G, 4C, 3RC	0,0686	0,0688	0,0180	0,0331	0,0206	0,0207	0,0149	0,0144
V_ 30G, 4C, 3,5RC	0,0642	0,0688	0,0168	0,0331	0,0206	0,0207	0,0154	0,0148
V_ 30G, 5C, 1RC	0,0642	0,0641	0,0168	0,0315	0,0193	0,0193	0,0084	0,0095
V_ 30G, 5C, 1,5RC	0,0642	0,0641	0,0167	0,0315	0,0193	0,0193	0,0100	0,0095
V_ 30G, 5C, 2RC	0,0642	0,0642	0,0167	0,0314	0,0193	0,0193	0,0124	0,0119
V_ 30G, 5C, 2,5RC	0,0641	0,0641	0,0167	0,0314	0,0193	0,0193	0,0141	0,0136
V_ 30G, 5C, 3RC	0,0641	0,0640	0,0167	0,0314	0,0193	0,0193	0,0152	0,0149
V_ 30G, 6C, 1RC	0,0616	0,0619	0,0161	0,0304	0,0185	0,0186	0,0080	0,0091
V_ 30G, 6C, 1,5RC	0,0617	0,0623	0,0162	0,0303	0,0185	0,0187	0,0107	0,0104
V_ 30G, 6C, 2RC	0,0618	0,0625	0,0162	0,0302	0,0185	0,0188	0,0124	0,0121
V_ 30G, 6C, 2,5RC	0,0618	0,0628	0,0163	0,0302	0,0186	0,0189	0,0132	0,0129
V_ 30G, 6C, 3RC	0,0618	0,0630	0,0164	0,0301	0,0186	0,0190	0,0136	0,0133
V_ 60G, 2C, 1RC	0,0995	0,0951	0,0501	0,0466	0,0299	0,0285	0,0150	0,0140
V_ 60G, 2C, 2RC	0,0999	0,0952	0,0503	0,0465	0,0300	0,0287	0,0151	0,0139
V_ 60G, 2C, 2,5RC	0,1000	0,0952	0,0503	0,0464	0,0300	0,0287	0,0151	0,0139
V_ 60G, 2C, 3RC	0,1000	0,0952	0,0504	0,0463	0,0300	0,0287	0,0151	0,0139
V_ 60G, 2C, 3,5RC	0,1001	0,0950	0,0505	0,0462	0,0300	0,0287	0,0152	0,0139
V_ 60G, 3C, 1RC	0,0769	0,0754	0,0386	0,0371	0,0231	0,0227	0,0116	0,0111
V_ 60G, 3C, 2RC	0,0768	0,0754	0,0384	0,0370	0,0231	0,0204	0,0162	0,0100
V_ 60G, 3C, 2,5RC	0,0768	0,0754	0,0384	0,0370	0,0230	0,0206	0,0195	0,0137
V_ 60G, 3C, 3RC	0,0768	0,0754	0,0384	0,0370	0,0230	0,0207	0,0226	0,0144
V_ 60G, 3C, 3,5RC	0,0768	0,0754	0,0383	0,0370	0,0230	0,0207	0,0253	0,0148
V_ 60G, 4C, 1RC	0,0679	0,0679	0,0341	0,0334	0,0204	0,0204	0,0103	0,0100
V_ 60G, 4C, 2RC	0,0679	0,0683	0,0343	0,0332	0,0204	0,0206	0,0141	0,0124
V_ 60G, 4C, 2,5RC	0,0678	0,0684	0,0344	0,0331	0,0204	0,0206	0,0154	0,0137
V_ 60G, 4C, 3RC	0,0678	0,0688	0,0344	0,0331	0,0204	0,0207	0,0162	0,0144
V_ 60G, 4C, 3,5RC	0,0678	0,0688	0,0345	0,0331	0,0204	0,0207	0,0167	0,0148
V_ 60G, 5C, 1RC	0,0633	0,0641	0,0319	0,0315	0,0190	0,0193	0,0097	0,0095
V_ 60G, 5C, 1,5RC	0,0633	0,0641	0,0319	0,0315	0,0190	0,0193	0,0113	0,0095
V_ 60G, 5C, 2RC	0,0632	0,0642	0,0318	0,0314	0,0190	0,0193	0,0137	0,0119
V_ 60G, 5C, 2,5RC	0,0632	0,0641	0,0317	0,0314	0,0190	0,0193	0,0154	0,0136
V_ 60G, 5C, 3RC	0,0632	0,0640	0,0317	0,0314	0,0190	0,0193	0,0167	0,0149

Caso	Sismo X				Sismo Y			
	P. Curvo		P. Recto		P. Curvo		P. Recto	
	U1	U2	U1	U2	U1	U2	U1	U2
V_ 60G, 6C, 1RC	0,0605	0,0619	0,0306	0,0304	0,0182	0,0186	0,0093	0,0091
V_ 60G, 6C, 1,5RC	0,0606	0,0623	0,0308	0,0303	0,0182	0,0187	0,0116	0,0104
V_ 60G, 6C, 2RC	0,0607	0,0625	0,0309	0,0302	0,0182	0,0188	0,0133	0,0121
V_ 60G, 6C, 2,5RC	0,0607	0,0628	0,0309	0,0302	0,0182	0,0189	0,0141	0,0129
V_ 60G, 6C, 3RC	0,0607	0,0630	0,0310	0,0301	0,0182	0,0190	0,0145	0,0133
V_ 70G, 2C, 1RC	0,0993	0,0951	0,0573	0,0466	0,0298	0,0285	0,0172	0,0140
V_ 70G, 2C, 2RC	0,0997	0,0952	0,0576	0,0465	0,0299	0,0287	0,0173	0,0139
V_ 70G, 2C, 2,5RC	0,0998	0,0952	0,0578	0,0464	0,0299	0,0287	0,0174	0,0139
V_ 70G, 2C, 3RC	0,0998	0,0952	0,0579	0,0463	0,0300	0,0287	0,0174	0,0139
V_ 70G, 2C, 3,5RC	0,0999	0,0950	0,0580	0,0462	0,0300	0,0287	0,0174	0,0139
V_ 70G, 3C, 1RC	0,0764	0,0754	0,0440	0,0371	0,0229	0,0227	0,0132	0,0111
V_ 70G, 3C, 2RC	0,0763	0,0754	0,0438	0,0370	0,0229	0,0204	0,0168	0,0100
V_ 70G, 3C, 2,5RC	0,0763	0,0754	0,0437	0,0370	0,0229	0,0206	0,0203	0,0137
V_ 70G, 3C, 3RC	0,0763	0,0754	0,0437	0,0370	0,0229	0,0207	0,0234	0,0144
V_ 70G, 3C, 3,5RC	0,0762	0,0754	0,0436	0,0370	0,0229	0,0207	0,0263	0,0148
V_ 70G, 4C, 1RC	0,0673	0,0679	0,0388	0,0334	0,0202	0,0204	0,0117	0,0100
V_ 70G, 4C, 2RC	0,0673	0,0683	0,0391	0,0332	0,0202	0,0206	0,0147	0,0124
V_ 70G, 4C, 2,5RC	0,0672	0,0684	0,0392	0,0331	0,0202	0,0206	0,0159	0,0137
V_ 70G, 4C, 3RC	0,0672	0,0688	0,0392	0,0331	0,0202	0,0207	0,0167	0,0144
V_ 70G, 4C, 3,5RC	0,0672	0,0688	0,0393	0,0331	0,0202	0,0207	0,0173	0,0148
V_ 70G, 5C, 1RC	0,0627	0,0641	0,0363	0,0315	0,0188	0,0193	0,0110	0,0095
V_ 70G, 5C, 1,5RC	0,0626	0,0641	0,0362	0,0315	0,0188	0,0193	0,0119	0,0095
V_ 70G, 5C, 2RC	0,0625	0,0642	0,0361	0,0314	0,0188	0,0193	0,0143	0,0119
V_ 70G, 5C, 2,5RC	0,0625	0,0641	0,0360	0,0314	0,0187	0,0193	0,0160	0,0136
V_ 70G, 5C, 3RC	0,0625	0,0640	0,0360	0,0314	0,0187	0,0193	0,0172	0,0149
V_ 70G, 6C, 1RC	0,0598	0,0619	0,0347	0,0304	0,0180	0,0186	0,0106	0,0091
V_ 70G, 6C, 1,5RC	0,0599	0,0623	0,0349	0,0303	0,0180	0,0187	0,0120	0,0104
V_ 70G, 6C, 2RC	0,0599	0,0625	0,0350	0,0302	0,0180	0,0188	0,0136	0,0121
V_ 70G, 6C, 2,5RC	0,0600	0,0628	0,0351	0,0302	0,0180	0,0189	0,0144	0,0129
V_ 70G, 6C, 3RC	0,0600	0,0630	0,0352	0,0301	0,0180	0,0190	0,0149	0,0133
V_ 80G, 2C, 1RC	0,0988	0,0951	0,0639	0,0466	0,0296	0,0285	0,0192	0,0140
V_ 80G, 2C, 2RC	0,0992	0,0952	0,0644	0,0465	0,0298	0,0287	0,0194	0,0139
V_ 80G, 2C, 2,5RC	0,0992	0,0952	0,0647	0,0464	0,0298	0,0287	0,0195	0,0139
V_ 80G, 2C, 3RC	0,0993	0,0952	0,0649	0,0463	0,0298	0,0287	0,0195	0,0139
V_ 80G, 2C, 3,5RC	0,0993	0,0950	0,0651	0,0462	0,0299	0,0287	0,0196	0,0139
V_ 80G, 3C, 1RC	0,0757	0,0754	0,0488	0,0371	0,0227	0,0227	0,0147	0,0111
V_ 80G, 3C, 2RC	0,0756	0,0754	0,0486	0,0370	0,0227	0,0204	0,0176	0,0100
V_ 80G, 3C, 2,5RC	0,0755	0,0754	0,0485	0,0370	0,0227	0,0206	0,0211	0,0137
V_ 80G, 3C, 3RC	0,0755	0,0754	0,0485	0,0370	0,0226	0,0207	0,0244	0,0144
V_ 80G, 3C, 3,5RC	0,0755	0,0754	0,0484	0,0370	0,0226	0,0207	0,0274	0,0148
V_ 80G, 4C, 1RC	0,0665	0,0679	0,0430	0,0334	0,0200	0,0204	0,0131	0,0100
V_ 80G, 4C, 2RC	0,0665	0,0683	0,0434	0,0332	0,0200	0,0206	0,0153	0,0124
V_ 80G, 4C, 2,5RC	0,0665	0,0684	0,0435	0,0331	0,0199	0,0206	0,0165	0,0137
V_ 80G, 4C, 3RC	0,0664	0,0688	0,0436	0,0331	0,0199	0,0207	0,0173	0,0144
V_ 80G, 4C, 3,5RC	0,0664	0,0688	0,0437	0,0331	0,0199	0,0207	0,0179	0,0148
V_ 80G, 5C, 1RC	0,0619	0,0641	0,0401	0,0315	0,0186	0,0193	0,0123	0,0095
V_ 80G, 5C, 1,5RC	0,0618	0,0641	0,0400	0,0315	0,0185	0,0193	0,0126	0,0095
V_ 80G, 5C, 2RC	0,0617	0,0642	0,0400	0,0314	0,0185	0,0193	0,0150	0,0119
V_ 80G, 5C, 2,5RC	0,0616	0,0641	0,0398	0,0314	0,0185	0,0193	0,0166	0,0136
V_ 80G, 5C, 3RC	0,0616	0,0640	0,0398	0,0314	0,0185	0,0193	0,0179	0,0149

Caso	Sismo X				Sismo Y			
	P. Curvo		P. Recto		P. Curvo		P. Recto	
	U1	U2	U1	U2	U1	U2	U1	U2
V_ 80G, 6C, 1RC	0,0590	0,0619	0,0384	0,0304	0,0177	0,0186	0,0119	0,0091
V_ 80G, 6C, 1,5RC	0,0590	0,0623	0,0386	0,0303	0,0177	0,0187	0,0125	0,0104
V_ 80G, 6C, 2RC	0,0591	0,0625	0,0388	0,0302	0,0177	0,0188	0,0140	0,0121
V_ 80G, 6C, 2,5RC	0,0591	0,0628	0,0389	0,0302	0,0178	0,0189	0,0148	0,0129
V_ 80G, 6C, 3L	0,0591	0,0630	0,0390	0,0301	0,0178	0,0190	0,0153	0,0133
V_ 90G, 2C, 1RC	0,0979	0,0951	0,0697	0,0466	0,0294	0,0285	0,0210	0,0140
V_ 90G, 2C, 2RC	0,0983	0,0952	0,0705	0,0465	0,0295	0,0287	0,0213	0,0139
V_ 90G, 2C, 2,5RC	0,0983	0,0952	0,0709	0,0464	0,0295	0,0287	0,0214	0,0139
V_ 90G, 2C, 3RC	0,0984	0,0952	0,0712	0,0463	0,0296	0,0287	0,0216	0,0139
V_ 90G, 2C, 3,5RC	0,0985	0,0950	0,0715	0,0462	0,0297	0,0287	0,0217	0,0139
V_ 90G, 3C, 1RC	0,0748	0,0754	0,0531	0,0371	0,0224	0,0227	0,0161	0,0111
V_ 90G, 3C, 2RC	0,0746	0,0754	0,0528	0,0370	0,0224	0,0204	0,0184	0,0100
V_ 90G, 3C, 2,5RC	0,0745	0,0754	0,0527	0,0370	0,0224	0,0206	0,0220	0,0137
V_ 90G, 3C, 3RC	0,0745	0,0754	0,0526	0,0370	0,0223	0,0207	0,0254	0,0144
V_ 90G, 3C, 3,5RC	0,0745	0,0754	0,0525	0,0370	0,0223	0,0207	0,0286	0,0148
V_ 90G, 4C, 1RC	0,0656	0,0679	0,0467	0,0334	0,0197	0,0204	0,0143	0,0100
V_ 90G, 4C, 2RC	0,0663	0,0683	0,0457	0,0332	0,0199	0,0206	0,0159	0,0124
V_ 90G, 4C, 2,5RC	0,0655	0,0684	0,0473	0,0331	0,0196	0,0206	0,0172	0,0137
V_ 90G, 4C, 3RC	0,0654	0,0688	0,0474	0,0331	0,0196	0,0207	0,0179	0,0144
V_ 90G, 4C, 3,5RC	0,0654	0,0688	0,0475	0,0331	0,0196	0,0207	0,0185	0,0148
V_ 90G, 5C, 1RC	0,0609	0,0641	0,0435	0,0315	0,0183	0,0193	0,0135	0,0095
V_ 90G, 5C, 1,5RC	0,0608	0,0641	0,0434	0,0315	0,0182	0,0193	0,0137	0,0095
V_ 90G, 5C, 2RC	0,0606	0,0642	0,0433	0,0314	0,0182	0,0193	0,0157	0,0119
V_ 90G, 5C, 2,5RC	0,0606	0,0641	0,0431	0,0314	0,0182	0,0193	0,0173	0,0136
V_ 90G, 5C, 3RC	0,0606	0,0640	0,0431	0,0314	0,0182	0,0193	0,0186	0,0149
V_ 90G, 6C, 1RC	0,0580	0,0619	0,0415	0,0304	0,0174	0,0186	0,0131	0,0091
V_ 90G, 6C, 1,5RC	0,0580	0,0623	0,0418	0,0303	0,0174	0,0187	0,0133	0,0104
V_ 90G, 6C, 2RC	0,0581	0,0625	0,0420	0,0302	0,0174	0,0188	0,0145	0,0121
V_ 90G, 6C, 2,5RC	0,0581	0,0628	0,0421	0,0302	0,0175	0,0189	0,0153	0,0129
V_ 90G, 6C, 3RC	0,0581	0,0630	0,0422	0,0301	0,0175	0,0190	0,0160	0,0133

Cuadro G- 2. Resumen de desplazamientos para Sismo X y Sismo Y. RP.

Caso	Sismo X				Sismo Y			
	P. Curvo		P. Recto		P. Curvo		P. Recto	
	U1	U2	U1	U2	U1	U2	U1	U2
V_ 30G, 3C, 1RP	0,1181	0,1155	0,0306	0,0569	0,0354	0,0347	0,0092	0,0171
V_ 30G, 3C, 4RP	0,0666	0,0658	0,0174	0,0324	0,0200	0,0198	0,0071	0,0097
V_ 30G, 3C, 4,5RP	0,0611	0,0604	0,0160	0,0298	0,0183	0,0182	0,0066	0,0089
V_ 30G, 3C, 5RP	0,0564	0,0559	0,0148	0,0275	0,0169	0,0168	0,0064	0,0083
V_ 30G, 3C, 5,5RP	0,0524	0,0520	0,0137	0,0256	0,0157	0,0157	0,0062	0,0077
V_ 30G, 4C, 1RP	0,1111	0,1099	0,0288	0,0541	0,0333	0,0330	0,0102	0,0162
V_ 30G, 4C, 4RP	0,0723	0,0723	0,0189	0,0356	0,0217	0,0217	0,0070	0,0107
V_ 30G, 4C, 4,5RP	0,0673	0,0675	0,0176	0,0332	0,0202	0,0202	0,0064	0,0100
V_ 30G, 4C, 5RP	0,0630	0,0630	0,0164	0,0310	0,0189	0,0189	0,0063	0,0093
V_ 30G, 4C, 5,5RP	0,0592	0,0593	0,0155	0,0292	0,0178	0,0178	0,0062	0,0088
V_ 30G, 5C, 1RP	0,1075	0,1069	0,0279	0,0526	0,0322	0,0321	0,0110	0,0158
V_ 30G, 5C, 3RP	0,0683	0,0688	0,0177	0,0339	0,0205	0,0207	0,0075	0,0102
V_ 30G, 5C, 3,5RP	0,0613	0,0618	0,0158	0,0304	0,0184	0,0186	0,0075	0,0091
V_ 30G, 5C, 4RP	0,0558	0,0563	0,0144	0,0277	0,0167	0,0169	0,0070	0,0083
V_ 30G, 5C, 4,5R	0,0513	0,0518	0,0133	0,0255	0,0154	0,0156	0,0064	0,0077
V_ 30G, 6C, 1RP	0,1052	0,1051	0,0274	0,0517	0,0316	0,0316	0,0107	0,0102
V_ 30G, 6C, 2RP	0,0878	0,0881	0,0229	0,0434	0,0263	0,0240	0,0101	0,0086
V_ 30G, 6C, 2,5RP	0,0774	0,0779	0,0202	0,0384	0,0232	0,0210	0,0079	0,0074
V_ 30G, 6C, 3RP	0,0693	0,0699	0,0182	0,0344	0,0208	0,0187	0,0074	0,0070
V_ 30G, 6C, 3,5RP	0,0629	0,0636	0,0165	0,0313	0,0189	0,0170	0,0066	0,0068
V_ 60G, 3C, 1RP	0,1180	0,1155	0,0591	0,0569	0,0354	0,0347	0,0177	0,0171
V_ 60G, 3C, 4RP	0,0667	0,0658	0,0332	0,0324	0,0200	0,0198	0,0100	0,0097
V_ 60G, 3C, 4,5RP	0,0612	0,0604	0,0304	0,0298	0,0184	0,0182	0,0092	0,0089
V_ 60G, 3C, 5RP	0,0564	0,0559	0,0280	0,0275	0,0169	0,0168	0,0084	0,0083
V_ 60G, 3C, 5,5RP	0,0525	0,0520	0,0260	0,0256	0,0158	0,0157	0,0079	0,0077
V_ 60G, 4C, 1RP	0,1102	0,1099	0,0552	0,0541	0,0331	0,0330	0,0166	0,0162
V_ 60G, 4C, 4RP	0,0716	0,0723	0,0361	0,0356	0,0215	0,0217	0,0109	0,0107
V_ 60G, 4C, 4,5RP	0,0666	0,0675	0,0336	0,0332	0,0200	0,0202	0,0101	0,0100
V_ 60G, 4C, 5RP	0,0622	0,0630	0,0315	0,0310	0,0187	0,0189	0,0094	0,0093
V_ 60G, 4C, 5,5RP	0,0584	0,0593	0,0296	0,0292	0,0175	0,0178	0,0089	0,0088
V_ 60G, 5C, 1RP	0,1061	0,1069	0,0532	0,0526	0,0318	0,0321	0,0160	0,0158
V_ 60G, 5C, 3RP	0,0674	0,0688	0,0337	0,0339	0,0202	0,0207	0,0102	0,0102
V_ 60G, 5C, 3,5RP	0,0603	0,0618	0,0301	0,0304	0,0181	0,0186	0,0091	0,0091
V_ 60G, 5C, 4RP	0,0548	0,0563	0,0273	0,0277	0,0164	0,0169	0,0085	0,0083
V_ 60G, 5C, 4,5RP	0,0502	0,0518	0,0250	0,0255	0,0151	0,0156	0,0081	0,0077

Caso	Sismo X				Sismo Y			
	P. Curvo		P. Recto		P. Curvo		P. Recto	
	U1	U2	U1	U2	U1	U2	U1	U2
V_ 60G, 6C, 1RP	0,1034	0,1051	0,0520	0,0517	0,0310	0,0316	0,0157	0,0102
V_ 60G, 6C, 2RP	0,0862	0,0881	0,0435	0,0434	0,0259	0,0240	0,0132	0,0086
V_ 60G, 6C, 2,5RP	0,0761	0,0779	0,0384	0,0384	0,0228	0,0210	0,0116	0,0074
V_ 60G, 6C, 3RP	0,0681	0,0699	0,0345	0,0344	0,0204	0,0187	0,0104	0,0070
V_ 60G, 6C, 3,5RP	0,0618	0,0636	0,0313	0,0313	0,0185	0,0170	0,0097	0,0068
V_ 70G, 3C, 1RP	0,1172	0,1155	0,0674	0,0569	0,0352	0,0347	0,0203	0,0171
V_ 70G, 3C, 4RP	0,0663	0,0658	0,0378	0,0324	0,0199	0,0198	0,0114	0,0097
V_ 70G, 3C, 4,5RP	0,0608	0,0604	0,0346	0,0298	0,0183	0,0182	0,0104	0,0089
V_ 70G, 3C, 5RP	0,0561	0,0559	0,0319	0,0275	0,0169	0,0168	0,0096	0,0083
V_ 70G, 3C, 5,5RP	0,0521	0,0520	0,0296	0,0256	0,0157	0,0157	0,0089	0,0077
V_ 70G, 4C, 1RP	0,1092	0,1099	0,0628	0,0541	0,0328	0,0330	0,0189	0,0162
V_ 70G, 4C, 4RP	0,0710	0,0723	0,0411	0,0356	0,0213	0,0217	0,0124	0,0107
V_ 70G, 4C, 4,5RP	0,0660	0,0675	0,0383	0,0332	0,0198	0,0202	0,0115	0,0100
V_ 70G, 4C, 5RP	0,0616	0,0630	0,0358	0,0310	0,0185	0,0189	0,0108	0,0093
V_ 70G, 4C, 5,5RP	0,0579	0,0593	0,0336	0,0292	0,0174	0,0178	0,0101	0,0088
V_ 70G, 5C, 1RP	0,1050	0,1069	0,0605	0,0526	0,0315	0,0321	0,0183	0,0158
V_ 70G, 5C, 3RP	0,0667	0,0688	0,0382	0,0339	0,0200	0,0207	0,0116	0,0102
V_ 70G, 5C, 3,5RP	0,0597	0,0618	0,0342	0,0304	0,0179	0,0186	0,0104	0,0091
V_ 70G, 5C, 4RP	0,0542	0,0563	0,0310	0,0277	0,0163	0,0169	0,0094	0,0083
V_ 70G, 5C, 4,5RP	0,0496	0,0518	0,0284	0,0255	0,0149	0,0156	0,0089	0,0077
V_ 70G, 6C, 1RP	0,1023	0,1051	0,0590	0,0517	0,0307	0,0316	0,0179	0,0102
V_ 70G, 6C, 2RP	0,0852	0,0881	0,0493	0,0434	0,0256	0,0240	0,0150	0,0086
V_ 70G, 6C, 2,5RP	0,0752	0,0779	0,0436	0,0384	0,0226	0,0210	0,0132	0,0074
V_ 70G, 6C, 3RP	0,0673	0,0699	0,0391	0,0344	0,0202	0,0187	0,0118	0,0070
V_ 70G, 6C, 3,5RP	0,0611	0,0636	0,0356	0,0313	0,0183	0,0170	0,0108	0,0068
V_ 80G, 3C, 1RP	0,1162	0,1155	0,0748	0,0569	0,0349	0,0347	0,0225	0,0171
V_ 80G, 3C, 4RP	0,0657	0,0658	0,0419	0,0324	0,0198	0,0198	0,0127	0,0097
V_ 80G, 3C, 4,5RP	0,0603	0,0604	0,0384	0,0298	0,0181	0,0182	0,0116	0,0089
V_ 80G, 3C, 5RP	0,0556	0,0559	0,0354	0,0275	0,0167	0,0168	0,0107	0,0083
V_ 80G, 3C, 5,5RP	0,0517	0,0520	0,0328	0,0256	0,0155	0,0157	0,0099	0,0077
V_ 80G, 4C, 1RP	0,1080	0,1099	0,0696	0,0541	0,0324	0,0330	0,0211	0,0162
V_ 80G, 4C, 4RP	0,0702	0,0723	0,0456	0,0356	0,0210	0,0217	0,0137	0,0107
V_ 80G, 4C, 4,5RP	0,0652	0,0675	0,0424	0,0332	0,0196	0,0202	0,0128	0,0100
V_ 80G, 4C, 5RP	0,0609	0,0630	0,0397	0,0310	0,0183	0,0189	0,0119	0,0093
V_ 80G, 4C, 5,5RP	0,0572	0,0593	0,0373	0,0292	0,0172	0,0178	0,0112	0,0088
V_ 80G, 5C, 1RP	0,1036	0,1069	0,0669	0,0526	0,0311	0,0321	0,0203	0,0158
V_ 80G, 5C, 3RP	0,0658	0,0688	0,0422	0,0339	0,0198	0,0207	0,0129	0,0102
V_ 80G, 5C, 3,5RP	0,0590	0,0618	0,0378	0,0304	0,0177	0,0186	0,0115	0,0091
V_ 80G, 5C, 4RP	0,0535	0,0563	0,0343	0,0277	0,0161	0,0169	0,0105	0,0083
V_ 80G, 5C, 4,5RP	0,0490	0,0518	0,0315	0,0255	0,0147	0,0156	0,0096	0,0077

