



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL**

**TEMA: ESTUDIO DEL DESEMPEÑO DE LOS AISLADORES SÍSMICOS
DE LA PILA No. 12 DEL PUENTE “LOS CARAS”, DURANTE EL
TERREMOTO DEL 16 DE ABRIL DEL 2016**

**AUTORES: CAPT. E. GÓMEZ ARAUJO, MIGUEL EDUARDO
CAPT. E. AROCA PABÓN, JOSÉ LUIS**

DIRECTOR: TCRN. MORALES MONCAYO, ENRIQUE ABEL, PhD

SANGOLQUÍ

2018



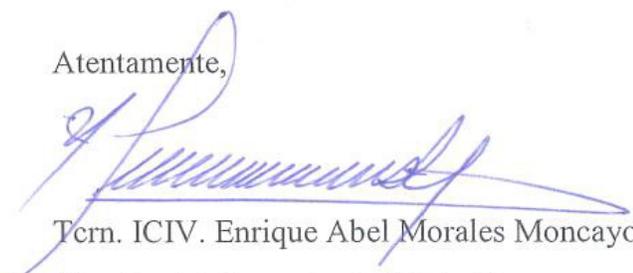
**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación: **“ESTUDIO DEL DESEMPEÑO DE LOS AISLADORES SÍSMICOS DE LA PILA No. 12 DEL PUENTE “LOS CARAS”, DURANTE EL TERREMOTO DEL 16 DE ABRIL DE 2016”**, realizado por los señores: **CAPT. AROCA PABÓN JOSÉ LUIS** y **CAPT. GÓMEZ ARAUJO MIGUEL EDUARDO**, como requerimiento parcial a la obtención del título de Ingeniero Civil, ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; el cual cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto, me permito acreditarlo y autorizar a los señores: **CAPT. AROCA PABÓN JOSÉ LUIS** y **CAPT. GÓMEZ ARAUJO MIGUEL EDUARDO**, para que sustenten su trabajo públicamente.

Sangolquí, 9 de Marzo de 2018

Atentamente,



Tcn. ICIV. Enrique Abel Morales Moncayo, PhD.

Director del Proyecto de Titulación



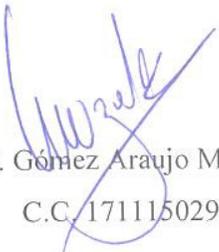
**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD I

Yo, **CAPT. MIGUEL EDUARDO GÓMEZ ARAUJO**, con cédula de ciudadanía No. 171115029-0, declaro que el trabajo de titulación: **“ESTUDIO DEL DESEMPEÑO DE LOS AISLADORES SÍSMICOS DE LA PILA No. 12 DEL PUENTE “LOS CARAS”, DURANTE EL TERREMOTO DEL 16 DE ABRIL DE 2016”**, ha sido desarrollado cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente, declaro que esta investigación es de mi autoría y su contenido es veraz.

Sangolquí, 9 de Marzo de 2018


Capt. de E. Gómez Araujo Miguel Eduardo
C.C. 171115029-0



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD II

Yo, **CAPT. JOSÈ LUIS AROCA PABÒN**, con cédula de ciudadanía No. 171372062-9, declaro que el trabajo de titulación: **“ESTUDIO DEL DESEMPEÑO DE LOS AISLADORES SÍSMICOS DE LA PILA No. 12 DEL PUENTE “LOS CARAS”, DURANTE EL TERREMOTO DEL 16 DE ABRIL DE 2016”**, ha sido desarrollado cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente, declaro que esta investigación es de mi autoría y su contenido es veraz.

Sangolquí, 9 de Marzo de 2018



Capt. de E. Aroca Pabón José Luis
C.C. 171372062-9



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

AUTORIZACIÓN

Yo, **CAPT. JOSÉ LUIS AROCA PABÓN** y **CAPT. MIGUEL EDUARDO GÓMEZ ARAUJO**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, publicar en el Repositorio Institucional, el presente trabajo de titulación: **“ESTUDIO DEL DESEMPEÑO DE LOS AISLADORES SÍSMICOS DE LA PILA No. 12 DEL PUENTE “LOS CARAS”, DURANTE EL TERREMOTO DEL 16 DE ABRIL DE 2016”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 9 de Marzo de 2018

Capt. Aroca Pabón José Luis
C.C 171372062-9

Capt. Gómez Araujo Miguel Eduardo
C.C. 171115029-0

DEDICATORIA

La constancia es la virtud que se define como la voluntad para conseguir lo propuesto, a pesar de las adversidades.