Caso	Sismo X				Sismo Y			
	P. Curvo		P. Recto		P. Curvo		P. Recto	
	U1	U2	U1	U2	U1	U2	U1	U2
V_ 80G, 6C, 1RP	0,1008	0,1051	0,0652	0,0517	0,0303	0,0316	0,0199	0,0102
V_ 80G, 6C, 2RP	0,0840	0,0881	0,0545	0,0434	0,0252	0,0240	0,0167	0,0086
V_ 80G, 6C, 2,5RP	0,0741	0,0779	0,0482	0,0384	0,0222	0,0210	0,0147	0,0074
V_ 80G, 6C, 3RP	0,0664	0,0699	0,0432	0,0344	0,0199	0,0187	0,0132	0,0070
V_ 80G, 6C, 3,5RP	0,0602	0,0636	0,0393	0,0313	0,0181	0,0170	0,0120	0,0068
V_ 90G, 3C, 1RP	0,1148	0,1155	0,0813	0,0569	0,0344	0,0347	0,0246	0,0171
V_ 90G, 3C, 4RP	0,0650	0,0658	0,0455	0,0324	0,0195	0,0198	0,0138	0,0097
V_ 90G, 3C, 4,5RP	0,0596	0,0604	0,0418	0,0298	0,0179	0,0182	0,0126	0,0089
V_ 90G, 3C, 5RP	0,0549	0,0559	0,0386	0,0275	0,0165	0,0168	0,0117	0,0083
V_ 90G, 3C, 5,5RP	0,0511	0,0520	0,0359	0,0256	0,0154	0,0157	0,0109	0,0077
V_ 90G, 4C, 1RP	0,1065	0,1099	0,0755	0,0541	0,0319	0,0330	0,0230	0,0162
V_ 90G, 4C, 4RP	0,0691	0,0723	0,0494	0,0356	0,0207	0,0217	0,0149	0,0107
V_ 90G, 4C, 4,5RP	0,0642	0,0675	0,0460	0,0332	0,0193	0,0202	0,0139	0,0100
V_ 90G, 4C, 5RP	0,0600	0,0630	0,0430	0,0310	0,0180	0,0189	0,0130	0,0093
V_ 90G, 4C, 5,5RP	0,0563	0,0593	0,0405	0,0292	0,0169	0,0178	0,0122	0,0088
V_ 90G, 5C, 1RP	0,1020	0,1069	0,0725	0,0526	0,0306	0,0321	0,0222	0,0158
V_ 90G, 5C, 3RP	0,0648	0,0688	0,0457	0,0339	0,0195	0,0207	0,0141	0,0102
V_ 90G, 5C, 3,5RP	0,0580	0,0618	0,0410	0,0304	0,0174	0,0186	0,0126	0,0091
V_ 90G, 5C, 4RP	0,0526	0,0563	0,0373	0,0277	0,0158	0,0169	0,0114	0,0083
V_ 90G, 5C, 4,5RP	0,0482	0,0518	0,0343	0,0255	0,0145	0,0156	0,0105	0,0077
V_ 90G, 6C, 1RP	0,0991	0,1051	0,0706	0,0517	0,0297	0,0316	0,0217	0,0102
V_ 90G, 6C, 2RP	0,0825	0,0881	0,0590	0,0434	0,0248	0,0240	0,0183	0,0086
V_ 90G, 6C, 2,5RP	0,0728	0,0779	0,0522	0,0384	0,0218	0,0210	0,0160	0,0074
V_ 90G, 6C, 3RP	0,0652	0,0699	0,0468	0,0344	0,0196	0,0187	0,0143	0,0070
V_ 90G, 6C, 3,5RP	0,0592	0,0636	0,0425	0,0313	0,0178	0,0170	0,0131	0,0068

APÉNDICE H: RELACIÓN DE LONGITUD ENTRE CLAROS ADYACENTES

1. Sismo X

a. Respuesta sísmica longitudinal

Cuadro H- 1. Cortante basal longitudinal en función de RC. Sismo X.

Claros	RC	Cortante Basal Longitudinal (Ton)					
		Ángulo (°)					
		0	30	60	70	80	90
2	1	952,92	941,34	906,14	889,46	870,45	849,23
	2	951,90	939,55	902,06	884,16	863,40	840,02
	2,5	950,92	938,28	899,25	880,03	857,94	833,03
	3	949,61	937,63	896,37	876,24	852,96	826,57
	3,5	948,29	936,99	896,73	872,53	848,07	820,06
3	1	1530,54	1512,91	1460,39	1434,47	1405,54	1373,32
	2	1530,73	1512,40	1458,14	1432,31	1402,76	1369,83
	2,5	1530,71	1512,37	1457,27	1431,03	1401,23	1367,95
	3	1530,67	1512,12	1456,42	1430,02	1399,96	1366,41
	3,5	1530,63	1511,69	1455,75	1429,13	1398,85	1365,21
4	1	2074,16	2050,28	1979,63	1945,76	1907,05	1863,83
	2	2074,26	2049,52	1996,39	1946,06	1906,44	1889,42
	2,5	2074,25	2051,03	1979,25	1944,92	1906,00	1861,73
	3	2075,89	2050,89	1978,05	1943,50	1905,52	1860,25
	3,5	2076,57	2050,06	1976,39	1942,05	1905,07	1858,71
5	1	2618,19	2588,17	2499,34	2456,88	2408,17	2354,03
	1,5	2618,32	2588,05	2498,33	2455,33	2406,48	2351,84
	2	2618,14	2587,60	2496,53	2453,26	2403,73	2348,40
	2,5	2617,81	2586,62	2494,83	2451,40	2401,75	2346,48
	3	2618,00	2586,57	2494,95	2451,27	2401,39	2345,81
6	1	3162,10	3125,96	3018,82	2967,70	2909,36	2843,88
	1,5	3162,11	3125,81	3018,35	2966,56	2901,20	2843,08
	2	3161,07	3124,82	3017,27	2965,57	2906,70	2840,76
	2,5	3162,38	3125,22	3016,09	2963,20	2903,89	2837,55
	3	3163,14	3124,50	3011,76	2959,76	2900,50	2834,14

Cuadro H- 2. Comparación del cortante basal longitudinal en función de RC. PC y PR equivalente. Sismo X.

Claros	RC	Razón de Cortante Basal Longitudinal (PC/PR equiv)					
		Ángulo (°)					
		0	30	60	70	80	90
2	1	1,000	0,988	0,951	0,933	0,913	0,891
	2	1,000	0,987	0,948	0,929	0,907	0,882
	2,5	1,000	0,987	0,946	0,925	0,902	0,876
	3	1,000	0,987	0,944	0,923	0,898	0,870
	3,5	1,000	0,988	0,946	0,920	0,894	0,865
3	1	1,000	0,988	0,954	0,937	0,918	0,897
	2	1,000	0,988	0,953	0,936	0,916	0,895
	2,5	1,000	0,988	0,952	0,935	0,915	0,894
	3	1,000	0,988	0,951	0,934	0,915	0,893
	3,5	1,000	0,988	0,951	0,934	0,914	0,892
4	1	1,000	0,988	0,954	0,938	0,919	0,899
	2	1,000	0,988	0,962	0,938	0,919	0,911
	2,5	1,000	0,989	0,954	0,938	0,919	0,898
	3	1,000	0,988	0,953	0,936	0,918	0,896
	3,5	1,000	0,987	0,952	0,935	0,917	0,895
5	1	1,000	0,989	0,955	0,938	0,920	0,899
	1,5	1,000	0,988	0,954	0,938	0,919	0,898
	2	1,000	0,988	0,954	0,937	0,918	0,897
	2,5	1,000	0,988	0,953	0,936	0,917	0,896
	3	1,000	0,988	0,953	0,936	0,917	0,896
6	1	1,000	0,989	0,955	0,939	0,920	0,899
	1,5	1,000	0,989	0,955	0,938	0,917	0,899
	2	1,000	0,989	0,955	0,938	0,920	0,899
	2,5	1,000	0,988	0,954	0,937	0,918	0,897
	3	1,000	0,988	0,952	0,936	0,917	0,896

Cuadro H- 3. Comparación del cortante basal longitudinal en función de RC. PC y PR con RC=1. Sismo X.

Claros	RC	Razón de Cortante Basal Longitudinal (PC/PR con RC=1)					
		Ángulo (°)					
		0	30	60	70	80	90
2	1	1,000	0,988	0,951	0,934	0,914	0,891
	2	0,999	0,987	0,950	0,933	0,914	0,893
	2,5	0,998	0,986	0,950	0,933	0,915	0,895
	3	0,997	0,986	0,949	0,933	0,916	0,899
	3,5	0,995	0,985	0,949	0,934	0,918	0,904
3	1	1,000	0,989	0,958	0,943	0,926	0,908
	2	1,000	0,992	0,973	0,965	0,957	0,951
	2,5	1,000	0,995	0,983	0,980	0,978	0,979
	3	1,000	0,997	0,994	0,996	1,001	1,010
	3,5	1,000	1,000	1,006	1,013	1,025	1,042
4	1	1,000	0,990	0,961	0,948	0,933	0,917
	2	1,000	0,990	0,961	0,947	0,932	0,914
	2,5	1,000	0,990	0,960	0,946	0,930	0,912
	3	1,001	0,990	0,959	0,945	0,928	0,911
	3,5	1,001	0,990	0,958	0,943	0,927	0,909
5	1	1,000	0,991	0,965	0,954	0,923	0,928
	1,5	1,000	0,992	0,971	0,962	0,952	0,942
	2	1,000	0,994	0,978	0,971	0,963	0,956
	2,5	1,000	0,995	0,982	0,977	0,971	0,966
	3	1,000	0,996	0,986	0,982	0,979	0,975
6	1	1,000	0,993	0,970	0,960	0,949	0,939
	1,5	1,000	0,993	0,972	0,963	0,953	0,943
	2	1,000	0,993	0,974	0,965	0,955	0,944
	2,5	1,000	0,993	0,973	0,964	0,954	0,943
	3	1,000	0,993	0,971	0,962	0,953	0,942

b. Respuesta sísmica transversal

Cuadro H- 4. Cortante basal transversal en función de RC. Sismo X.

Claros	RC	Cortante Basal Transversal [Ton]					
		Ángulo (°)					
		0	30	60	70	80	90
2	1	379,82	394,86	412,46	410,65	433,70	479,33
	2	322,52	340,24	400,73	430,17	464,30	502,64
	2,5	317,04	337,37	399,55	429,53	464,53	503,29
	3	304,74	331,35	397,14	428,12	463,68	502,15
	3,5	293,79	324,93	393,03	424,67	460,60	498,61
3	1	813,36	793,13	803,54	850,70	906,38	966,99
	2	933,59	969,69	1062,86	1107,06	1156,98	1210,52
	2,5	1009,10	1039,42	1137,09	1181,99	1231,73	1285,96
	3	1051,22	1082,65	1184,31	1230,62	1282,09	1337,55
	3,5	1082,25	1119,05	1221,01	1269,06	1322,23	1378,21
4	1	1131,85	1102,14	1146,57	1193,80	1254,30	1322,13
	2	1314,74	1347,28	1440,11	1483,90	1531,51	1508,83
	2,5	1345,65	1380,00	1471,23	1513,18	1559,67	1609,44
	3	1362,56	1397,50	1487,42	1529,19	1574,95	1624,28
	3,5	1374,31	1408,12	1499,42	1540,98	1586,85	1635,73
5	1	1489,64	1481,38	1534,30	1594,26	1663,99	1756,88
	1,5	1613,86	1653,41	1772,17	1846,69	1916,43	2002,18
	2	1850,68	1890,86	1998,89	2050,63	2106,86	2176,23
	2,5	1936,43	1970,69	2066,54	2111,81	2162,07	2230,73
	3	1972,98	2010,32	2099,72	2143,15	2191,72	2251,36
6	1	1889,63	1884,59	1927,73	2012,64	2095,83	2197,30
	1,5	2033,58	2067,50	2198,94	2277,25	2357,71	2436,64
	2	2274,93	2311,31	2418,55	2469,72	2528,88	2593,30
	2,5	2362,23	2395,61	2500,50	2544,86	2599,77	2659,28
	3	2405,07	2441,56	2538,96	2587,61	2640,93	2699,00

Cuadro H- 5. Comparación del cortante basal transversal en función de RC. PC y PR equivalente. Sismo X.

Claros	RC	Razón de Cortante Basal Transversal (PC/PR equiv)					
		Ángulo (°)					
		0	30	60	70	80	90
2	1	1,000	1,040	1,086	1,081	1,142	1,262
	2	1,000	1,055	1,242	1,334	1,440	1,558
	2,5	1,000	1,064	1,260	1,355	1,465	1,587
	3	1,000	1,087	1,303	1,405	1,522	1,648
	3,5	1,000	1,106	1,338	1,445	1,568	1,697
3	1	1,000	0,975	0,988	1,046	1,114	1,189
	2	1,000	1,039	1,138	1,186	1,239	1,297
	2,5	1,000	1,030	1,127	1,171	1,221	1,274
	3	1,000	1,030	1,127	1,171	1,220	1,272
	3,5	1,000	1,034	1,128	1,173	1,222	1,273
4	1	1,000	0,974	1,013	1,055	1,108	1,168
	2	1,000	1,025	1,095	1,129	1,165	1,148
	2,5	1,000	1,026	1,093	1,124	1,159	1,196
	3	1,000	1,026	1,092	1,122	1,156	1,192
	3,5	1,000	1,025	1,091	1,121	1,155	1,190
5	1	1,000	0,994	1,030	1,070	1,117	1,179
	1,5	1,000	1,025	1,098	1,144	1,187	1,241
	2	1,000	1,022	1,080	1,108	1,138	1,176
	2,5	1,000	1,018	1,067	1,091	1,117	1,152
	3	1,000	1,019	1,064	1,086	1,111	1,141
6	1	1,000	0,997	1,020	1,065	1,109	1,163
	1,5	1,000	1,017	1,081	1,120	1,159	1,198
	2	1,000	1,016	1,063	1,086	1,112	1,140
	2,5	1,000	1,014	1,059	1,077	1,101	1,126
	3	1,000	1,015	1,056	1,076	1,098	1,122

Cuadro H- 6. Comparación del cortante basal transversal en función de RC. PC y PR con RC=1. Sismo X.

Claros	RC	Razón de Cortante Basal Transversal (PC/PR con RC=1)					
		Ángulo (°)					
		0	30	60	70	80	90
2	1	1,000	1,053	1,098	1,093	1,153	1,271
	2	0,849	1,096	1,495	1,666	1,849	2,057
	2,5	0,835	1,174	1,693	1,902	2,136	2,397
	3	0,802	1,270	1,839	2,090	2,357	2,668
	3,5	0,774	1,299	1,961	2,220	2,531	2,879
3	1	1,000	0,995	1,078	1,164	1,266	1,376
	2	1,148	1,216	1,385	1,456	1,535	1,620
	2,5	1,282	1,304	1,464	1,535	1,618	1,711
	3	1,292	1,354	1,517	1,592	1,678	1,771
	3,5	1,331	1,395	1,567	1,645	1,733	1,775
4	1	1,000	1,056	1,294	1,412	1,543	1,680
	2	1,162	1,494	1,415	1,718	1,857	1,806
	2,5	1,189	1,322	1,642	1,776	1,920	2,073
	3	1,204	1,345	1,674	1,814	1,962	2,120
	3,5	1,215	1,359	1,701	1,843	1,996	2,157
5	1	1,000	1,100	1,371	1,487	1,607	1,734
	1,5	1,084	1,186	1,458	1,591	1,731	1,888
	2	1,242	1,355	1,647	1,775	1,913	2,067
	2,5	1,300	1,413	1,708	1,838	1,980	2,133
	3	1,324	1,440	1,734	1,863	2,003	2,156
6	1	1,000	1,097	1,354	1,455	1,575	1,704
	1,5	1,076	1,187	1,477	1,527	1,595	1,898
	2	1,204	1,333	1,653	1,785	1,929	2,080
	2,5	1,250	1,385	1,713	1,845	1,989	2,140
	3	1,273	1,409	1,738	1,875	2,020	2,171

2. Sismo Y

a. Respuesta sísmica longitudinal

Cuadro H- 7. Cortante basal longitudinal en función de RC. Sismo Y.

Claros	RC	Cortante Basal Longitudinal (Ton)					
		Ángulo (°)					
		0	30	60	70	80	90
2	1	285,87	282,45	271,89	266,89	261,19	254,82
	2	285,57	282,08	271,65	266,81	261,34	255,39
	2,5	285,28	281,83	271,51	266,69	261,45	255,98
	3	284,89	281,76	271,38	266,76	261,87	257,04
	3,5	284,49	281,70	271,38	266,97	262,57	258,51
3	1	459,16	454,33	439,78	432,80	425,24	417,04
	2	459,22	455,68	446,60	443,03	439,58	436,57
	2,5	459,21	456,75	451,28	449,79	449,03	449,39
	3	459,20	457,82	456,41	457,28	459,51	463,55
	3,5	459,19	458,95	461,89	465,25	470,64	478,56
4	1	622,25	616,12	598,06	589,73	580,61	570,87
	2	622,28	616,09	598,03	589,44	579,84	569,00
	2,5	622,28	616,15	597,41	588,60	578,70	567,72
	3	622,77	616,05	596,77	587,78	577,70	566,67
	3,5	622,97	615,74	596,07	587,06	576,93	565,68
5	1	785,45	778,54	758,07	748,95	724,83	728,77
	1,5	785,52	779,51	762,74	755,57	747,94	740,01
	2	785,44	780,78	767,91	762,44	756,71	750,79
	2,5	785,34	781,46	771,28	767,08	762,80	758,92
	3	785,40	782,30	774,56	771,54	768,57	765,77
6	1	948,63	941,72	919,90	910,59	900,56	890,54
	1,5	948,63	941,85	922,14	913,58	904,32	894,45
	2	948,31	941,96	923,54	915,00	905,78	895,98
	2,5	948,72	941,99	923,03	914,14	904,83	895,01
	3	948,94	941,69	921,47	912,84	903,58	893,76

Cuadro H- 8. Comparación del cortante basal longitudinal en función de RC. PC y PR equivalente. Sismo Y.

Claros	RC	Razón de Cortante Basal Longitudinal (PC/PR equiv)					
		Ángulo (°)					
		0	30	60	70	80	90
2	1	1,000	0,988	0,951	0,934	0,914	0,891
	2	1,000	0,988	0,951	0,934	0,915	0,894
	2,5	1,000	0,988	0,952	0,935	0,916	0,897
	3	1,000	0,989	0,953	0,936	0,919	0,902
	3,5	1,000	0,990	0,954	0,938	0,923	0,909
3	1	1,000	0,989	0,958	0,943	0,926	0,908
	2	1,000	0,992	0,973	0,965	0,957	0,951
	2,5	1,000	0,995	0,983	0,979	0,978	0,979
	3	1,000	0,997	0,994	0,996	1,001	1,009
	3,5	1,000	0,999	1,006	1,013	1,025	1,042
4	1	1,000	0,990	0,961	0,948	0,933	0,917
	2	1,000	0,990	0,961	0,947	0,932	0,914
	2,5	1,000	0,990	0,960	0,946	0,930	0,912
	3	1,000	0,989	0,958	0,944	0,928	0,910
	3,5	1,000	0,988	0,957	0,942	0,926	0,908
5	1	1,000	0,991	0,965	0,954	0,923	0,928
	1,5	1,000	0,992	0,971	0,962	0,952	0,942
	2	1,000	0,994	0,978	0,971	0,963	0,956
	2,5	1,000	0,995	0,982	0,977	0,971	0,966
	3	1,000	0,996	0,986	0,982	0,979	0,975
6	1	1,000	0,993	0,970	0,960	0,949	0,939
	1,5	1,000	0,993	0,972	0,963	0,953	0,943
	2	1,000	0,993	0,974	0,965	0,955	0,945
	2,5	1,000	0,993	0,973	0,964	0,954	0,943
	3	1,000	0,992	0,971	0,962	0,952	0,942

Cuadro H- 9. Comparación del cortante basal longitudinal en función de RC. PC y PR con RC=1. Sismo Y.

Claros	RC	Razón de Cortante Basal Longitudinal (PC/PR con RC=1)					
		Ángulo (°)					
		0	30	60	70	80	90
2	1	1,000	0,988	0,951	0,934	0,914	0,891
	2	0,999	0,987	0,950	0,933	0,914	0,893
	2,5	0,998	0,986	0,950	0,933	0,915	0,895
	3	0,997	0,986	0,949	0,933	0,916	0,899
	3,5	0,995	0,985	0,949	0,934	0,918	0,904
3	1	1,000	0,989	0,958	0,943	0,926	0,908
	2	1,000	0,992	0,973	0,965	0,957	0,951
	2,5	1,000	0,995	0,983	0,980	0,978	0,979
	3	1,000	0,997	0,994	0,996	1,001	1,010
	3,5	1,000	1,000	1,006	1,013	1,025	1,042
4	1	1,000	0,990	0,961	0,948	0,933	0,917
	2	1,000	0,990	0,961	0,947	0,932	0,914
	2,5	1,000	0,990	0,960	0,946	0,930	0,912
	3	1,001	0,990	0,959	0,945	0,928	0,911
	3,5	1,001	0,990	0,958	0,943	0,927	0,909
5	1	1,000	0,991	0,965	0,954	0,923	0,928
	1,5	1,000	0,992	0,971	0,962	0,952	0,942
	2	1,000	0,994	0,978	0,971	0,963	0,956
	2,5	1,000	0,995	0,982	0,977	0,971	0,966
	3	1,000	0,996	0,986	0,982	0,979	0,975
6	1	1,000	0,993	0,970	0,960	0,949	0,939
	1,5	1,000	0,993	0,972	0,963	0,953	0,943
	2	1,000	0,993	0,974	0,965	0,955	0,944
	2,5	1,000	0,993	0,973	0,964	0,954	0,943
	3	1,000	0,993	0,971	0,962	0,953	0,942

b. Respuesta sísmica transversal

Cuadro H- 10. Cortante basal transversal en función de RC. Sismo Y.

Claros	RC	Cortante Basal Transversal [Ton]					
		Ángulo (°)					
		0	30	60	70	80	90
2	1	379,82	394,86	412,46	410,65	433,70	479,33
	2	322,52	340,24	400,73	430,17	464,30	502,64
	2,5	317,04	337,37	399,55	429,53	464,53	503,29
	3	304,74	331,35	397,14	428,12	463,68	502,15
	3,5	293,79	324,93	393,03	424,67	460,60	498,61
3	1	813,36	793,13	803,54	850,70	906,38	966,99
	2	933,59	969,69	1062,86	1107,06	1156,98	1210,52
	2,5	1009,10	1039,42	1137,09	1181,99	1231,73	1285,96
	3	1051,22	1082,65	1184,31	1230,62	1282,09	1337,55
	3,5	1082,25	1119,05	1221,01	1269,06	1322,23	1378,21
4	1	1131,85	1102,14	1146,57	1193,80	1254,30	1322,13
	2	1314,74	1347,28	1440,11	1483,90	1531,51	1508,83
	2,5	1345,65	1380,00	1471,23	1513,18	1559,67	1609,44
	3	1362,56	1397,50	1487,42	1529,19	1574,95	1624,28
	3,5	1374,31	1408,12	1499,42	1540,98	1586,85	1635,73
5	1	1489,64	1481,38	1534,30	1594,26	1663,99	1756,88
	1,5	1613,86	1653,41	1772,17	1846,69	1916,43	2002,18
	2	1850,68	1890,86	1998,89	2050,63	2106,86	2176,23
	2,5	1936,43	1970,69	2066,54	2111,81	2162,07	2230,73
	3	1972,98	2010,32	2099,72	2143,15	2191,72	2251,36
6	1	1889,63	1884,59	1927,73	2012,64	2095,83	2197,30
	1,5	2033,58	2067,50	2198,94	2277,25	2357,71	2436,64
	2	2274,93	2311,31	2418,55	2469,72	2528,88	2593,30
	2,5	2362,23	2395,61	2500,50	2544,86	2599,77	2659,28
	3	2405,07	2441,56	2538,96	2587,61	2640,93	2699,00

Cuadro H- 11. Comparación del cortante basal transversal en función de RC. PC y PR equivalente. Sismo Y.

Claros	RC	Razón de Cortante Basal Transversal (PC/PR equiv)					
		Ángulo (°)					
		0	30	60	70	80	90
2	1	1,000	1,040	1,086	1,081	1,142	1,262
	2	1,000	1,055	1,242	1,334	1,440	1,558
	2,5	1,000	1,064	1,260	1,355	1,465	1,587
	3	1,000	1,087	1,303	1,405	1,522	1,648
	3,5	1,000	1,106	1,338	1,445	1,568	1,697
3	1	1,000	0,975	0,988	1,046	1,114	1,189
	2	1,000	1,039	1,138	1,186	1,239	1,297
	2,5	1,000	1,030	1,127	1,171	1,221	1,274
	3	1,000	1,030	1,127	1,171	1,220	1,272
	3,5	1,000	1,034	1,128	1,173	1,222	1,273
4	1	1,000	0,974	1,013	1,055	1,108	1,168
	2	1,000	1,025	1,095	1,129	1,165	1,148
	2,5	1,000	1,026	1,093	1,124	1,159	1,196
	3	1,000	1,026	1,092	1,122	1,156	1,192
	3,5	1,000	1,025	1,091	1,121	1,155	1,190
5	1	1,000	0,994	1,030	1,070	1,117	1,179
	1,5	1,000	1,025	1,098	1,144	1,187	1,241
	2	1,000	1,022	1,080	1,108	1,138	1,176
	2,5	1,000	1,018	1,067	1,091	1,117	1,152
	3	1,000	1,019	1,064	1,086	1,111	1,141
6	1	1,000	0,997	1,020	1,065	1,109	1,163
	1,5	1,000	1,017	1,081	1,120	1,159	1,198
	2	1,000	1,016	1,063	1,086	1,112	1,140
	2,5	1,000	1,014	1,059	1,077	1,101	1,126
	3	1,000	1,015	1,056	1,076	1,098	1,122

Cuadro H- 12. Comparación del cortante basal transversal en función de RC. PC y PR con RC=1. Sismo Y.

Claros	RC	Razón de Cortante Basal Transversal (PC/PR con RC=1)					
		Ángulo (°)					
		0	30	60	70	80	90
2	1	1,000	1,040	1,086	1,081	1,142	1,262
	2	0,849	0,896	1,055	1,133	1,222	1,323
	2,5	0,835	0,888	1,052	1,131	1,223	1,325
	3	0,802	0,872	1,046	1,127	1,221	1,322
	3,5	0,774	0,855	1,035	1,118	1,213	1,313
3	1	1,000	0,975	0,988	1,046	1,114	1,189
	2	1,148	1,192	1,307	1,361	1,422	1,488
	2,5	1,241	1,278	1,398	1,453	1,514	1,581
	3	1,292	1,331	1,456	1,513	1,576	1,644
	3,5	1,331	1,376	1,501	1,560	1,626	1,694
4	1	1,000	0,974	1,013	1,055	1,108	1,168
	2	1,162	1,190	1,272	1,311	1,353	1,333
	2,5	1,189	1,219	1,300	1,337	1,378	1,422
	3	1,204	1,235	1,314	1,351	1,391	1,435
	3,5	1,214	1,244	1,325	1,361	1,402	1,445
5	1	1,000	0,994	1,030	1,070	1,117	1,179
	1,5	1,083	1,110	1,190	1,240	1,287	1,344
	2	1,242	1,269	1,342	1,377	1,414	1,461
	2,5	1,300	1,323	1,387	1,418	1,451	1,497
	3	1,324	1,350	1,410	1,439	1,471	1,511
6	1	1,000	0,997	1,020	1,065	1,109	1,163
	1,5	1,076	1,094	1,164	1,205	1,248	1,289
	2	1,204	1,223	1,280	1,307	1,338	1,372
	2,5	1,250	1,268	1,323	1,347	1,376	1,407
	3	1,273	1,292	1,344	1,369	1,398	1,428

APÉNDICE I: RELACIÓN DE RIGIDEZ ENTRE PILAS ADYACENTES

1. Sismo X

a. Respuesta sísmica longitudinal

Cuadro I- 1. Cortante basal longitudinal en función de RP. Sismo X.

Claros	RP	Cortante Basal Longitudinal (Ton)					
		Ángulo (°)					
		0	30	60	70	80	90
3	1	1209,4	1195,7	1153,6	1133,8	1111,0	1085,6
	4	1525,0	1507,2	1454,0	1427,7	1398,3	1365,4
	4,5	1530,4	1512,4	1458,8	1432,2	1402,4	1369,1
	5	1536,0	1517,4	1463,2	1436,3	1406,1	1372,3
	5,5	1540,5	1463,0	1467,1	1439,8	1409,1	1374,7
4	1	1730,7	1711,0	1652,8	1624,9	1592,9	1557,3
	4	2058,5	2036,5	1963,7	1928,9	1889,0	1844,4
	4,5	2059,7	2041,9	1968,6	1933,4	1893,1	1848,0
	5	2062,0	2047,4	1973,3	1937,9	1897,2	1851,6
	5,5	2067,4	2052,6	1977,9	1942,1	1900,9	1854,9
5	1	2251,4	2225,9	2150,5	2114,4	2073,1	2026,8
	3	2592,6	2563,3	2477,8	2436,8	2389,8	2337,2
	3,5	2606,1	2577,0	2490,7	2449,2	2402,2	2349,3
	4	2619,0	2589,7	2502,9	2461,3	2413,8	2360,4
	4,5	2631,4	2601,9	2514,3	2472,4	2424,4	2370,6
6	1	2771,4	2740,2	2647,5	2603,0	2552,4	2495,6
	2	3118,1	3082,1	2975,5	2924,5	2866,4	2801,2
	2,5	3134,8	3098,7	2991,5	2940,2	2881,8	2816,2
	3	3151,4	3115,0	3007,2	2955,6	2896,8	2830,8
	3,5	3167,4	3130,9	3022,5	2970,5	2911,3	2844,9

Cuadro I- 2. Comparación del cortante basal longitudinal en función de RP. PC y PR equivalente. Sismo X.

Claros	RP	Razón de Cortante Basal Longitudinal (PC/PR equiv)					
		Ángulo (°)					
		0	30	60	70	80	90
3	1	1,000	0,989	0,954	0,937	0,919	0,898
	4	1,000	0,988	0,953	0,936	0,917	0,895
	4,5	1,000	0,988	0,953	0,936	0,916	0,895
	5	1,000	0,988	0,953	0,935	0,915	0,893
	5,5	1,000	0,950	0,952	0,935	0,915	0,892
4	1	1,000	0,989	0,955	0,939	0,920	0,900
	4	1,000	0,989	0,954	0,937	0,918	0,896
	4,5	1,000	0,991	0,956	0,939	0,919	0,897
	5	1,000	0,993	0,957	0,940	0,920	0,898
	5,5	1,000	0,993	0,957	0,939	0,919	0,897
5	1	1,000	0,989	0,955	0,939	0,921	0,900
	3	1,152	1,138	1,101	1,082	1,061	1,038
	3,5	1,000	0,989	0,956	0,940	0,922	0,901
	4	1,000	0,989	0,956	0,940	0,922	0,901
	4,5	1,000	0,989	0,956	0,940	0,921	0,901
6	1	1,000	0,989	0,955	0,939	0,921	0,901
	2	1,000	0,988	0,954	0,938	0,919	0,898
	2,5	1,000	0,988	0,954	0,938	0,919	0,898
	3	1,000	0,988	0,954	0,938	0,919	0,898
	3,5	1,000	0,988	0,954	0,938	0,919	0,898

Cuadro I- 3. Comparación del cortante basal longitudinal en función de RP. PC y PR con RP=1. Sismo X.

Claros	RP	Razón de Cortante Basal Longitudinal (PC/PR con RP=1)					
		Ángulo (°)					
		0	30	60	70	80	90
3	1	1,000	0,989	0,954	0,937	0,919	0,898
	4	1,261	1,246	1,202	1,180	1,156	1,129
	4,5	1,265	1,250	1,206	1,184	1,160	1,132
	5	1,270	1,255	1,210	1,188	1,163	1,135
	5,5	1,274	1,210	1,213	1,190	1,165	1,137
4	1	1,000	0,989	0,955	0,939	0,920	0,900
	4	1,189	1,177	1,135	1,115	1,091	1,066
	4,5	1,190	1,180	1,137	1,117	1,094	1,068
	5	1,191	1,183	1,140	1,120	1,096	1,070
	5,5	1,195	1,186	1,143	1,122	1,098	1,072
5	1	1,000	0,989	0,955	0,939	0,921	0,900
	3	1,152	1,138	1,101	1,082	1,061	1,038
	3,5	1,158	1,145	1,106	1,088	1,067	1,043
	4	1,163	1,150	1,112	1,093	1,072	1,048
	4,5	1,169	1,156	1,117	1,098	1,077	1,053
6	1	1,000	0,989	0,955	0,939	0,921	0,901
	2	1,125	1,112	1,074	1,055	1,034	1,011
	2,5	1,131	1,118	1,079	1,061	1,040	1,016
	3	1,137	1,124	1,085	1,066	1,045	1,021
	3,5	1,143	1,130	1,091	1,072	1,051	1,027

b. Respuesta sísmica transversal

Cuadro I- 4. Cortante basal transversal en función de RP. Sismo X.

Claros	RP	Cortante Basal Transversal [Ton]					
		Ángulo (°)					
		0	30	60	70	80	90
3	1	215,3	212,5	239,7	258,2	279,4	303,0
	4	238,2	263,3	321,7	350,6	387,9	430,8
	4,5	230,6	260,2	330,7	360,6	397,9	441,8
	5	224,5	257,2	336,8	368,2	405,7	449,8
	5,5	219,6	255,1	341,2	374,1	412,0	456,5
4	1	328,0	350,8	426,7	463,7	503,9	544,7
	4	373,9	406,4	477,7	508,1	546,3	592,1
	4,5	371,9	409,7	489,1	519,1	553,4	595,8
	5	367,8	407,3	494,2	526,1	559,5	599,1
	5,5	359,9	403,4	496,1	530,2	564,4	602,5
5	1	439,0	483,1	589,8	636,1	686,9	742,9
	3	495,6	539,4	667,9	722,2	781,0	842,4
	3,5	549,3	592,7	719,1	768,2	825,7	888,6
	4	562,2	615,6	754,9	803,8	859,3	922,2
	4,5	552,0	613,4	766,6	821,4	878,6	940,6
6	1	561,7	612,2	738,7	802,2	867,7	939,7
	2	554,9	608,2	740,3	805,0	871,8	945,0
	2,5	572,1	624,5	776,4	840,0	912,1	988,1
	3	626,8	675,4	823,8	878,0	950,4	1024,9
	3,5	646,7	698,7	851,4	903,2	970,8	1044,5

Cuadro I- 5. Comparación del cortante basal transversal en función de RP. PC y PR equivalente. Sismo X.

Claros	RP	Razón de Cortante Basal Transversal (PC/PR equiv)					
		Ángulo (°)					
		0	30	60	70	80	90
3	1	1,000	0,987	1,114	1,199	1,298	1,407
	4	1,000	1,105	1,351	1,472	1,629	1,809
	4,5	1,000	1,128	1,434	1,563	1,725	1,915
	5	1,000	1,146	1,500	1,640	1,807	2,003
	5,5	1,000	1,161	1,554	1,703	1,876	2,078
4	1	1,000	1,069	1,301	1,414	1,536	1,661
	4	1,000	1,087	1,278	1,359	1,461	1,583
	4,5	1,000	1,102	1,315	1,395	1,488	1,602
	5	1,000	1,107	1,344	1,430	1,521	1,629
	5,5	1,000	1,121	1,379	1,473	1,568	1,674
5	1	1,000	1,100	1,343	1,449	1,565	1,692
	3	1,129	1,229	1,521	1,645	1,779	1,919
	3,5	1,000	1,079	1,309	1,399	1,503	1,618
	4	1,000	1,095	1,343	1,430	1,528	1,640
	4,5	1,000	1,111	1,389	1,488	1,592	1,704
6	1	1,000	1,090	1,315	1,428	1,545	1,673
	2	1,000	1,096	1,334	1,451	1,571	1,703
	2,5	1,000	1,091	1,357	1,468	1,594	1,727
	3	1,000	1,078	1,314	1,401	1,516	1,635
	3,5	1,000	1,080	1,316	1,397	1,501	1,615

Cuadro I- 6. Comparación del cortante basal transversal en función de RP. PC y PR con RP=1. Sismo X.

Claros	RP	Razón de Cortante Basal Transversal (PC/PR con RP=1)					
		Ángulo (°)					
		0	30	60	70	80	90
3	1	1,000	0,987	1,114	1,199	1,298	1,407
	4	1,106	1,223	1,494	1,629	1,802	2,001
	4,5	1,071	1,209	1,536	1,675	1,848	2,052
	5	1,043	1,195	1,565	1,710	1,884	2,089
	5,5	1,020	1,185	1,585	1,738	1,914	2,120
4	1	1,000	1,069	1,301	1,414	1,536	1,661
	4	1,140	1,239	1,456	1,549	1,666	1,805
	4,5	1,134	1,249	1,491	1,582	1,687	1,816
	5	1,121	1,242	1,507	1,604	1,706	1,826
	5,5	1,097	1,230	1,512	1,616	1,720	1,837
5	1	1,000	1,100	1,343	1,449	1,565	1,692
	3	1,129	1,229	1,521	1,645	1,779	1,919
	3,5	1,251	1,350	1,638	1,750	1,881	2,024
	4	1,281	1,402	1,720	1,831	1,957	2,101
	4,5	1,257	1,397	1,746	1,871	2,001	2,142
6	1	1,000	1,090	1,315	1,428	1,545	1,673
	2	0,988	1,083	1,318	1,433	1,552	1,682
	2,5	1,019	1,112	1,382	1,496	1,624	1,759
	3	1,116	1,202	1,467	1,563	1,692	1,825
	3,5	1,151	1,244	1,516	1,608	1,728	1,860

2. Sismo Y

a. Respuesta sísmica longitudinal

Cuadro I- 7. Cortante basal longitudinal en función de RP. Sismo Y.

Claros	RP	Cortante Basal Longitudinal (Ton)					
		Ángulo (°)					
		0	30	60	70	80	90
3	1	362,8	359,0	347,1	341,7	335,5	328,7
	4	457,5	452,6	438,1	431,0	423,3	415,0
	4,5	459,1	454,2	439,8	432,6	424,9	416,5
	5	460,7	455,8	441,4	434,3	426,4	418,1
	5,5	462,1	457,2	442,9	435,7	427,9	419,5
4	1	519,2	514,0	498,7	491,6	483,7	475,1
	4	617,6	611,8	592,1	582,5	571,4	559,4
	4,5	619,2	613,5	593,8	584,1	572,9	560,5
	5	620,9	615,2	595,4	585,7	574,3	561,7
	5,5	622,5	616,8	596,9	587,1	575,7	562,9
5	1	675,4	669,0	650,4	641,9	632,5	622,3
	3	777,8	770,6	748,7	738,3	726,7	714,2
	3,5	781,8	774,9	753,3	742,6	730,6	717,6
	4	785,7	779,1	758,1	747,4	735,2	721,9
	4,5	789,4	783,0	762,5	751,9	739,6	725,9
6	1	831,4	824,2	802,7	793,1	782,4	771,0
	2	932,8	927,2	902,6	891,8	879,7	866,9
	2,5	937,3	932,6	906,8	894,7	881,3	867,1
	3	941,6	939,3	914,6	901,3	886,9	871,5
	3,5	945,8	946,1	923,4	910,1	895,2	879,1

Cuadro I- 8. Comparación del cortante basal longitudinal en función de RP. PC y PR equivalente. Sismo Y.

Claros	RP	Razón de Cortante Basal Longitudinal (PC/PR equiv)					
		Ángulo (°)					
		0	30	60	70	80	90
3	1	1,000	0,989	0,957	0,942	0,925	0,906
	4	1,000	0,989	0,958	0,942	0,925	0,907
	4,5	1,000	0,989	0,958	0,942	0,925	0,907
	5	1,000	0,989	0,958	0,943	0,926	0,907
	5,5	1,000	0,989	0,958	0,943	0,926	0,908
4	1	1,000	0,990	0,960	0,947	0,932	0,915
	4	1,000	0,991	0,959	0,943	0,925	0,906
	4,5	1,000	0,991	0,959	0,943	0,925	0,905
	5	1,000	0,991	0,959	0,943	0,925	0,905
	5,5	1,000	0,991	0,959	0,943	0,925	0,904
5	1	1,000	0,990	0,963	0,950	0,936	0,921
	3	1,000	0,991	0,963	0,949	0,934	0,918
	3,5	1,000	0,991	0,964	0,950	0,934	0,918
	4	1,000	0,992	0,965	0,951	0,936	0,919
	4,5	1,000	0,992	0,966	0,953	0,937	0,920
6	1	1,000	0,991	0,965	0,954	0,941	0,927
	2	1,000	0,994	0,968	0,956	0,943	0,929
	2,5	1,000	0,995	0,968	0,955	0,940	0,925
	3	1,000	0,997	0,971	0,957	0,942	0,926
	3,5	1,000	1,000	0,976	0,962	0,947	0,929

Cuadro I- 9. Comparación del cortante basal longitudinal en función de RP. PC y PR con RP=1. Sismo Y.

Claros	RP	Razón de Cortante Basal Longitudinal (PC/PR con RP=1)					
		Ángulo (°)					
		0	30	60	70	80	90
3	1	1,000	0,989	0,957	0,942	0,925	0,906
	4	1,261	1,248	1,208	1,188	1,167	1,144
	4,5	1,265	1,252	1,212	1,192	1,171	1,148
	5	1,270	1,256	1,217	1,197	1,175	1,152
	5,5	1,274	1,260	1,221	1,201	1,179	1,156
4	1	1,000	0,990	0,960	0,947	0,932	0,915
	4	1,189	1,178	1,140	1,122	1,101	1,077
	4,5	1,193	1,182	1,144	1,125	1,103	1,080
	5	1,196	1,185	1,147	1,128	1,106	1,082
	5,5	1,199	1,188	1,150	1,131	1,109	1,084
5	1	1,000	0,990	0,963	0,950	0,936	0,921
	3	1,152	1,141	1,108	1,093	1,076	1,057
	3,5	1,158	1,147	1,115	1,099	1,082	1,062
	4	1,163	1,153	1,122	1,107	1,088	1,069
	4,5	1,169	1,159	1,129	1,113	1,095	1,075
6	1	1,000	0,991	0,965	0,954	0,941	0,927
	2	1,122	1,115	1,086	1,073	1,058	1,043
	2,5	1,127	1,122	1,091	1,076	1,060	1,043
	3	1,133	1,130	1,100	1,084	1,067	1,048
	3,5	1,138	1,138	1,111	1,095	1,077	1,057

b. Respuesta sísmica transversal

Cuadro I- 10. Cortante basal transversal en función de RP. Sismo Y.

Claros	RP	Cortante Basal Transversal [Ton]					
		Ángulo (°)					
		0	30	60	70	80	90
3	1	717,6	692,7	746,3	790,5	840,3	895,9
	4	793,9	806,6	791,7	804,4	837,8	889,3
	4,5	768,8	784,7	787,5	795,4	819,0	863,1
	5	748,4	764,4	780,8	787,4	804,9	842,8
	5,5	732,2	747,5	771,6	778,0	792,4	825,7
4	1	1093,4	1098,4	1177,2	1233,2	1300,3	1371,3
	4	1246,3	1256,8	1251,4	1247,4	1269,5	1327,4
	4,5	1245,2	1263,1	1280,6	1273,5	1276,8	1315,9
	5	1227,8	1249,2	1285,1	1284,1	1281,7	1306,0
	5,5	1207,4	1230,4	1277,9	1283,6	1282,6	1299,2
5	1	1463,4	1493,1	1593,4	1665,1	1744,5	1830,5
	3	1652,0	1610,9	1615,9	1648,6	1706,3	1783,0
	3,5	1830,9	1793,0	1782,7	1777,9	1809,1	1870,2
	4	1874,1	1870,8	1907,1	1894,4	1907,1	1957,3
	4,5	1839,9	1860,9	1942,6	1947,8	1958,6	1994,1
6	1	1872,2	1901,3	1999,4	2095,5	2182,4	2282,1
	2	1824,1	1872,5	1957,5	2050,4	2134,6	2232,8
	2,5	1943,6	1873,8	1882,7	1939,8	2016,0	2117,6
	3	2108,2	2033,2	2002,1	1980,7	2024,3	2095,4
	3,5	2134,8	2110,5	2114,4	2081,5	2100,7	2153,7

Cuadro I- 11. Comparación del cortante basal transversal en función de RP. PC y PR equivalente. Sismo Y.

Claros	RP	Razón de Cortante Basal Transversal (PC/PR equiv)					
		Ángulo (°)					
		0	30	60	70	80	90
3	1	1,000	0,965	1,040	1,102	1,171	1,248
	4	1,000	1,016	0,997	1,013	1,055	1,120
	4,5	1,000	1,021	1,024	1,035	1,065	1,123
	5	1,000	1,021	1,043	1,052	1,075	1,126
	5,5	1,000	1,021	1,054	1,063	1,082	1,128
4	1	1,000	1,005	1,077	1,128	1,189	1,254
	4	1,000	1,008	1,004	1,001	1,019	1,065
	4,5	1,000	1,014	1,028	1,023	1,025	1,057
	5	1,000	1,017	1,047	1,046	1,044	1,064
	5,5	1,000	1,019	1,058	1,063	1,062	1,076
5	1	1,000	1,020	1,089	1,138	1,192	1,251
	3	1,000	0,975	0,978	0,998	1,033	1,079
	3,5	1,000	0,979	0,974	0,971	0,988	1,021
	4	1,000	0,998	1,018	1,011	1,018	1,044
	4,5	1,000	1,011	1,056	1,059	1,064	1,084
6	1	1,000	1,016	1,068	1,119	1,166	1,219
	2	1,000	1,026	1,073	1,124	1,170	1,224
	2,5	1,000	0,964	0,969	0,998	1,037	1,090
	3	1,000	0,964	0,950	0,940	0,960	0,994
	3,5	1,000	0,989	0,990	0,975	0,984	1,009

Cuadro I- 12. Comparación del cortante basal transversal en función de RP. PC y PR con RP=1. Sismo Y.

Claros	RP	Razón de Cortante Basal Transversal (PC/PR con RP=1)					
		Ángulo (°)					
		0	30	60	70	80	90
3	1	1,000	0,965	1,040	1,102	1,171	1,248
	4	1,106	1,124	1,103	1,121	1,168	1,239
	4,5	1,071	1,094	1,097	1,108	1,141	1,203
	5	1,043	1,065	1,088	1,097	1,122	1,174
	5,5	1,020	1,042	1,075	1,084	1,104	1,151
4	1	1,000	1,005	1,077	1,128	1,189	1,254
	4	1,140	1,149	1,144	1,141	1,161	1,214
	4,5	1,139	1,155	1,171	1,165	1,168	1,203
	5	1,123	1,142	1,175	1,174	1,172	1,194
	5,5	1,104	1,125	1,169	1,174	1,173	1,188
5	1	1,000	1,020	1,089	1,138	1,192	1,251
	3	1,129	1,101	1,104	1,127	1,166	1,218
	3,5	1,251	1,225	1,218	1,215	1,236	1,278
	4	1,281	1,278	1,303	1,295	1,303	1,337
	4,5	1,257	1,272	1,327	1,331	1,338	1,363
6	1	1,000	1,016	1,068	1,119	1,166	1,219
	2	0,974	1,000	1,046	1,095	1,140	1,193
	2,5	1,038	1,001	1,006	1,036	1,077	1,131
	3	1,126	1,086	1,069	1,058	1,081	1,119
	3,5	1,140	1,127	1,129	1,112	1,122	1,150

APÉNDICE J: COMPARACIÓN DE CORTANTES, PUENTE CURVO-PUENTE RECTO, RELACIÓN DE LONGITUD ENTRE CLAROS

1. Sismo X

a. Respuesta sísmica longitudinal

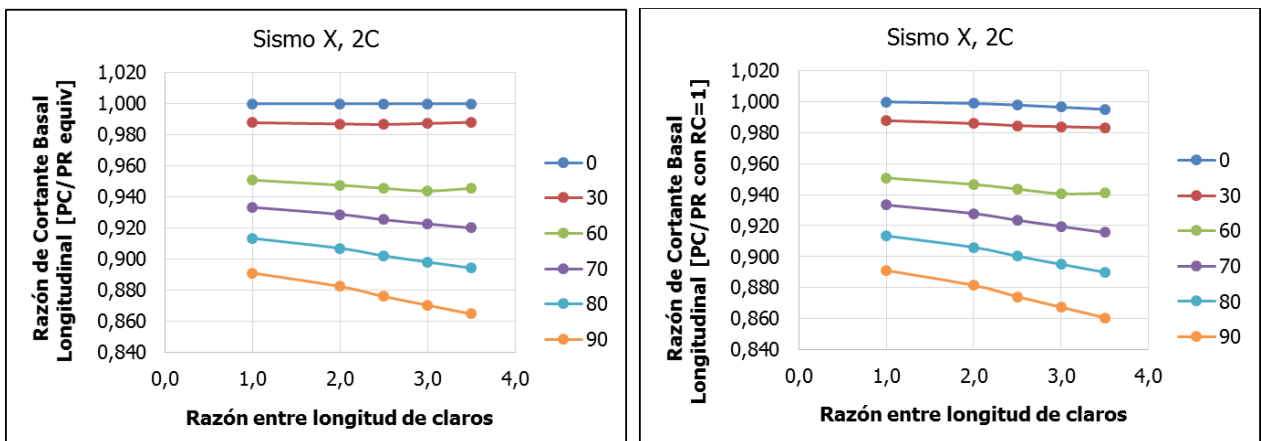


Figura J- 1. Razón de Cortante Basal Longitudinal en función de RC. Sismo X, 2C.