Este trabajo lo dedico principalmente a Dios, quien con su infinita bondad y amor me ha dado salud y vida para conseguir mis objetivos profesionales.

A mi esposa Silvia Eugenia por ser el sostén y el puntal en mi hogar, entregándome su amor y cariño en los momentos difíciles, así como su comprensión en las horas de ausencia.

A mis hijos José David y José Sebastián, por ser la fuente de motivación e inspiración en mis proyectos y por quienes he podido levantarme, luego de mis caídas.

A mis padres por haber sentado en mí las bases de la responsabilidad, esfuerzo y perseverancia; quienes me enseñaron a jamás inclinar la cabeza frente a principios inalienables y a luchar por lo que me proponga, a pesar de los obstáculos que se presenten.

A mi hermana, familia y amigos por estar pendientes de mí en todo momento, quienes con un saludo y un abrazo me han demostrado calidez y unión sincera.

Capt. de E. Aroca Pabón, José Luis

Este proyecto de tesis está dedicado a mi familia, en especial para mi madre, cuya pasión por mantenernos unidos es motivo de inspiración para seguir adelante y lograr las metas que me he propuesto en mi desarrollo como militar y profesional.

Una dedicación especial para mi hermana Flor María que desde el cielo sigue guiando los pasos de nuestra superación como profesionales y seres humanos.

A Dios quien ha forjado mi carrera militar y me ha dirigido por el sendero del conocimiento; él estará conmigo en todo momento ayudándome a ser una mejor persona.

Ustedes son quienes inspiran mi aprendizaje.

Capt. de E. Gómez Araujo, Miguel Eduardo.

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento va para Dios y mi familia.

Agradezco a los alumnos y docentes de esta institución, quienes me supieron brindar su apoyo incondicional, en esta etapa de estudios que complementa mi vida profesional.

Agradezco a mi Tcn. ICIV. Enrique Morales Ph.D, Director de este proyecto de investigación, y al Sr. Ing. Marcelo Romo quienes con su experiencia y conocimiento, han tenido confianza especial en el desarrollo de este tema de interés nacional, para ampliar nuevos criterios de construcción que, a futuro, nos permitan desarrollar sistemas de aislamiento sísmico en nuestro país.

Al Dr. Michael Constantinou y Dr. Shoma Kitayama, miembros del Department of Civil, Structural and Environmental Engineering of “University at Buffalo”, quienes contribuyeron con las herramientas tecnológicas para la validación y desarrollo del presente trabajo.

Agradezco al Ejército Ecuatoriano, a la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, a las autoridades y servidores públicos por permitir que esta noble institución, fundada por militares, siga formando a nuevas generaciones de estudiantes, para que sean un apoyo al desarrollo de la nación.

Capt. de E. Gómez Araujo, Miguel Eduardo

Con profunda humildad me complace exteriorizar mi sincero agradecimiento a las autoridades institucionales del Glorioso Ejército Ecuatoriano que autorizaron mi ingreso a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, pues luego de varios intentos para ingresar a la misma, fueron los que levantaron la disposición de negar el acceso a los alumnos militares, durante un determinado período y, de esta manera, permitieron que puedan prepararse en esta noble universidad y así contribuir en aspectos técnicos inherentes a la institución.

A la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE representada por sus autoridades, docentes y servidores públicos, quienes con su profesionalismo y ética contribuyen con la sociedad, formando jóvenes profesionales de excelencia.

A los docentes de la Carrera de Ingeniería Civil, quienes me inspiraron y apoyaron en la búsqueda permanente del conocimiento científico, herramienta fundamental que le permite al ser humano descubrir que solo con su luz, se puede superar el trabajo más difícil que existe, el trabajar sobre uno mismo y pulir su piedra bruta.