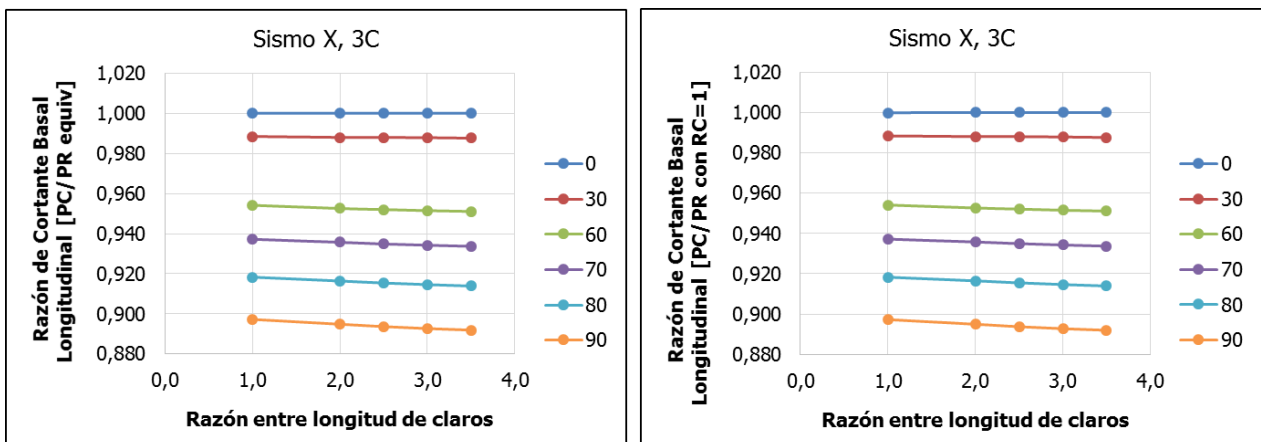


Figura J- 2. Razón de Cortante Basal Longitudinal en función de RC. Sismo X, 3C.

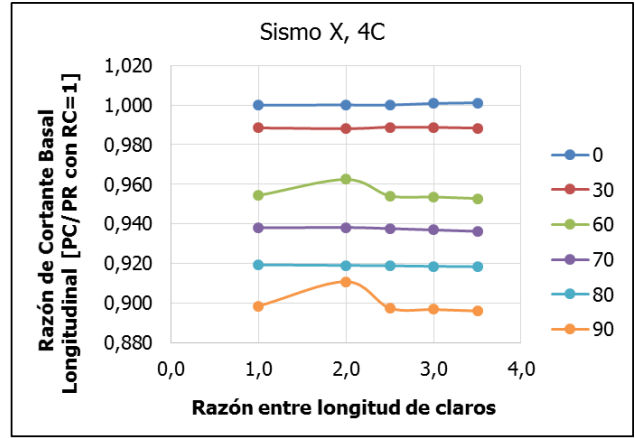
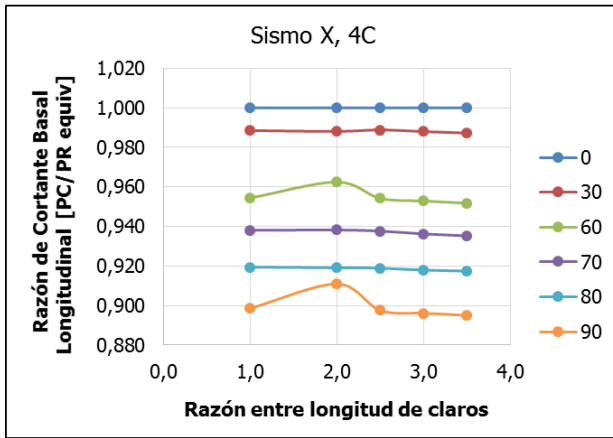


Figura J- 3. Razón de Cortante Basal Longitudinal en función de RC. Sismo X, 4C.

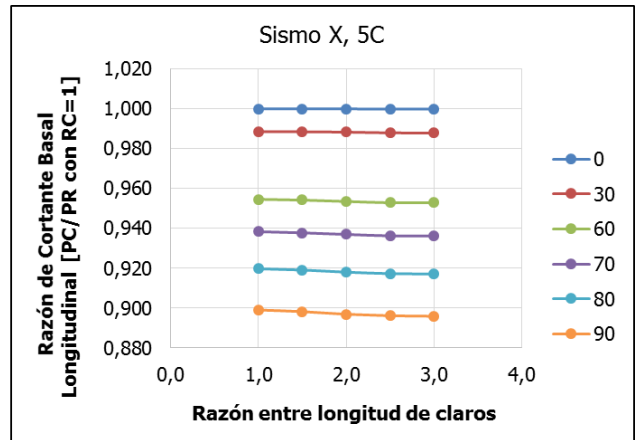
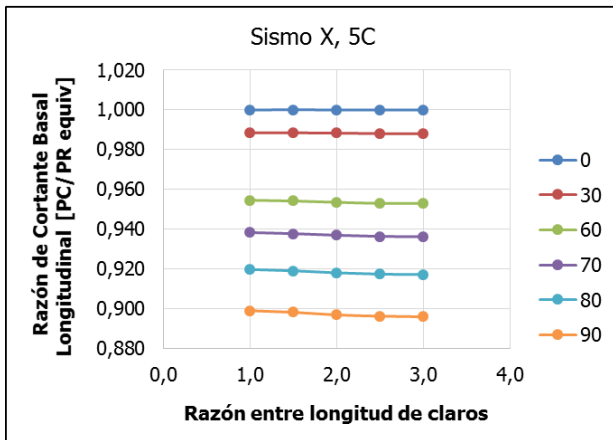


Figura J- 4. Razón de Cortante Basal Longitudinal en función de RC. Sismo X, 5C.

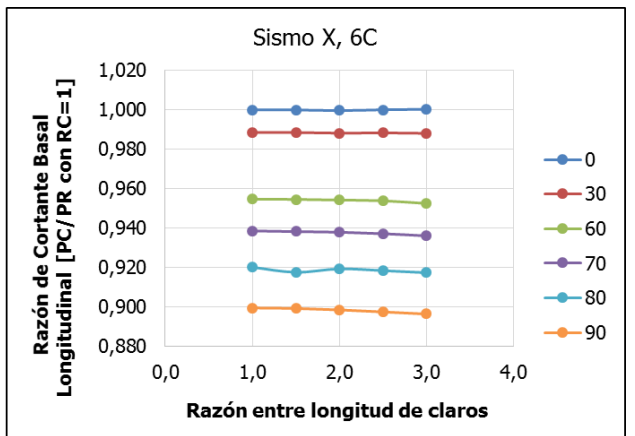
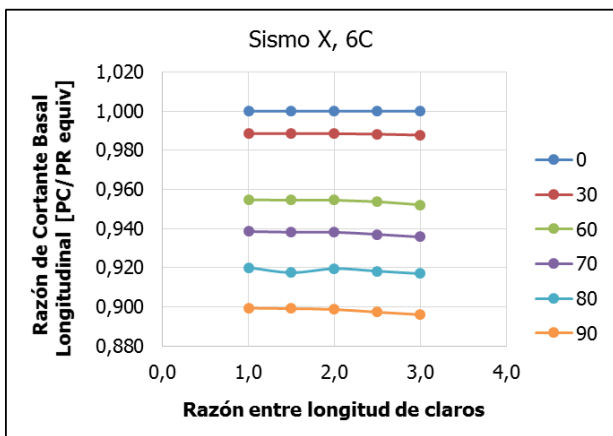


Figura J- 5. Razón de Cortante Basal Longitudinal en función de RC. Sismo X, 6C.

b. Respuesta sísmica transversal

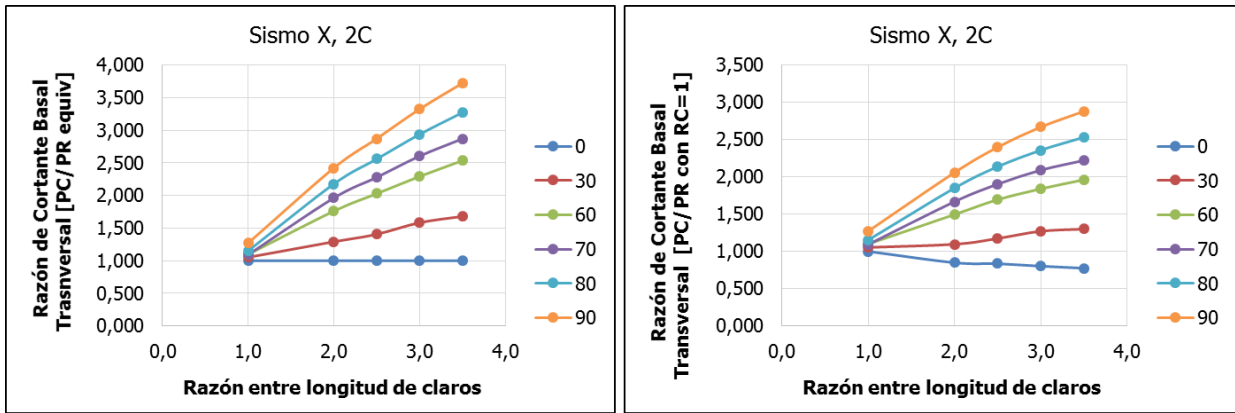


Figura J- 6. Razón de Cortante Basal Transversal en función de RC. Sismo X, 2C.

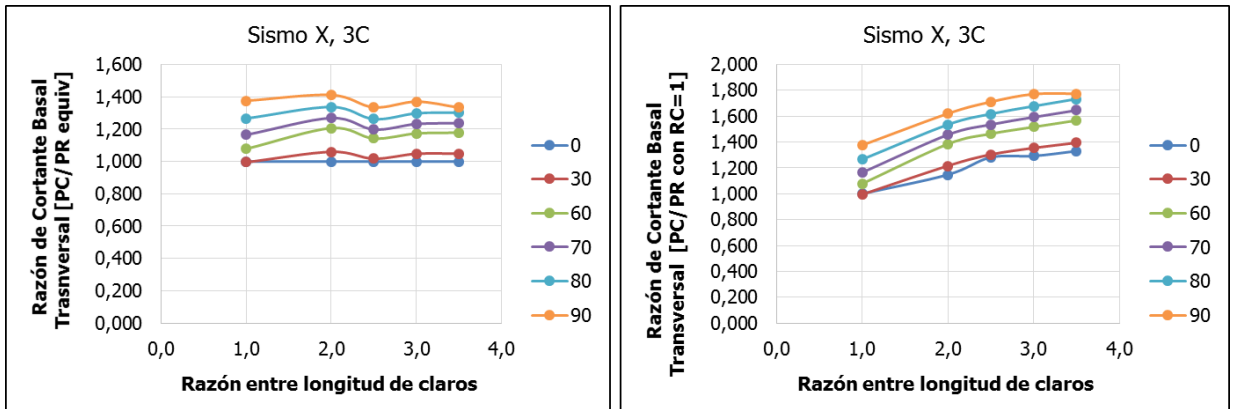


Figura J- 7. Razón de Cortante Basal Transversal en función de RC. Sismo X, 3C.

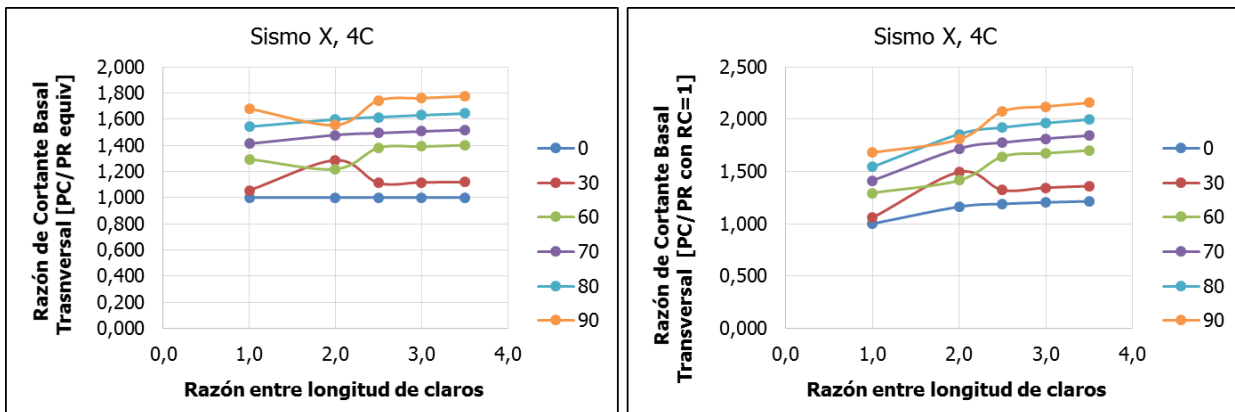


Figura J- 8. Razón de Cortante Basal Transversal en función de RC. Sismo X, 4C.

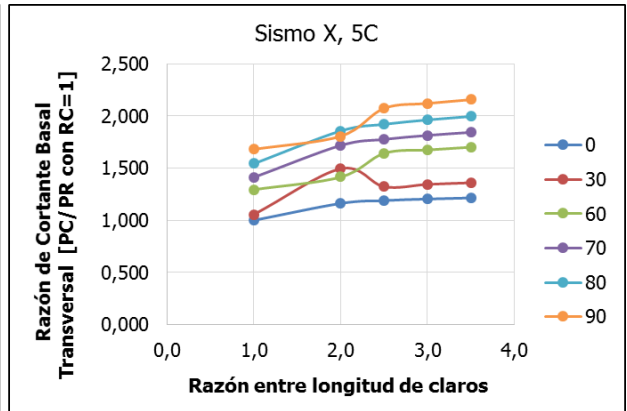
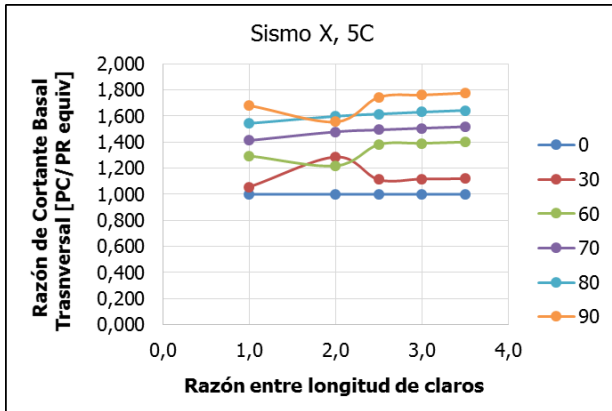


Figura J- 9. Razón de Cortante Basal Transversal en función de RC. Sismo X, 5C.

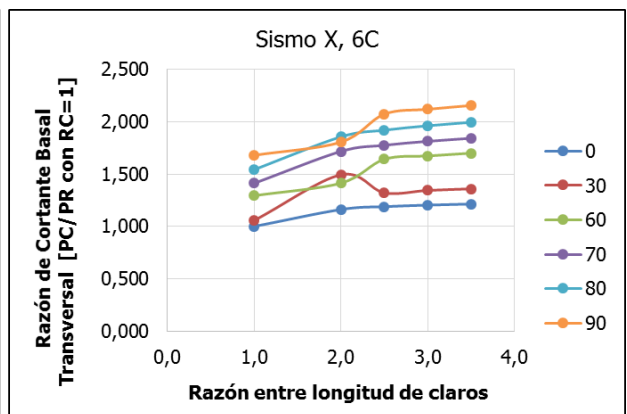
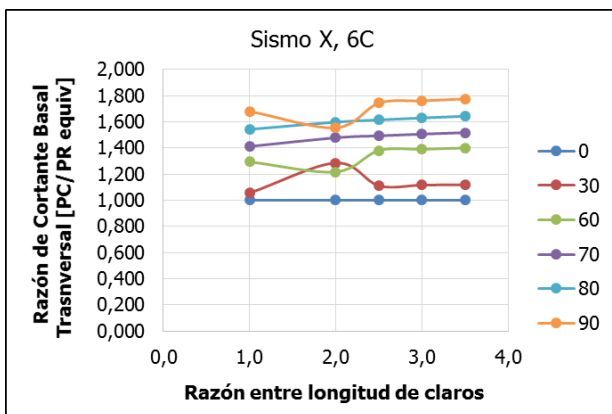


Figura J- 10. Razón de Cortante Basal Transversal en función de RC. Sismo X, 6C.

2. Sismo Y

a. Respuesta sísmica longitudinal

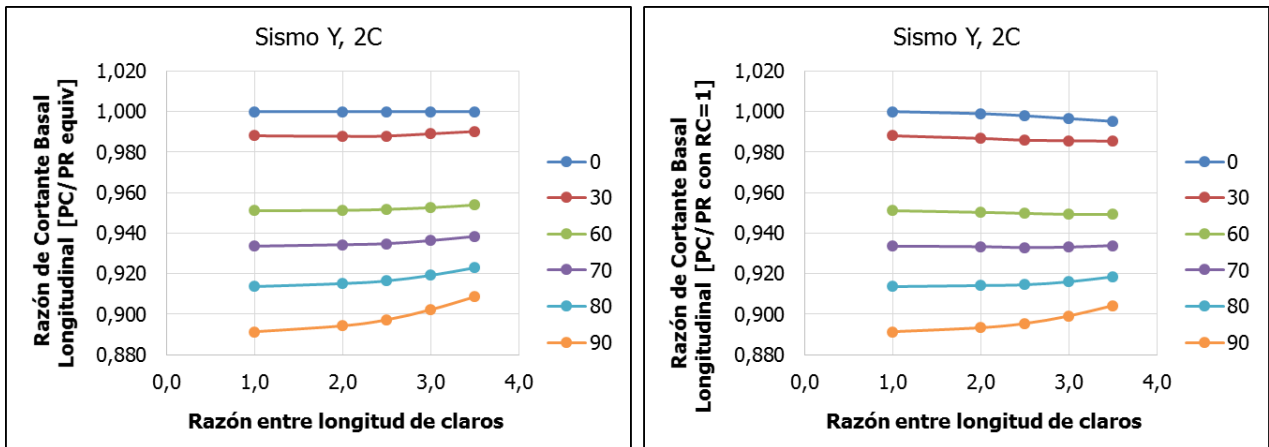


Figura J- 11. Razón de Cortante Basal Longitudinal en función de RC. Sismo Y, 2C.

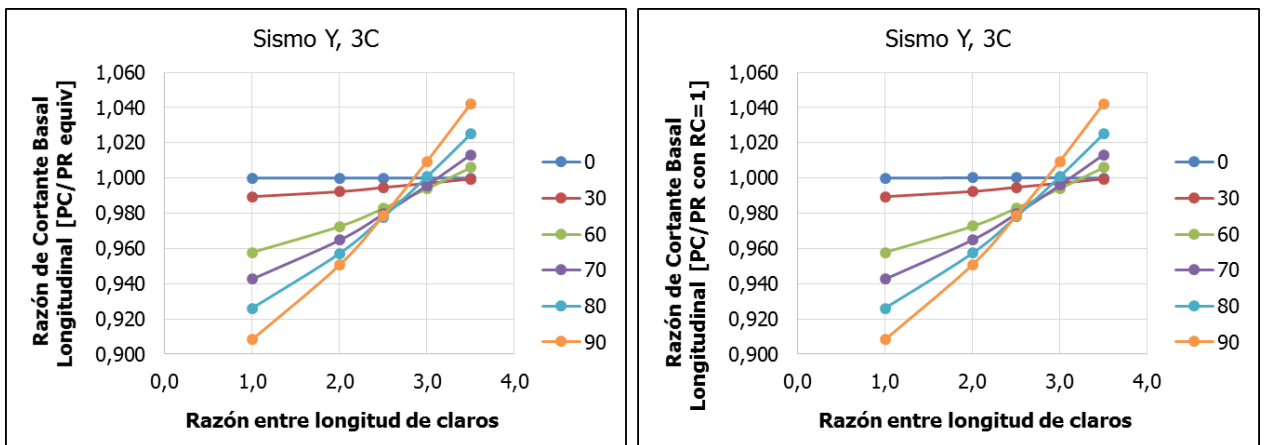


Figura J- 12. Razón de Cortante Basal Longitudinal en función de RC. Sismo Y, 3C.

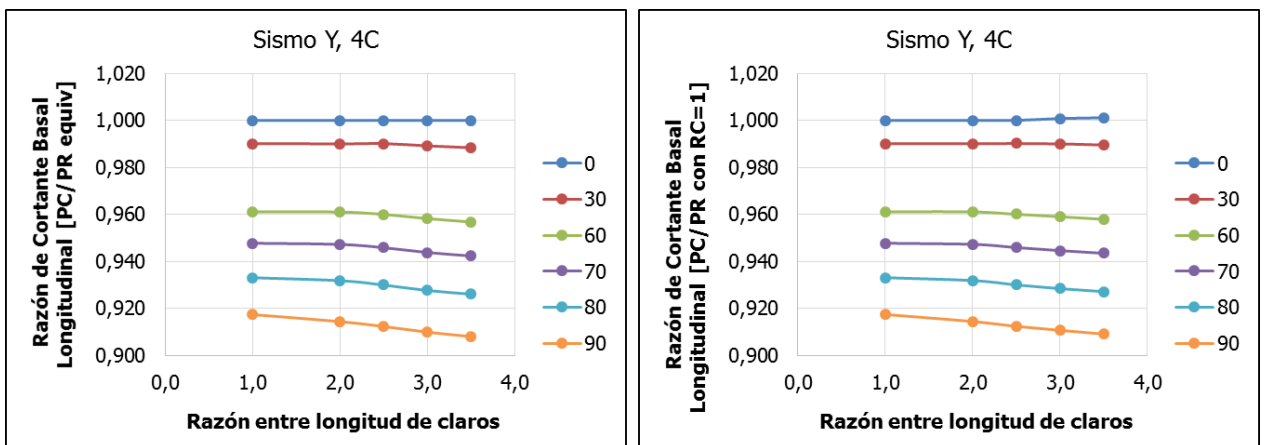


Figura J- 13. Razón de Cortante Basal Longitudinal en función de RC. Sismo Y, 4C.

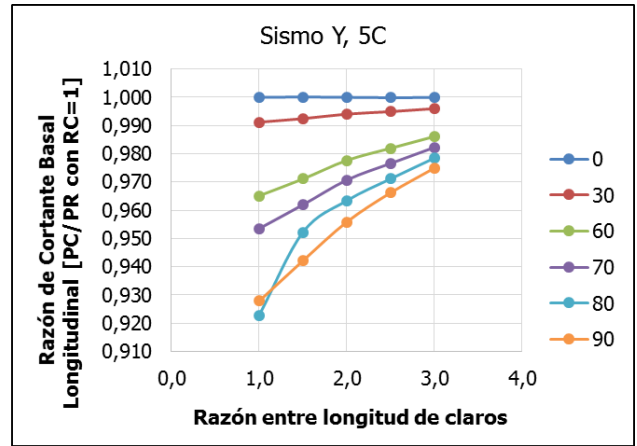
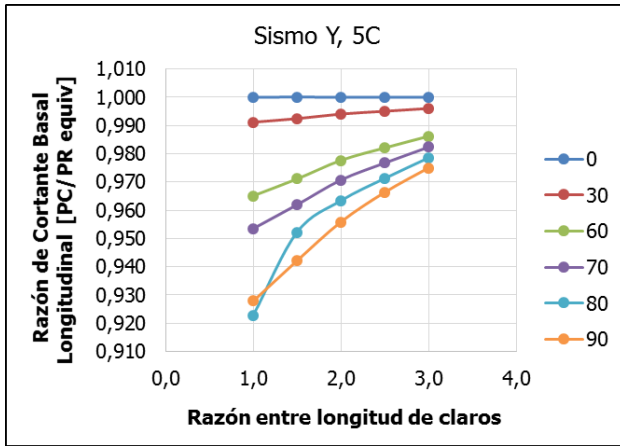


Figura J- 14. Razón de Cortante Basal Longitudinal en función de RC. Sismo Y, 5C.

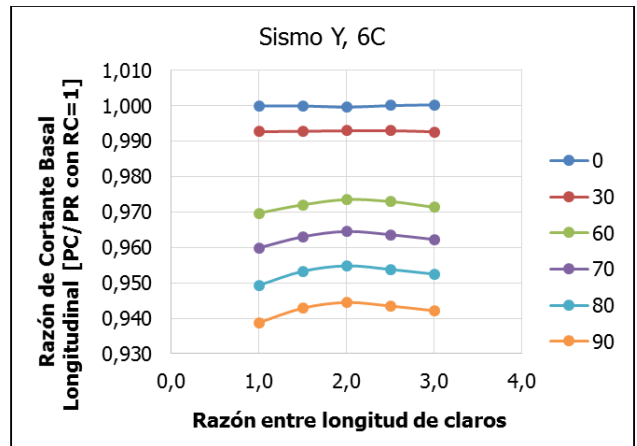
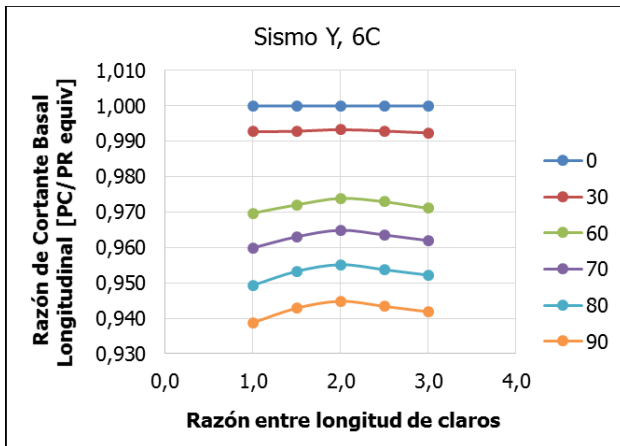


Figura J- 15. Razón de Cortante Basal Longitudinal en función de RC. Sismo Y, 6C.

a. Respuesta sísmica transversal

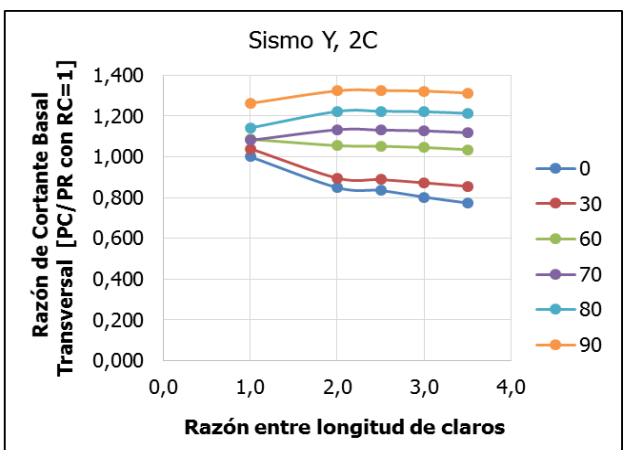
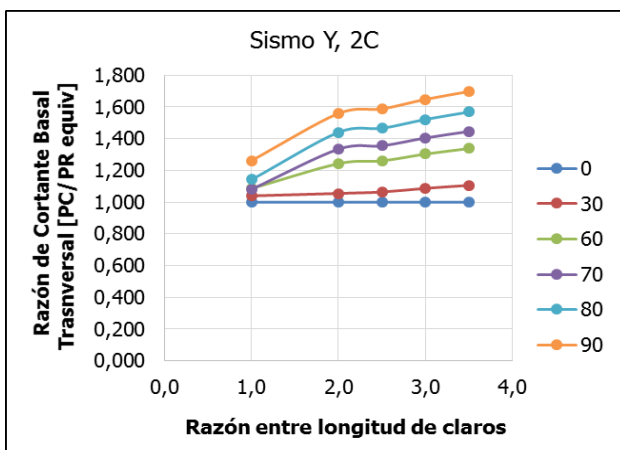


Figura J- 16. Razón de Cortante Basal Transversal en función de RC. Sismo Y, 2C.

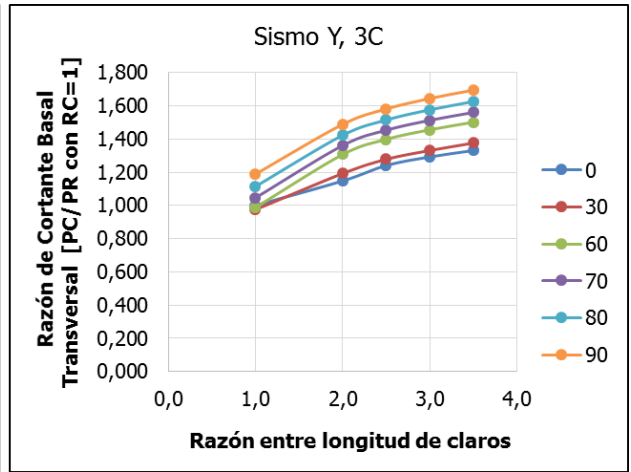
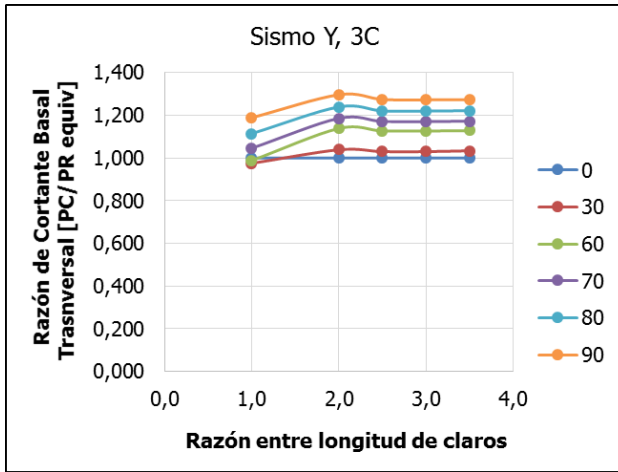


Figura J- 17. Razón de Cortante Basal Transversal en función de RC. Sismo Y, 3C.

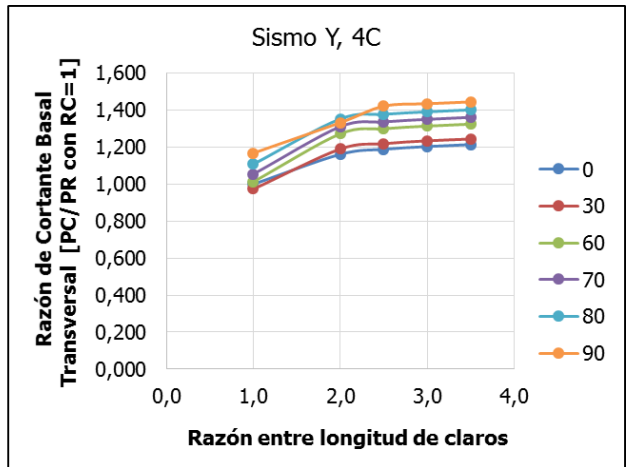
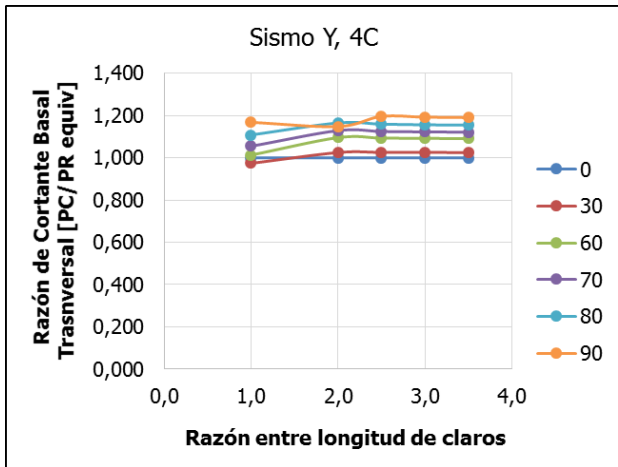


Figura J- 18. Razón de Cortante Basal Transversal en función de RC. Sismo Y, 4C.

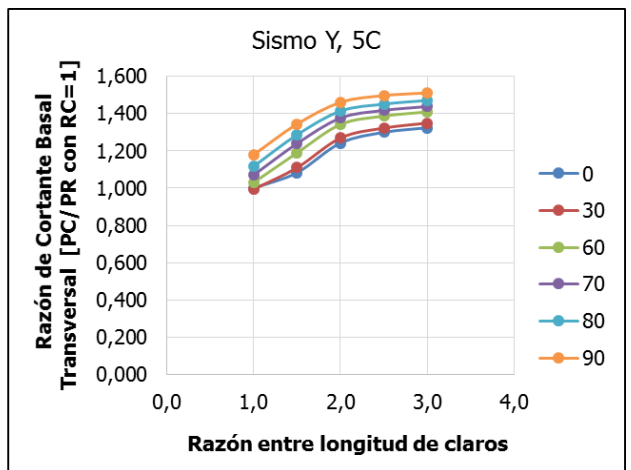
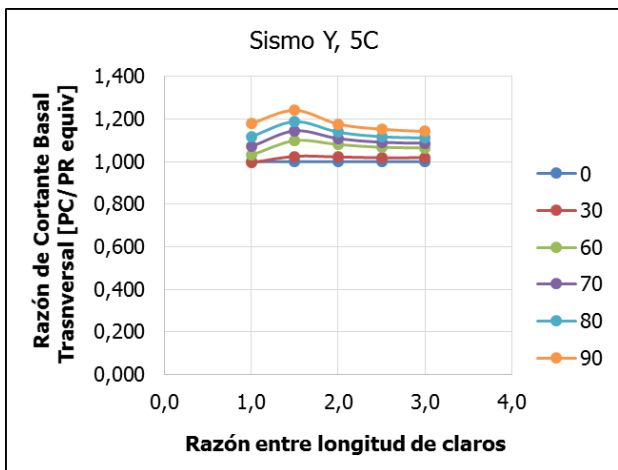


Figura J- 19. Razón de Cortante Basal Transversal en función de RC. Sismo Y, 5C.

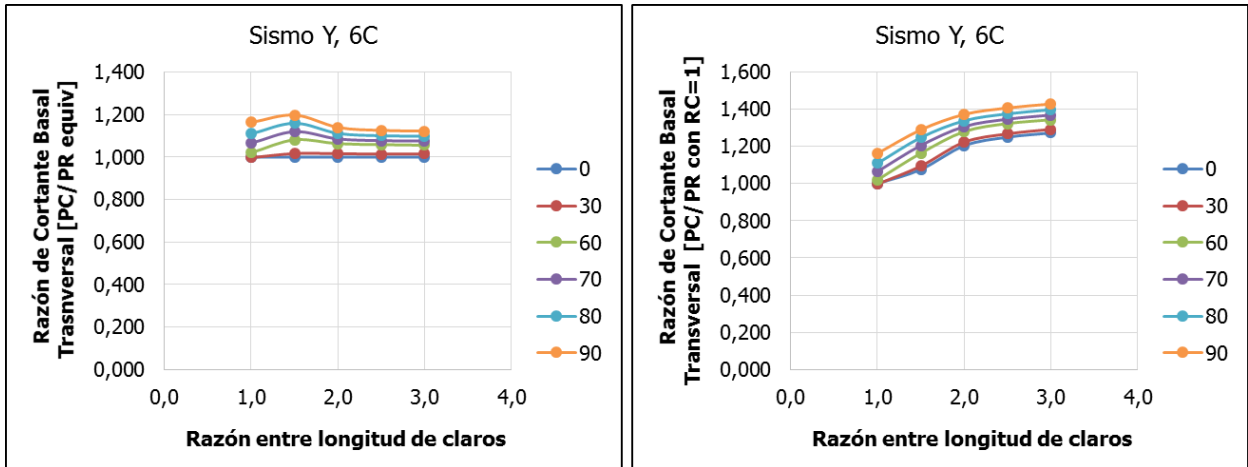


Figura J- 20. Razón de Cortante Basal Transversal en función de RC. Sismo Y, 6C.

APÉNDICE K: COMPARACIÓN DE CORTANTES, PUENTE CURVO-PUENTE RECTO, RELACIÓN DE RIGIDEZ ENTRE PILAS

1. Sismo X

a. Respuesta sísmica longitudinal

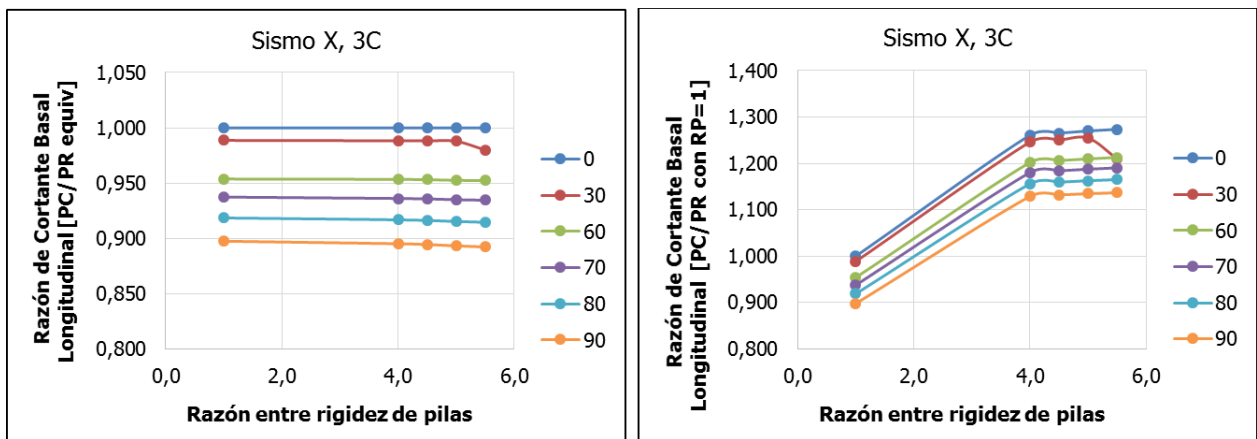


Figura K- 1. Razón de Cortante Basal Longitudinal en función de RP. Sismo X, 3C.

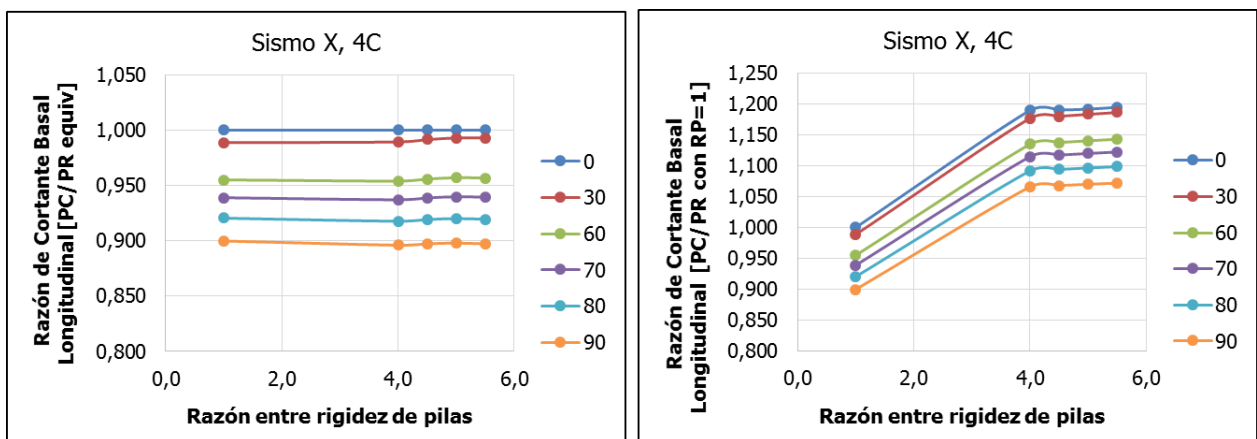


Figura K- 2. Razón de Cortante Basal Longitudinal en función de RP. Sismo X, 4C.

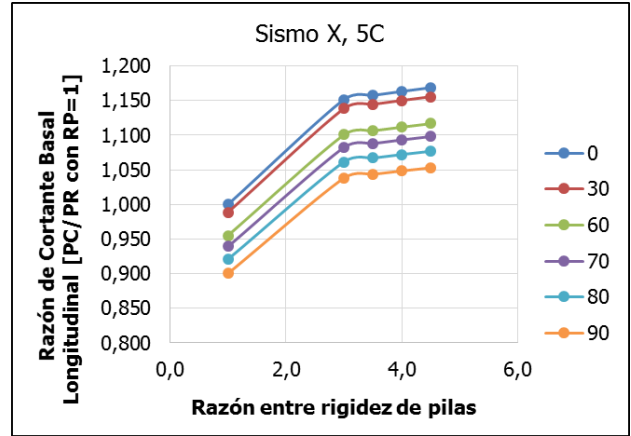
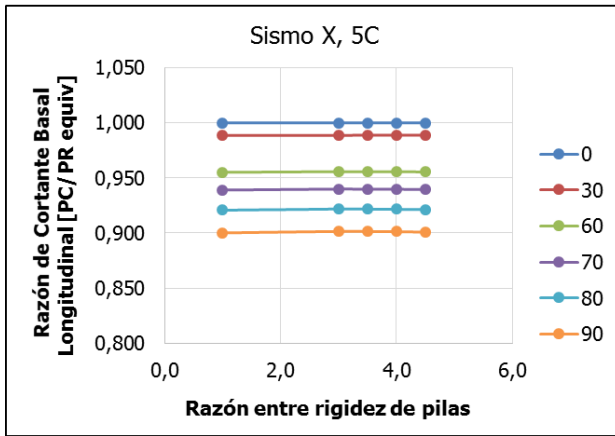


Figura K- 3. Razón de Cortante Basal Longitudinal en función de RP. Sismo X, 5C.

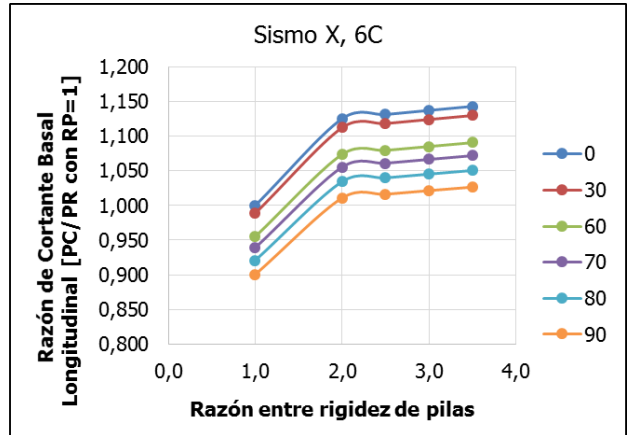
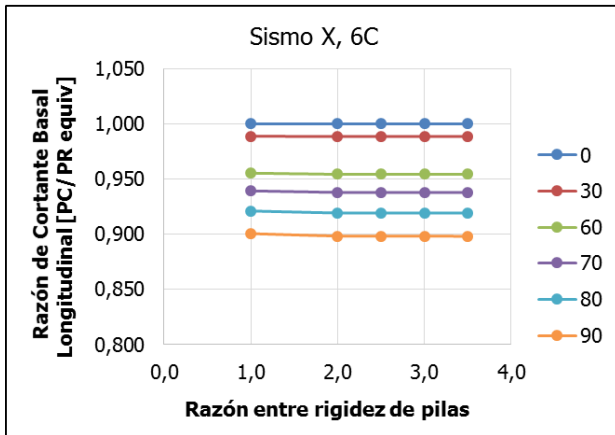


Figura K- 4. Razón de Cortante Basal Longitudinal en función de RP. Sismo X, 6C.

b. Respuesta sísmica transversal

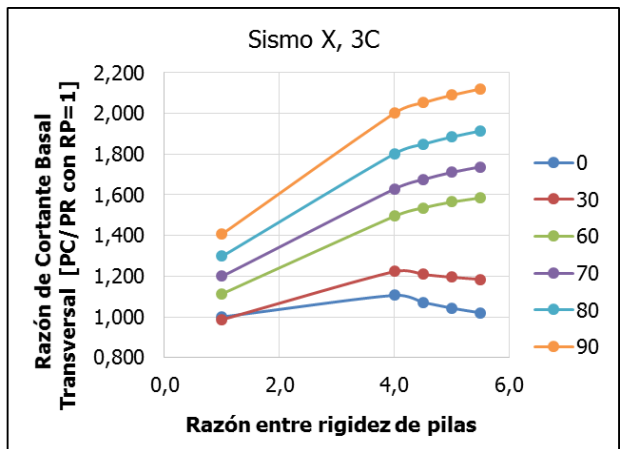
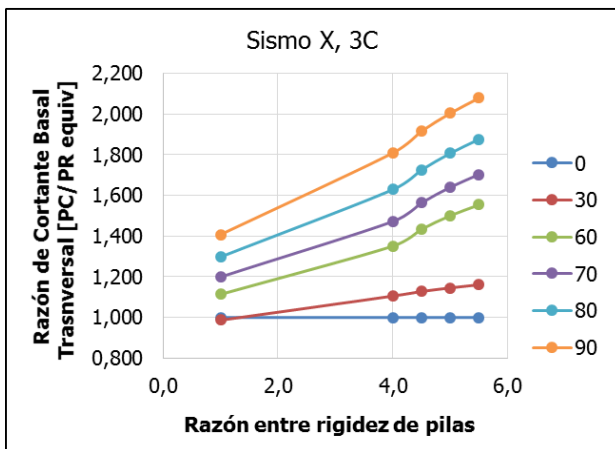


Figura K- 5. Razón de Cortante Basal Transversal en función de RP. Sismo X, 3C.

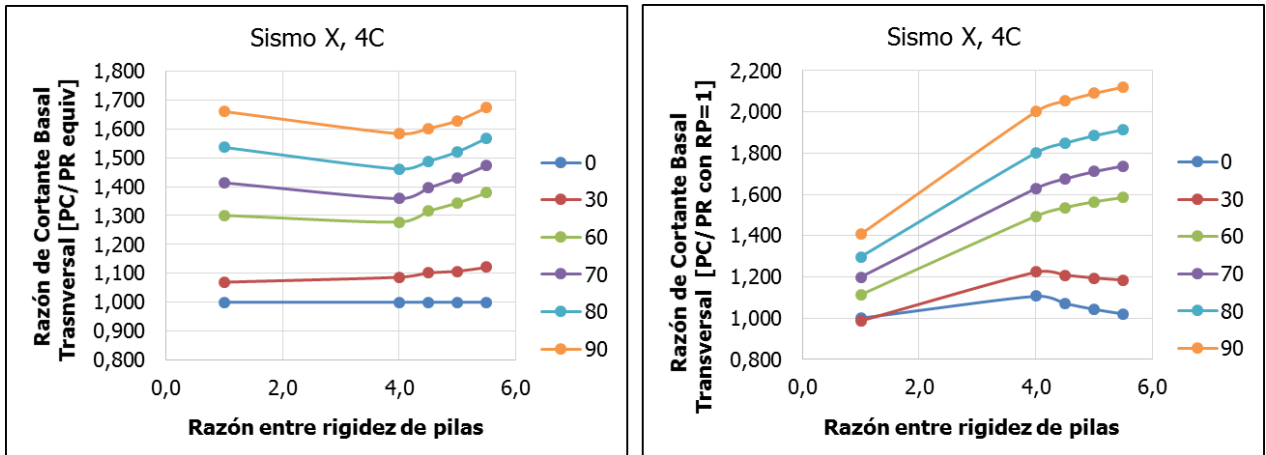


Figura K- 6. Razón de Cortante Basal Transversal en función de RP. Sismo X, 4C.

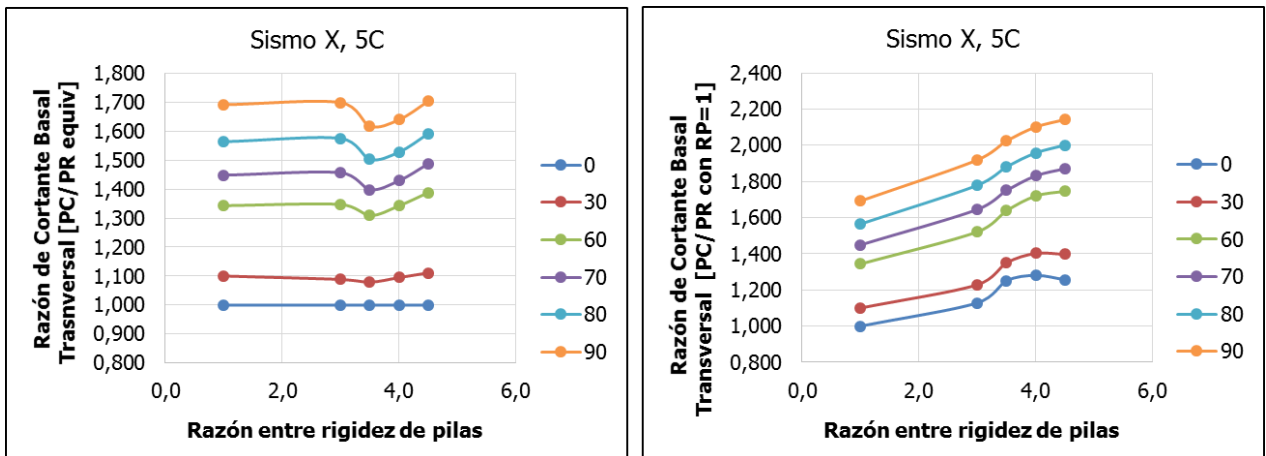


Figura K- 7. Razón de Cortante Basal Transversal en función de RP. Sismo X, 5C.

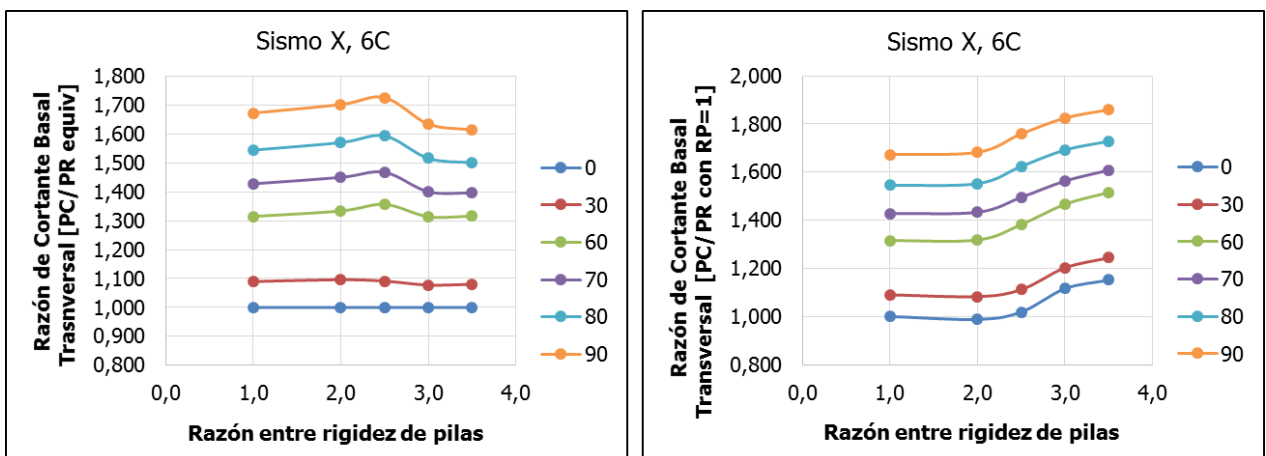


Figura K- 8. Razón de Cortante Basal Transversal en función de RP. Sismo X, 6C.

2. Sismo Y

a. Respuesta sísmica longitudinal

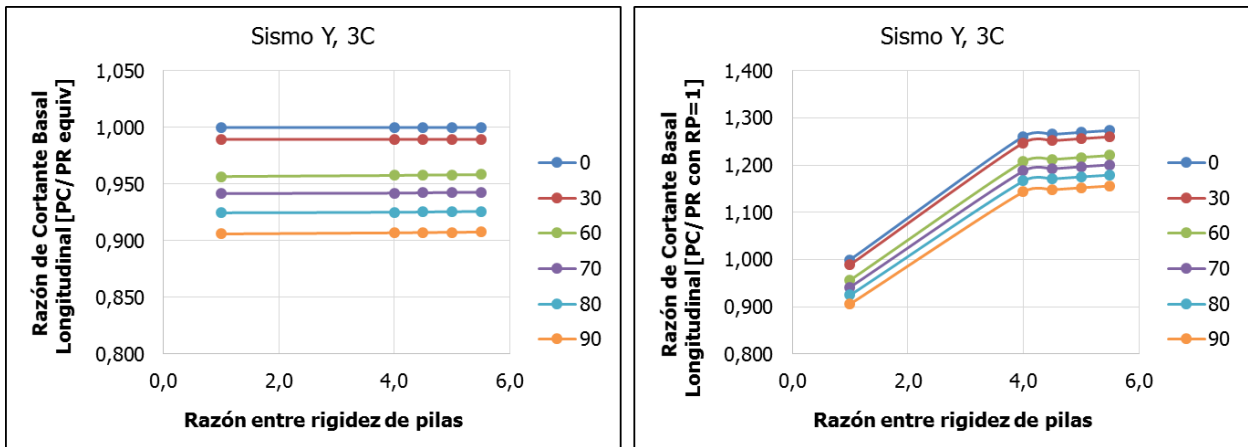


Figura K- 9. Razón de Cortante Basal Longitudinal en función de RP. Sismo Y, 3C.

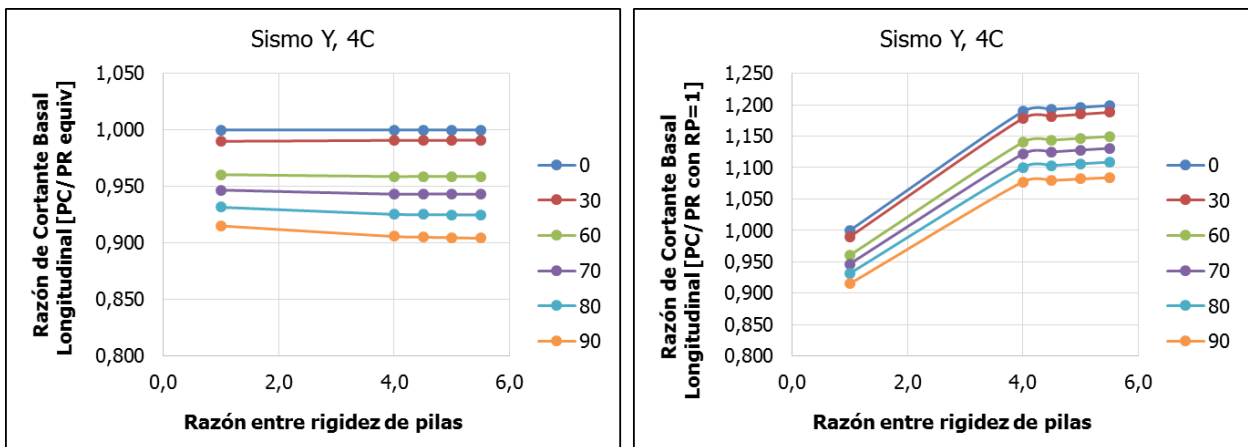


Figura K- 10. Razón de Cortante Basal Longitudinal en función de RP. Sismo Y, 4C.

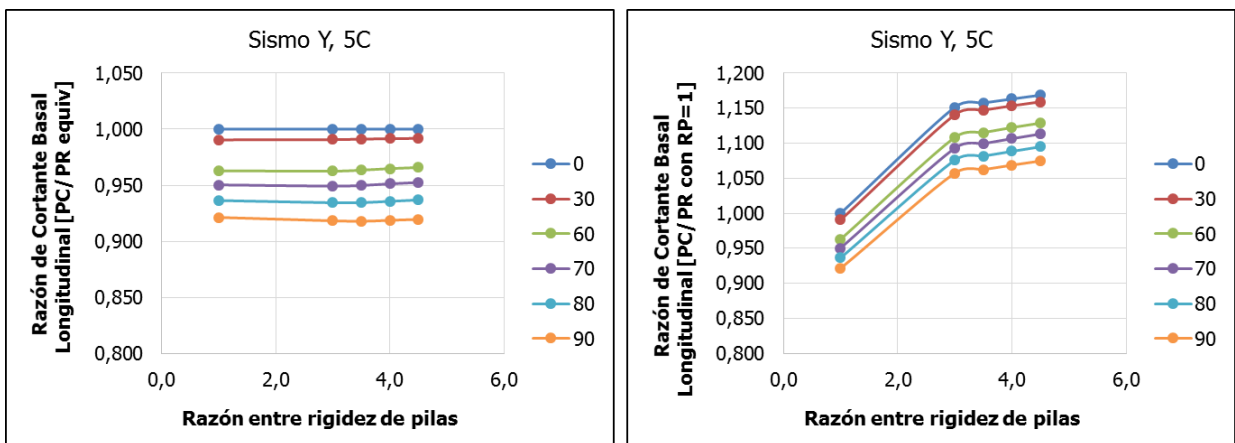


Figura K- 11. Razón de Cortante Basal Longitudinal en función de RP. Sismo Y, 5C.

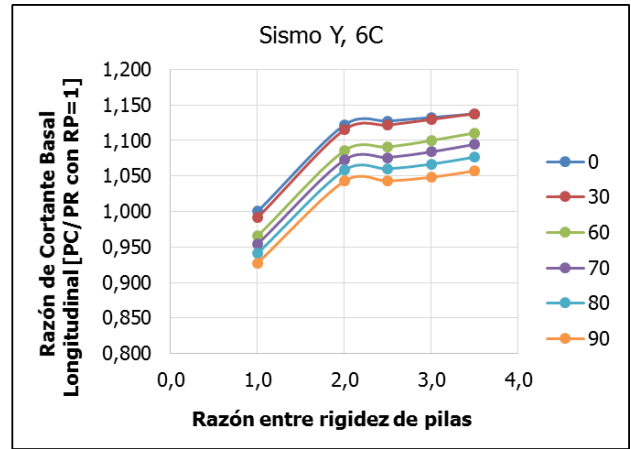
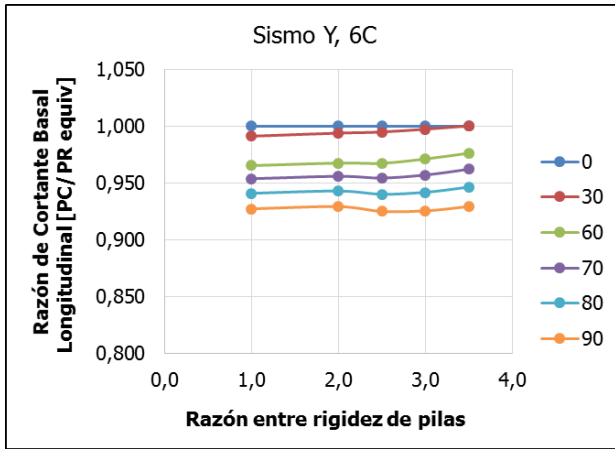


Figura K- 12. Razón de Cortante Basal Longitudinal en función de RP. Sismo Y, 6C.

b. Respuesta sísmica transversal

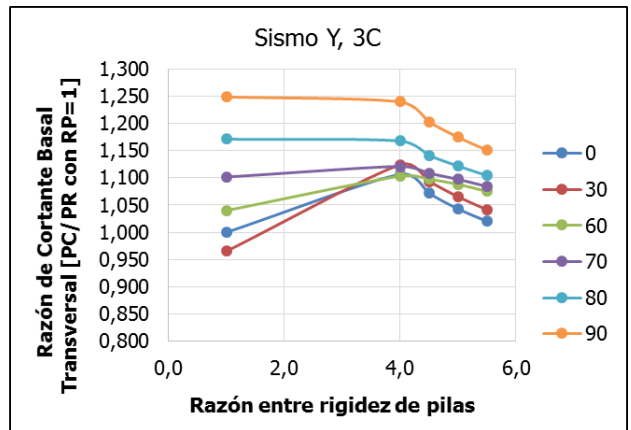
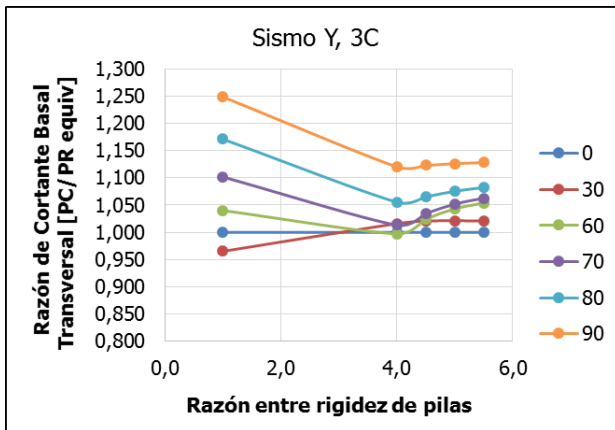


Figura K- 13. Razón de Cortante Basal Longitudinal en función de RP. Sismo Y, 3C.

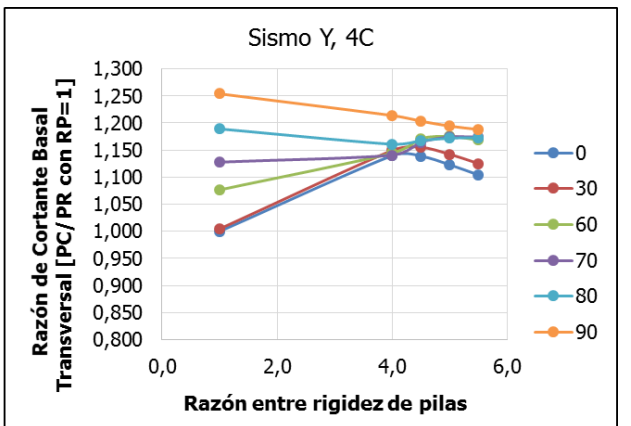
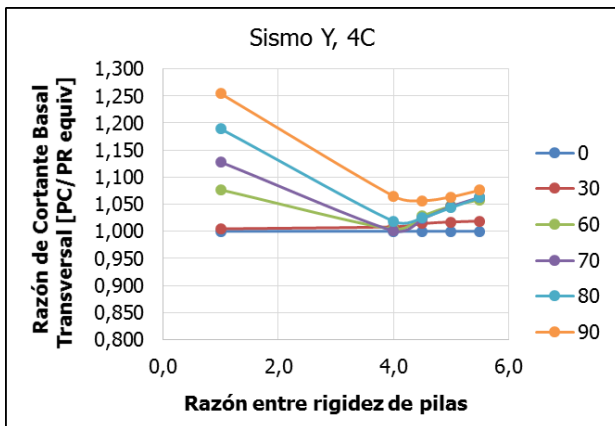


Figura K- 14. Razón de Cortante Basal Longitudinal en función de RP. Sismo Y, 4C.

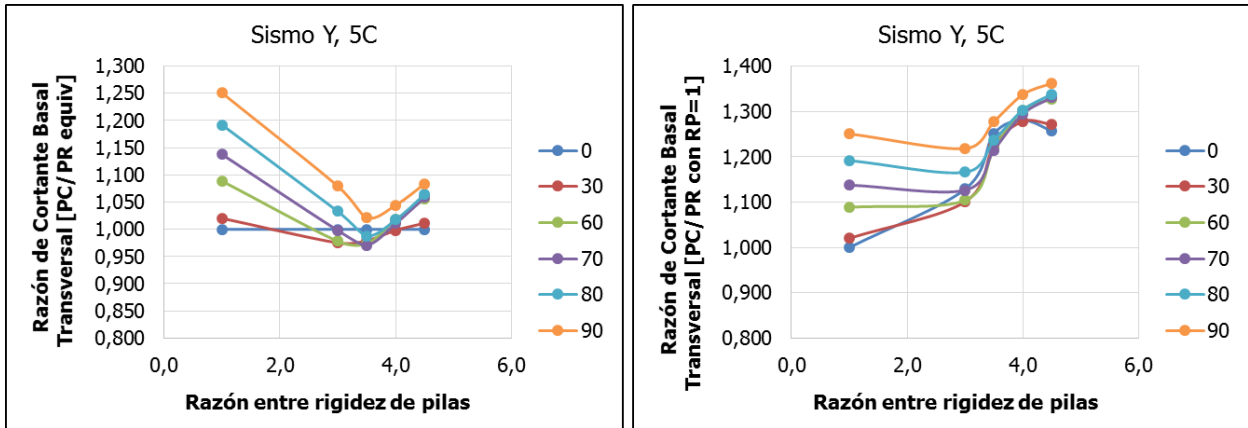


Figura K- 15. Razón de Cortante Basal Longitudinal en función de RP. Sismo Y, 5C.

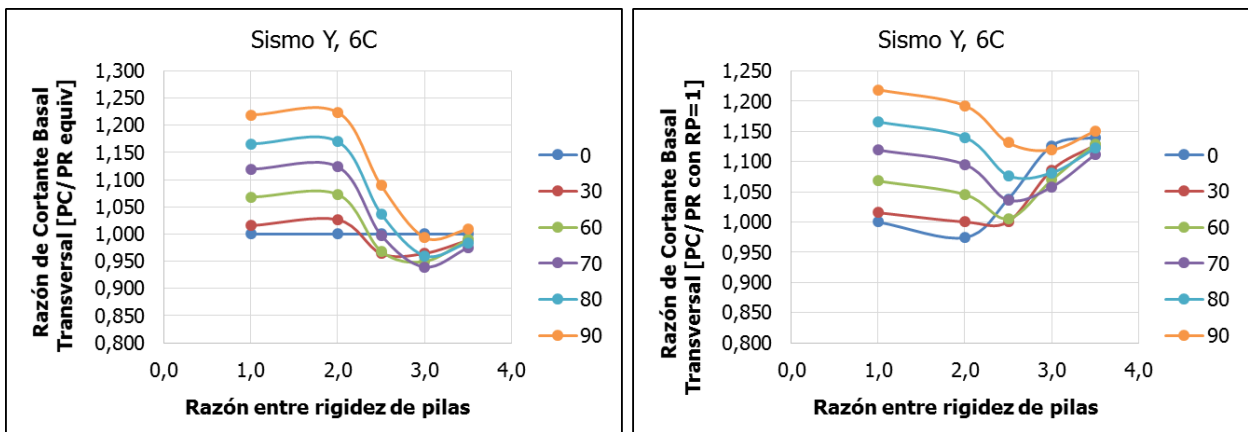


Figura K- 16. Razón de Cortante Basal Longitudinal en función de RP. Sismo Y, 6C.

APÉNDICE L: % CORTANTE BASAL, PUENTE CURVO-RECTO, RELACIÓN ENTRE LONGITUD DE CLAROS- ÁNGULO SUBTENDIDO

1. Sismo X

a. Respuesta sísmica longitudinal

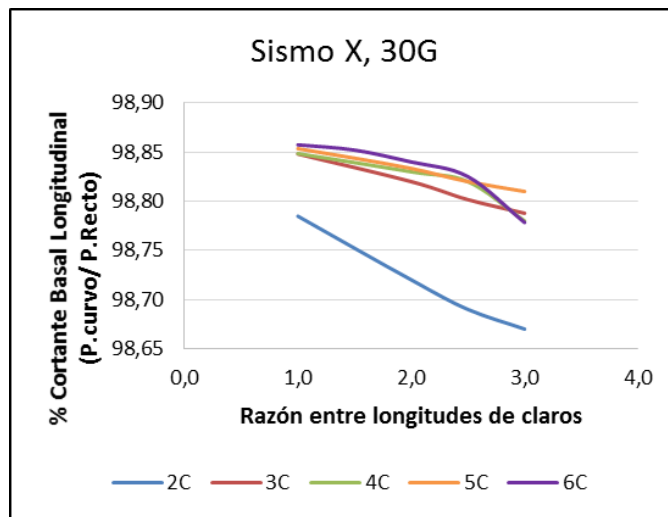


Figura L- 1. Porcentaje de variación del cortante basal longitudinal (PC/ PR). Sismo X, 30°, RC.

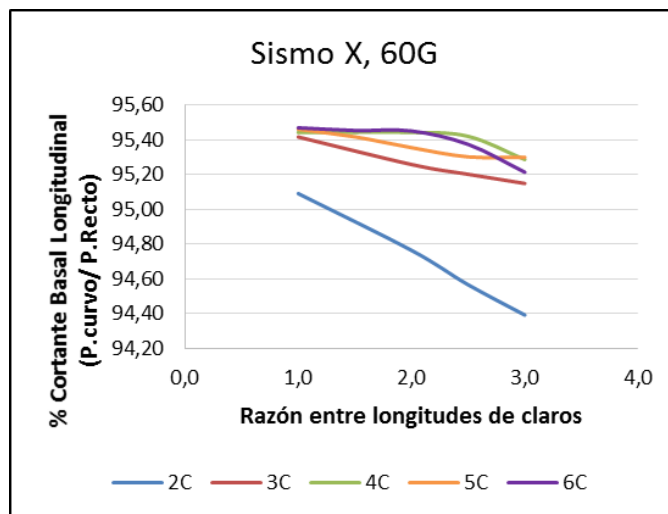


Figura L- 2. Porcentaje de variación del cortante basal longitudinal (PC/ PR). Sismo X, 60°, RC.

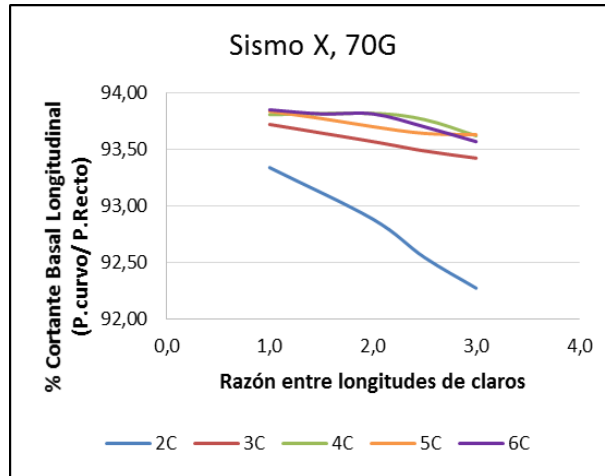


Figura L- 3. Porcentaje de variación del cortante basal longitudinal (PC/ PR). Sismo X, 70°, RC.

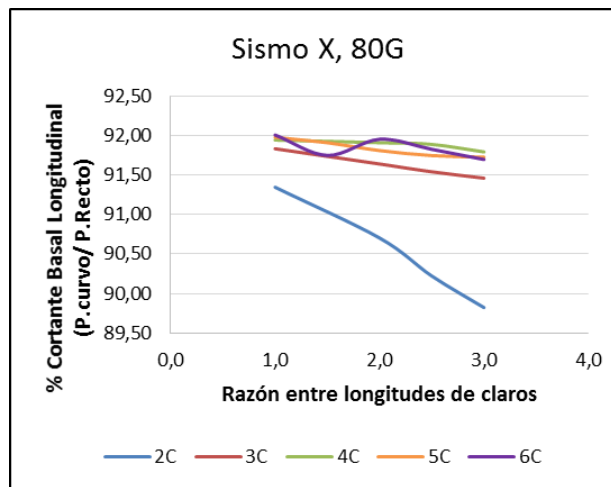


Figura L- 4. Porcentaje de variación del cortante basal longitudinal (PC/ PR). Sismo X, 80°, RC.

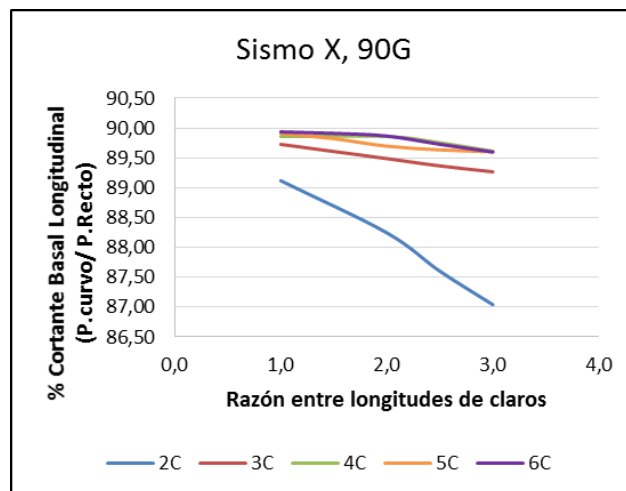


Figura L- 5. Porcentaje de variación del cortante basal longitudinal (PC/ PR). Sismo X, 90°, RC.

2. Sismo Y

a. Respuesta sísmica transversal

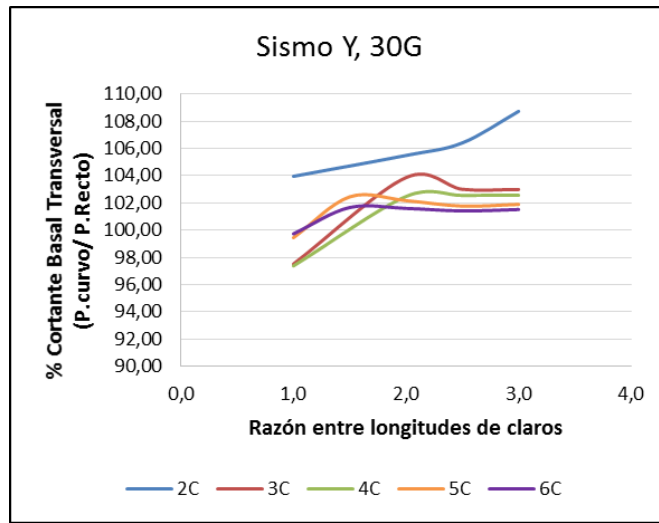


Figura L- 6. Porcentaje de variación del cortante basal transversal (PC/ PR). Sismo Y, 30°, RC.

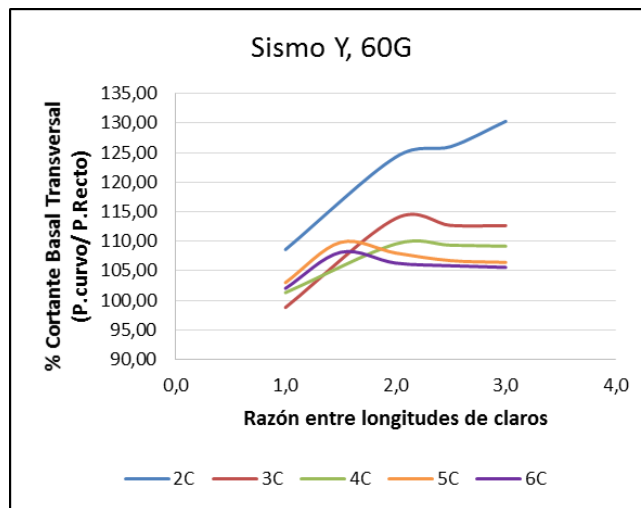


Figura L- 7. Porcentaje de variación del cortante basal transversal (PC/ PR). Sismo Y, 40°, RC.

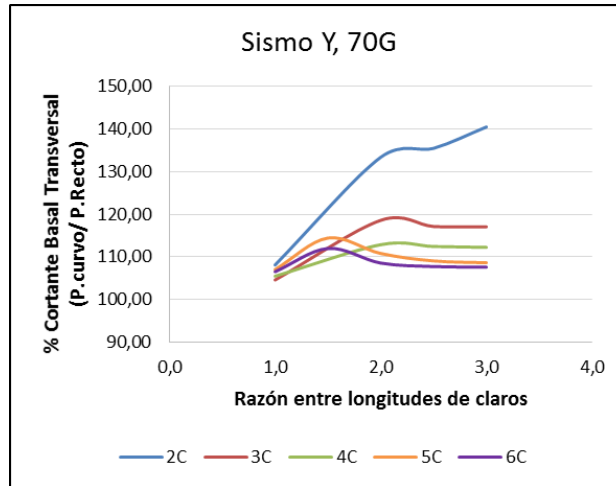


Figura L- 8. Porcentaje de variación del cortante basal transversal (PC/ PR). Sismo Y, 70°, RC.

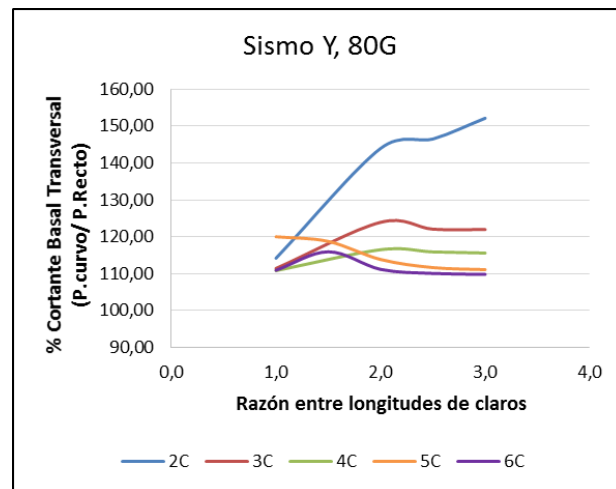


Figura L- 9. Porcentaje de variación del cortante basal transversal (PC/ PR). Sismo Y, 80°, RC.

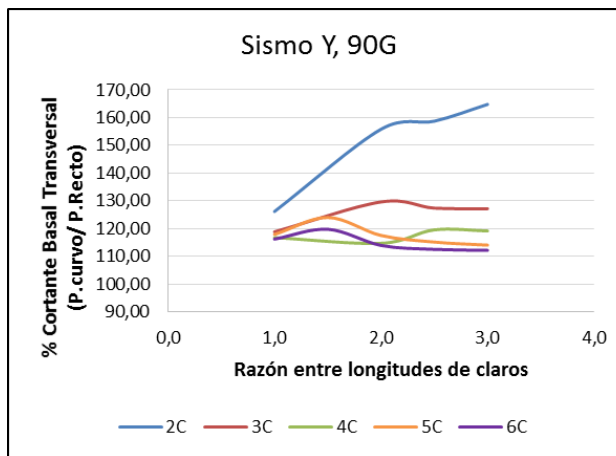


Figura L- 10. Porcentaje de variación del cortante basal transversal (PC/ PR). Sismo Y, 90°, RC.

**APÉNDICE M: % CORTANTE BASAL,
PUENTE CURVO-PUENTE RECTO
RELACIÓN ENTRE RIGIDEZ DE PILAS- ÁNGULO SUBTENDIDO**

1. Sismo X

a. Respuesta sísmica longitudinal

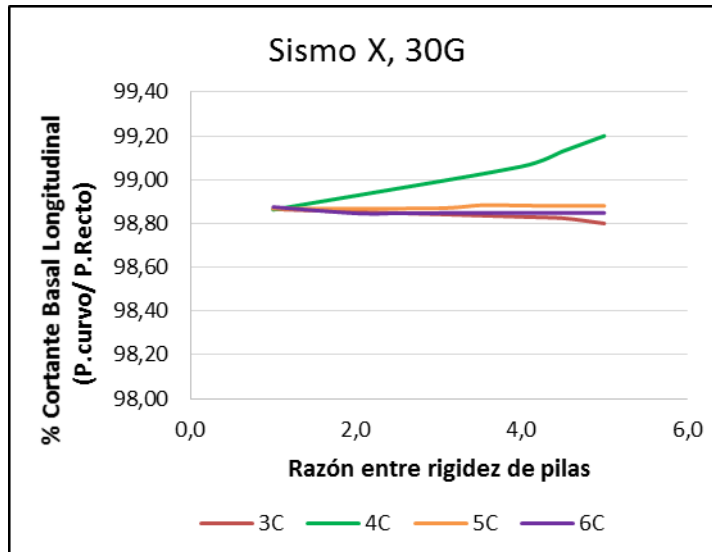


Figura M- 1. Porcentaje de variación del cortante basal longitudinal (PC/ PR). Sismo X, 30°, RP.

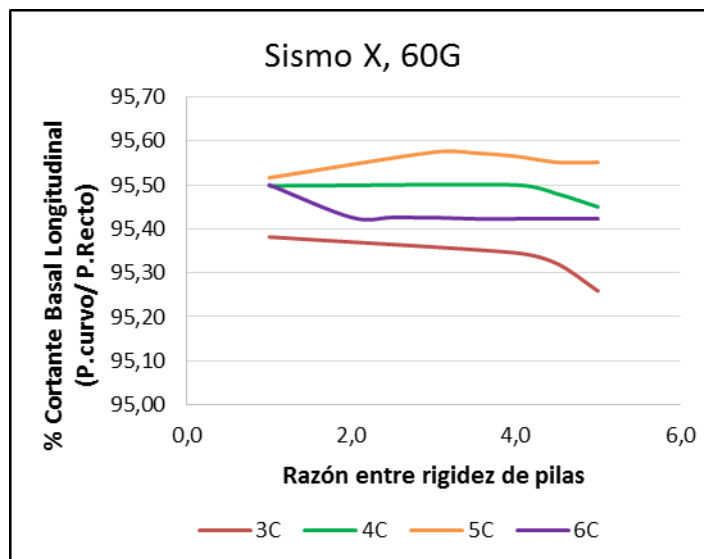


Figura M- 2. Porcentaje de variación del cortante basal longitudinal (PC/ PR). Sismo X, 60°, RP.

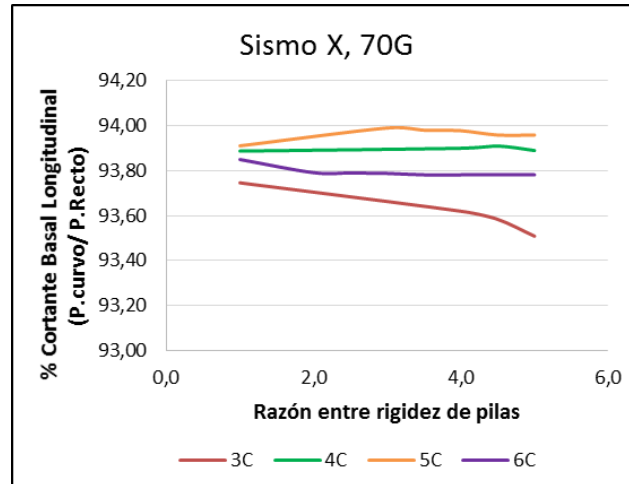


Figura M- 3. Porcentaje de variación del cortante basal longitudinal (PC/ PR). Sismo X, 70°, RP.

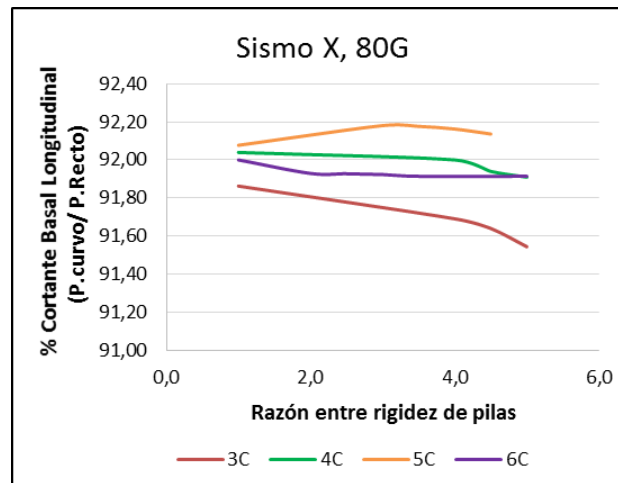


Figura M- 4. Porcentaje de variación del cortante basal longitudinal (PC/ PR). Sismo X, 80°, RP.

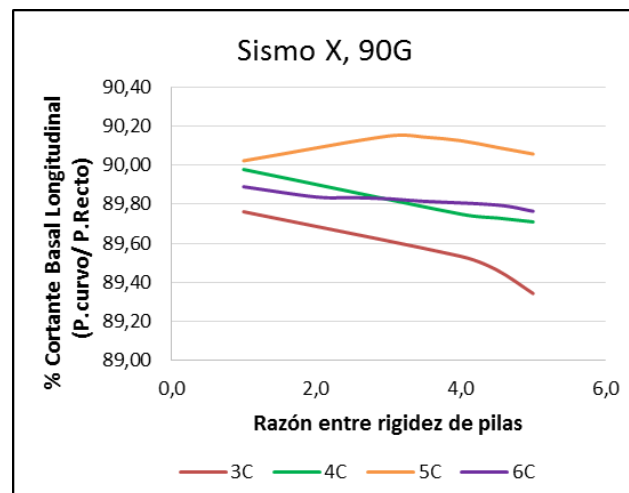


Figura M- 5. Porcentaje de variación del cortante basal longitudinal (PC/ PR). Sismo X, 90°, RP.

2. Sismo Y

a. Respuesta sísmica transversal

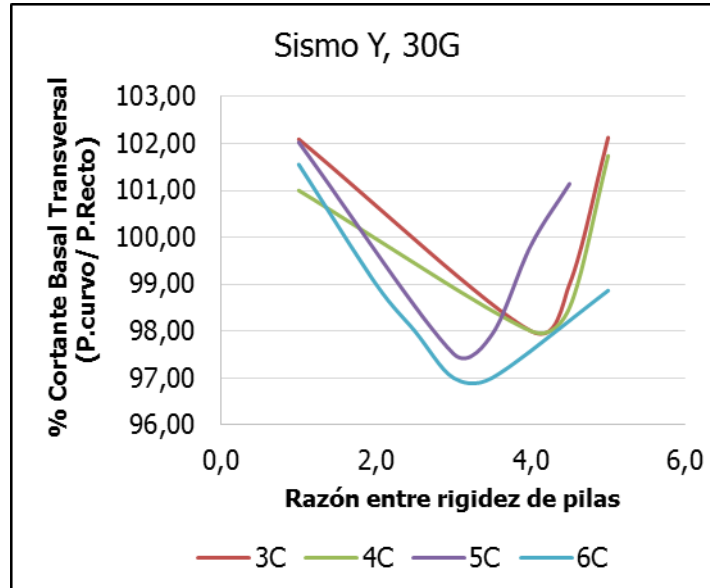


Figura M- 6. Porcentaje de variación del cortante basal longitudinal (PC/ PR). Sismo Y, 30°, RP.

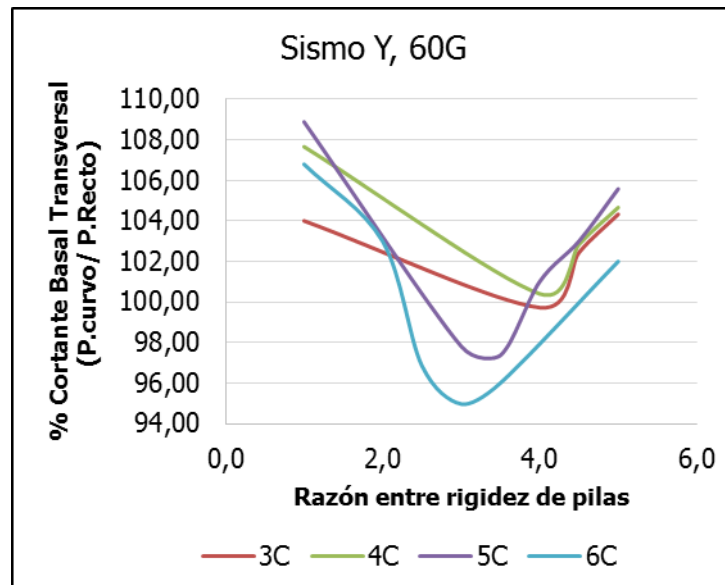


Figura M- 7. Porcentaje de variación del cortante basal longitudinal (PC/ PR). Sismo Y, 60°, RP.

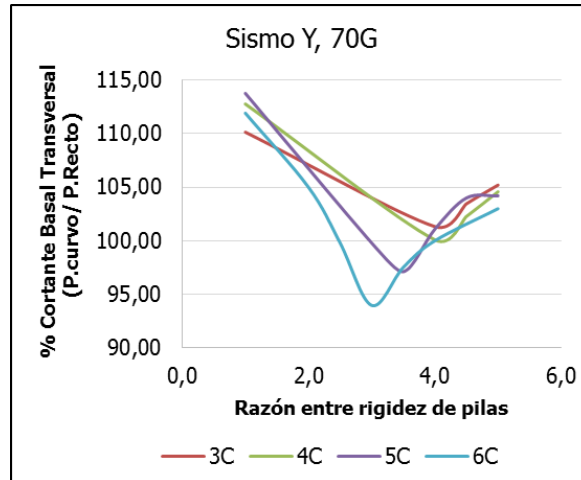


Figura M- 8. Porcentaje de variación del cortante basal longitudinal (PC/ PR). Sismo Y, 70°, RP.

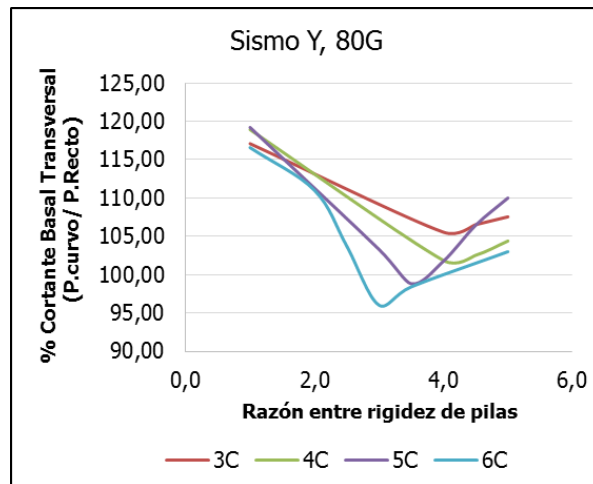


Figura M- 9. Porcentaje de variación del cortante basal longitudinal (PC/ PR). Sismo Y, 80°, RP.

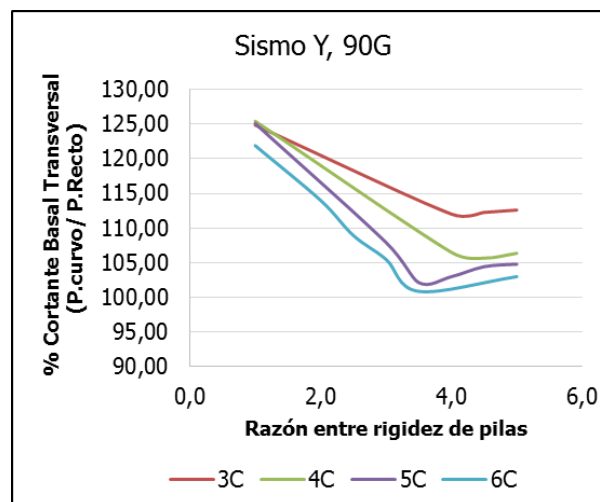


Figura M- 10. Porcentaje de variación del cortante basal longitudinal (PC/ PR). Sismo Y, 80°, RP

APÉNDICE N: CORTANTE BASAL, RELACIÓN ENTRE LONGITUD DE CLAROS

1. Sismo X

a. Respuesta sísmica longitudinal

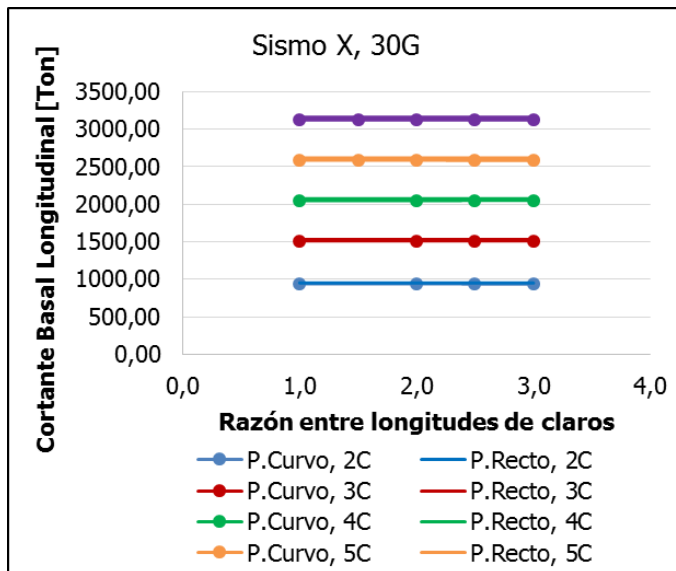


Figura N- 1. Cortante basal longitudinal en función de RC. Sismo X, 30°.

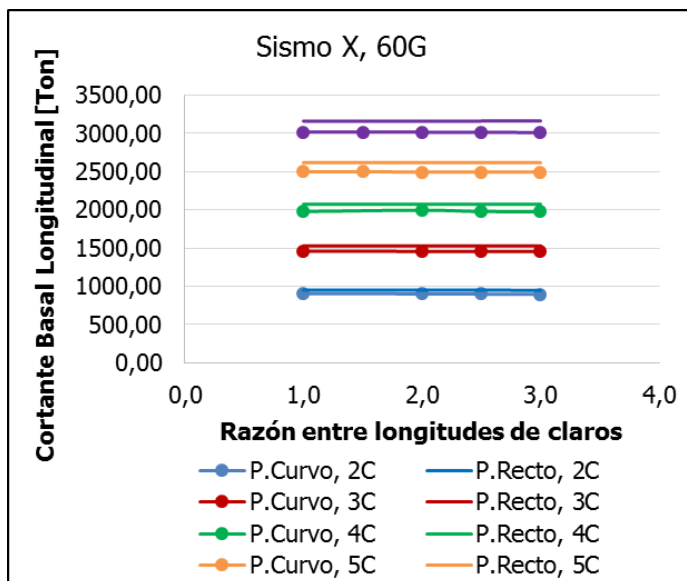


Figura N- 2. Cortante basal longitudinal en función de RC. Sismo X, 60°.

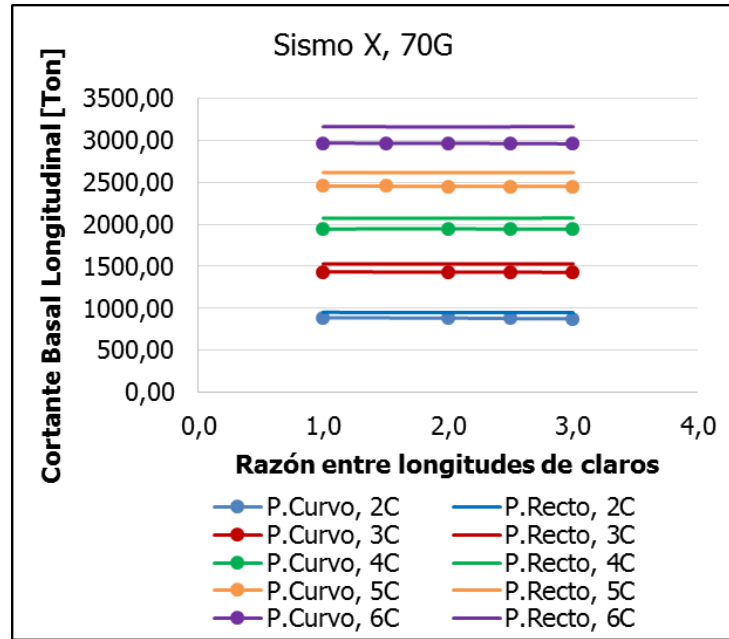


Figura N- 3. Cortante basal longitudinal en función de RC. Sismo X, 70°.

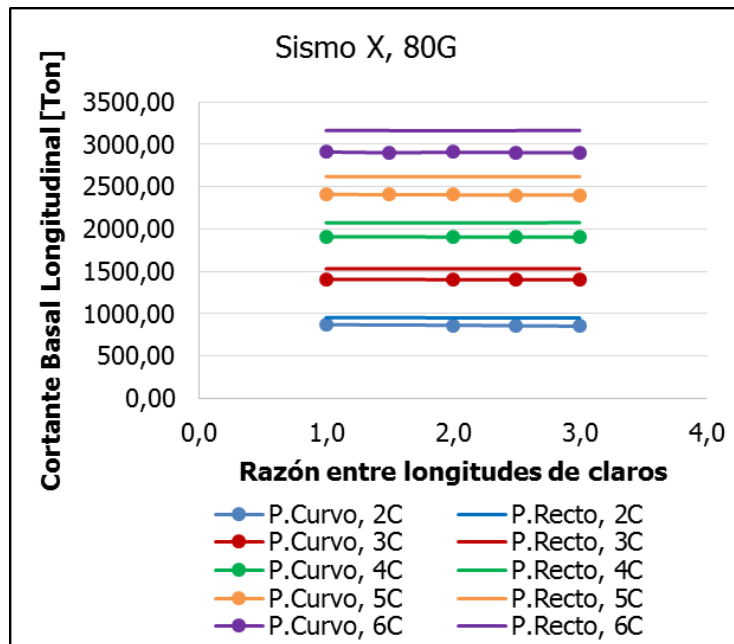


Figura N- 4. Cortante basal longitudinal en función de RC. Sismo X, 80°.

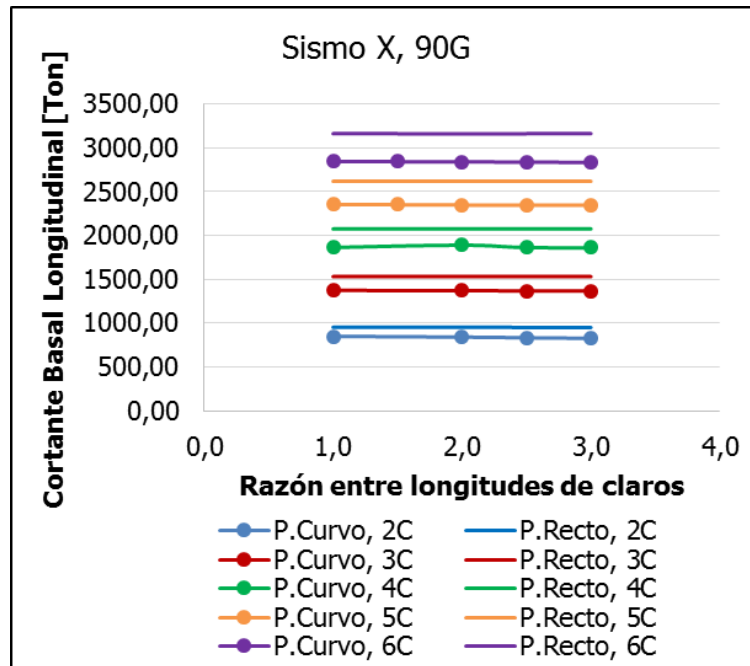


Figura N- 5. Cortante basal longitudinal en función de RC. Sismo X, 80°.

2. Sismo Y

a. Respuesta sísmica transversal

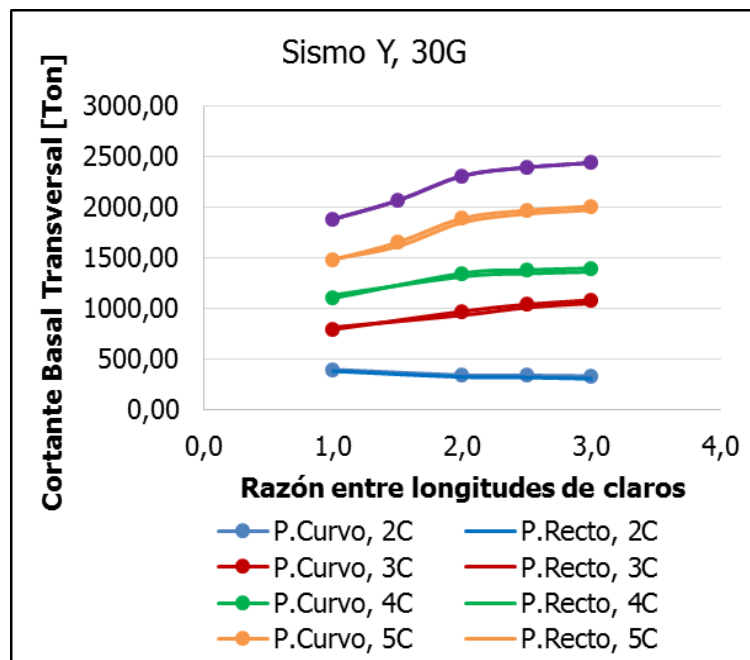


Figura N- 6. Cortante basal transversal en función de RC. Sismo Y, 30°.

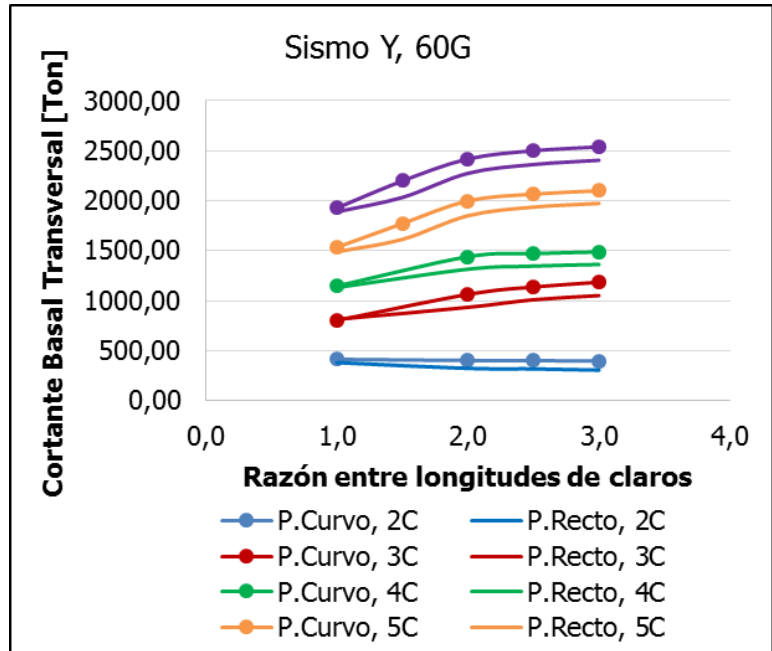


Figura N- 7. Cortante basal transversal en función de RC. Sismo Y, 60°.

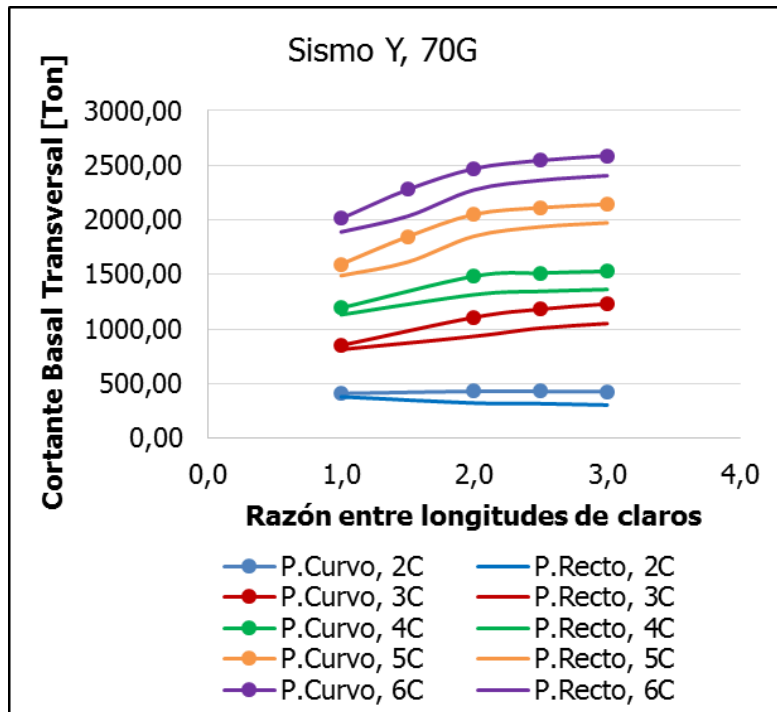


Figura N- 8. Cortante basal transversal en función de RC. Sismo Y, 70°.

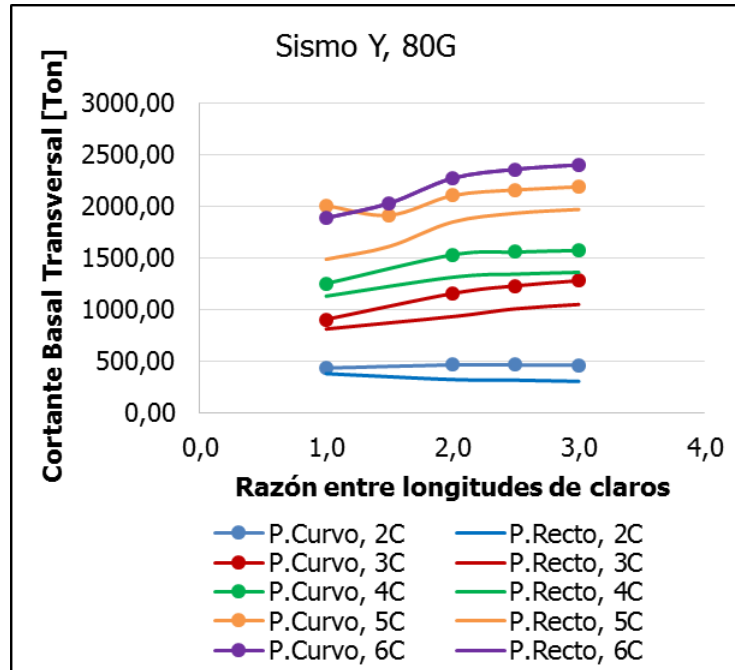


Figura N- 9. Cortante basal transversal en función de RC. Sismo Y, 80°.

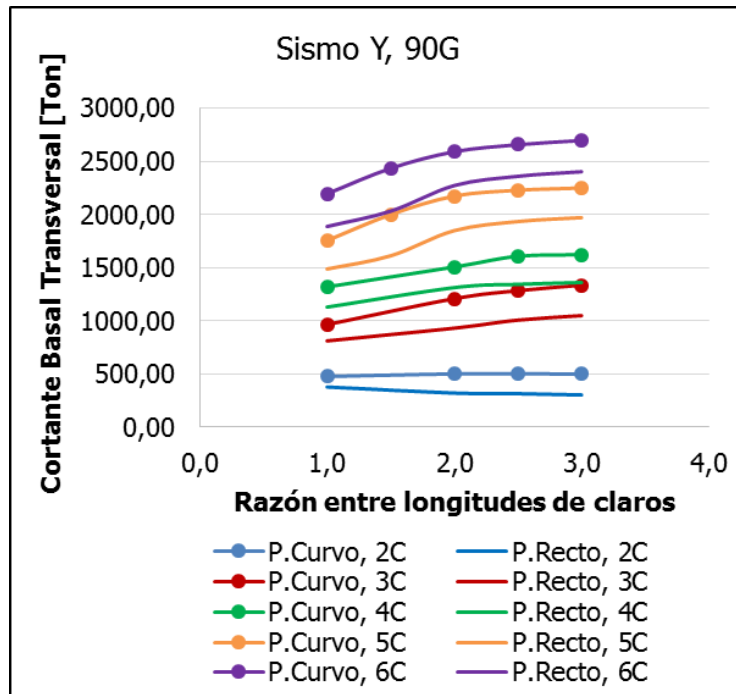


Figura N- 10. Cortante basal transversal en función de RC. Sismo Y, 90°.

APÉNDICE O: CORTANTE BASAL, RELACIÓN ENTRE RIGIDEZ DE PILAS

1. Sismo X

a. Respuesta sísmica longitudinal

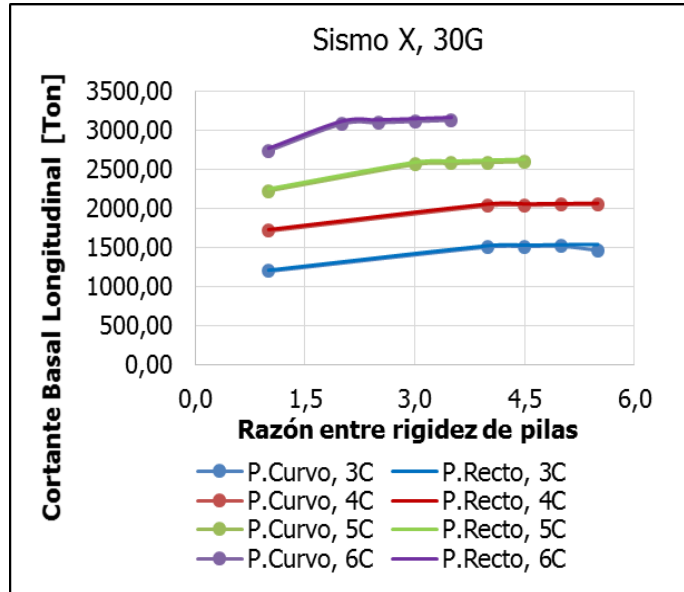


Figura O- 1. Cortante basal longitudinal en función de RP. Sismo X, 30°.

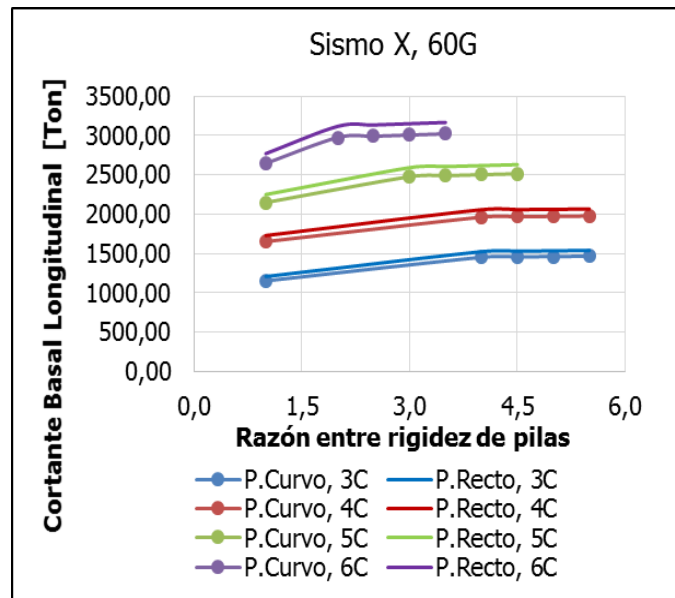


Figura O- 2. Cortante basal longitudinal en función de RP. Sismo X, 60°.

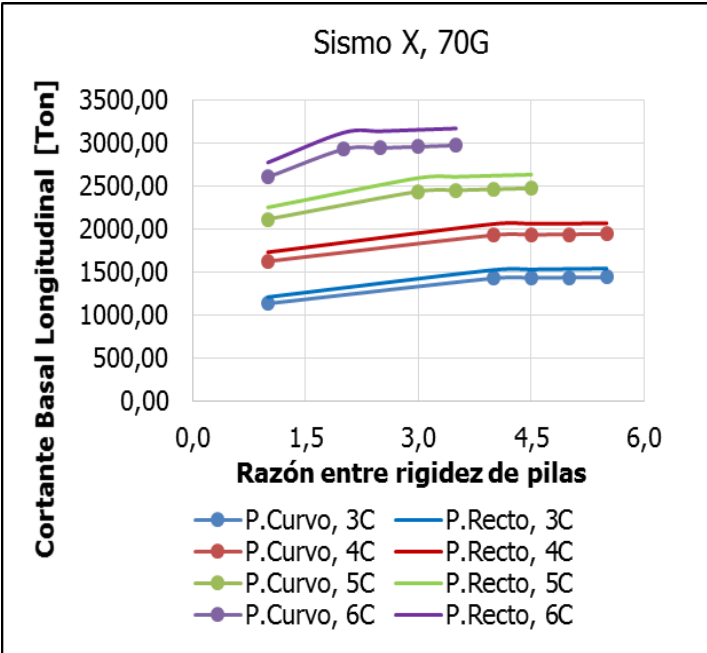


Figura O- 3. Cortante basal longitudinal en función de RP. Sismo X, 70°.

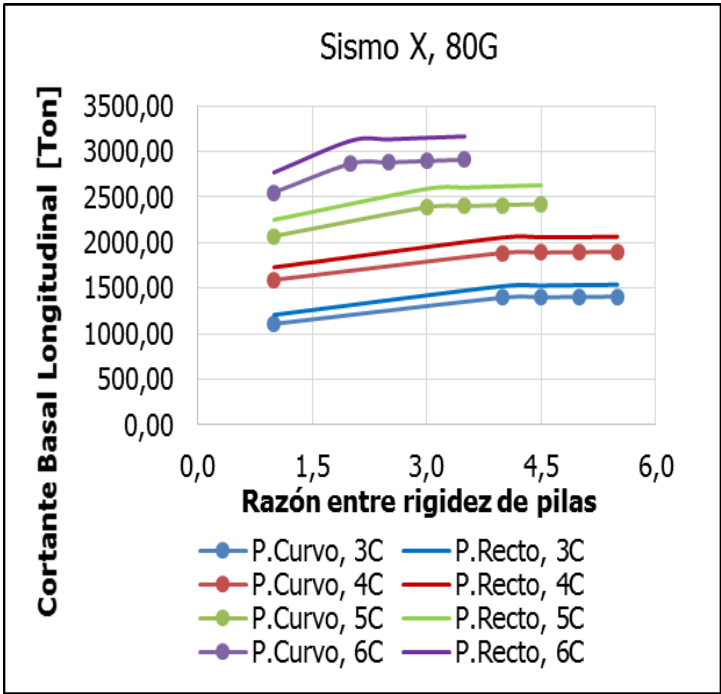


Figura O- 4. Cortante basal longitudinal en función de RP. Sismo X, 80°.

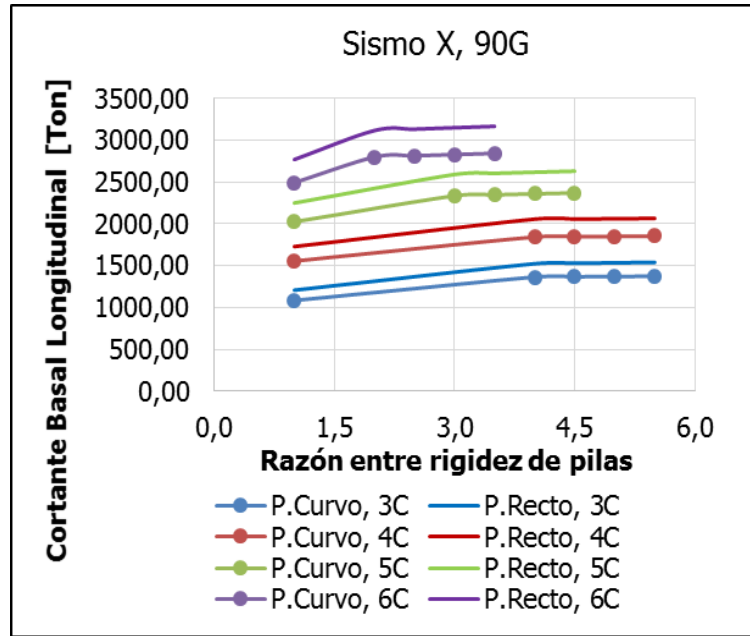


Figura O- 5. Cortante basal longitudinal en función de RP. Sismo X, 90º.

2. Sismo Y

a. Respuesta sísmica longitudinal

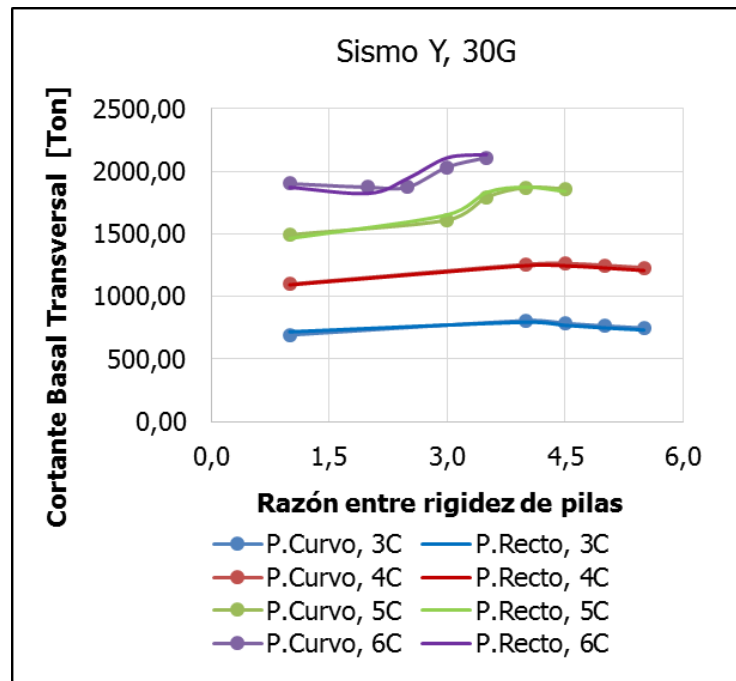


Figura O- 6. Cortante basal transversal en función de RP. Sismo Y, 30º.

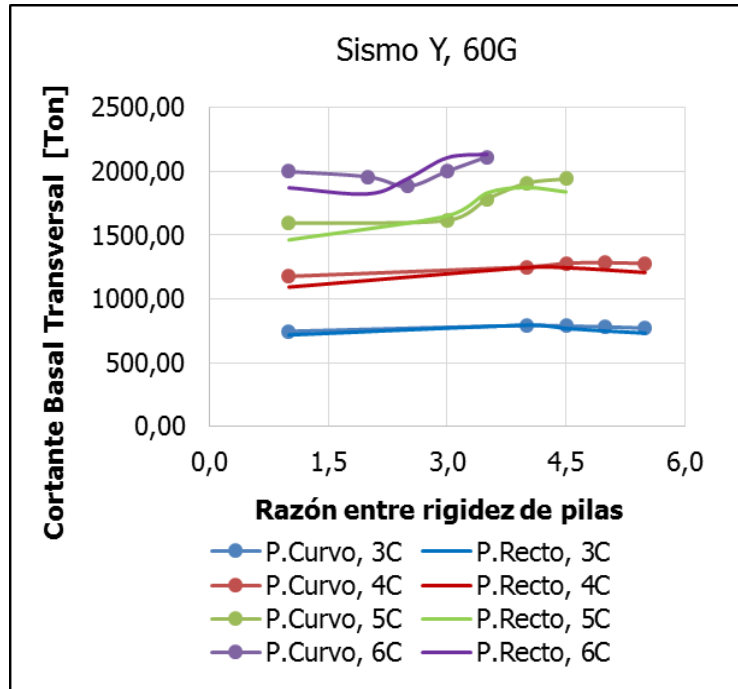


Figura O- 7. Cortante basal transversal en función de RP. Sismo Y, 60°.

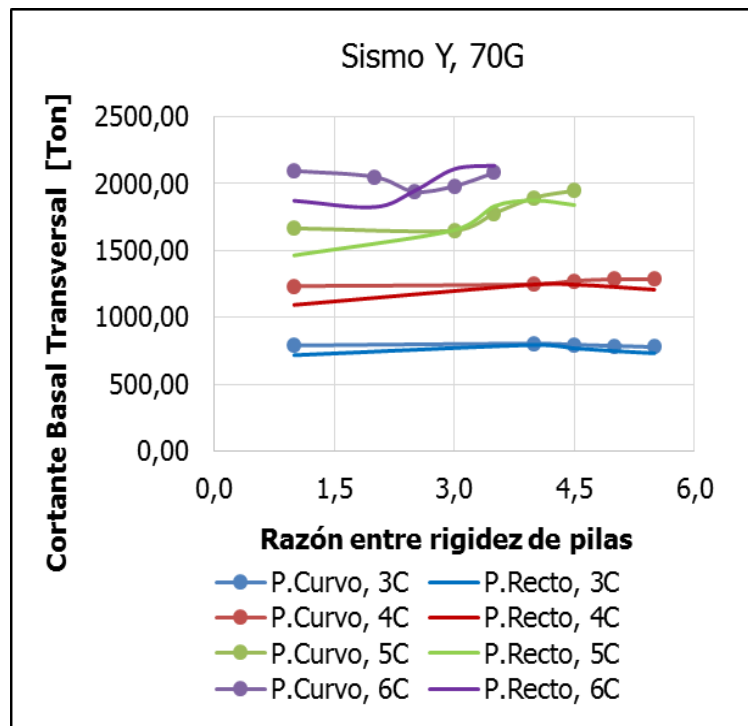


Figura O- 8. Cortante basal transversal en función de RP. Sismo Y, 70°.

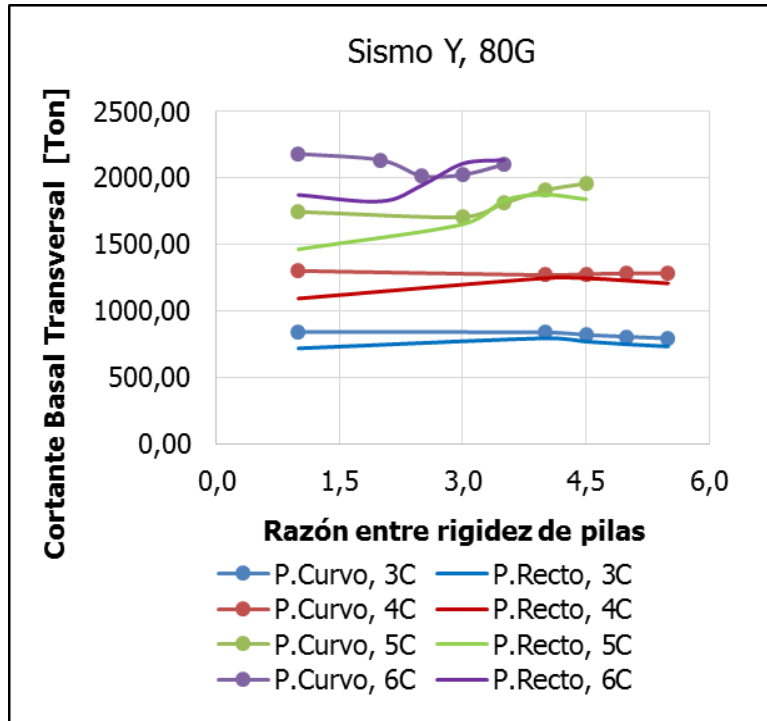


Figura O- 9. Cortante basal transversal en función de RP. Sismo Y, 80°.

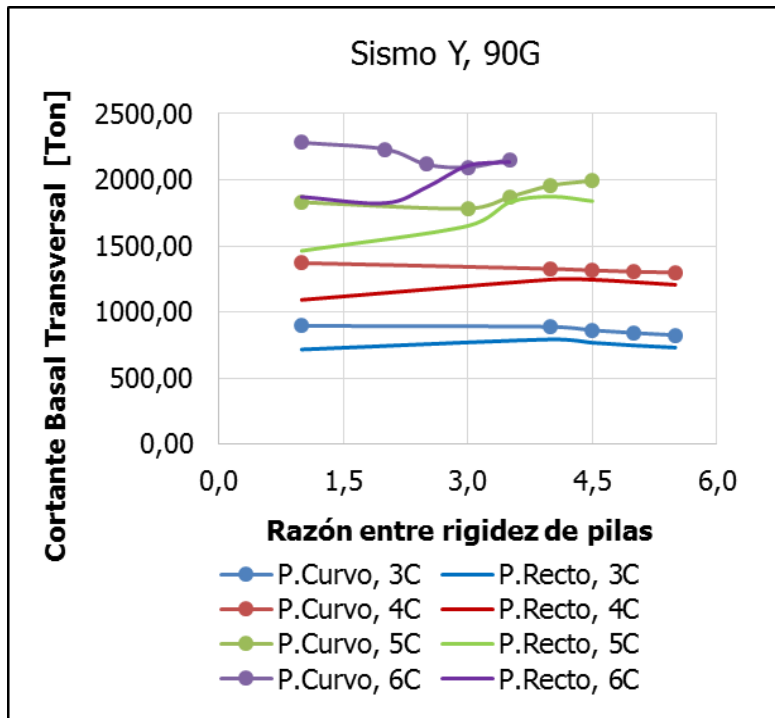


Figura O- 10. Cortante basal transversal en función de RP. Sismo Y, 90°.