A mi Director de Proyecto, Tcrn. ICIV. Enrique Morales Ph.D, y al Sr. Ing. Marcelo Romo, quienes con su experiencia, paciencia, guía y determinación supieron cultivar en mí nuevas alternativas y horizontes. Gracias por su tiempo y consejos.

Al Dr. Michael Constantinou y Dr. Shoma Kitayama, profesor e investigador de la “University at Buffalo” respectivamente; quienes aportaron con su conocimiento para el desarrollo de este trabajo.

A mis compañeros de carrera, en especial a mi amigo Juan Daniel, con quién compartí buenos momentos y largas jornadas de estudio.

A todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron para la consecución de este gran sueño.

Gracias a todos.

Capt. de E. Aroca Pabón, José Luis

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN.....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD I.....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD II.....	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
NOMENCLATURA.....	xvi
RESUMEN.....	xix
ABSTRACT.....	xx
CAPÍTULO I.....	1
GENERALIDADES.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Generalidades del proyecto.....	1
1.3. Antecedentes.....	3
1.4. Estado del Arte.....	7
1.5. Justificación e Importancia.....	9
1.6. Objetivos.....	10
1.6.1. Objetivo General.....	10
1.6.2. Objetivos Específicos.....	11
1.7. Área de Influencia.....	11
1.8. Resumen.....	12
CAPÍTULO II.....	13
MARCO TEÓRICO.....	13
2.1. Introducción.....	13
2.2. Sistemas Pasivos de Control Sísmicos.....	13
2.3. Aislamiento de Base en Estructuras.....	14
2.4. Aisladores Sísmicos Deslizantes.....	16
2.5. Principios de Operación de Aisladores de Base Tipo Triple Péndulo Friccionantes.....	20
2.6. Relaciones Fuerza – Desplazamiento de un Aislador TPF.....	22
2.6.1. Régimen Deslizante I.....	23

2.6.2.	Régimen Deslizante II.....	25
2.6.3.	Régimen Deslizante III.....	30
2.6.4.	Régimen Deslizante IV.....	32
2.6.5.	Régimen Deslizante V.....	36
2.6.6.	Comentarios Adicionales.....	37
2.7.	Síntesis de los Regímenes de Deslizamiento del Aislador TPF.....	39
2.8.	Resumen.....	41
CAPÍTULO III.....		42
EVIDENCIA DEL COMPORTAMIENTO DE LOS AISLADORES DE LA PILA No. 12 Y ESTADO DEL PUENTE “LOS CARAS”.....		42
3.1.	Introducción.....	42
3.2.	Evidencias.....	42
3.3.	Desplazamientos medidos en los aisladores.....	46
3.4.	Diagnóstico del Problema de la Pila No.12.....	48
3.5.	Resumen.....	54
CAPÍTULO IV.....		55
PROCESO DE MANTENIMIENTO, PRESERVACIÓN Y METODOLOGÍA PARA EL REEMPLAZO DE AISLADORES EN LA PILA No. 12 DEL PUENTE “LOS CARAS”.....		55
4.1.	Introducción.....	55
4.2.	Antecedentes del comportamiento del puente “Los Caras”.....	55
4.3.	Descripción del método.....	58
4.3.1.	Alternativa A: Para el reemplazo de aisladores en la pila No. 12 del Puente “Los Caras”.....	60
4.3.2.	Alternativa B: Para el reemplazo de aisladores en la pila No. 12 del Puente “Los Caras”.....	64
4.3.3.	Recomendaciones para el procedimiento de reemplazo de aisladores y de la Superestructura.....	66
4.4.	Consideraciones del equipo a utilizar.....	68
4.5.	Evidencias de Funcionalidad Continua del Puente “Los Caras”.....	69
4.6.	Resumen.....	70
CAPÍTULO V.....		72
DESCRIPCIÓN DE LAS PROPIEDADES Y ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS A LOS AISLADORES TPF DEL PUENTE “LOS CARAS”.....		72
5.1.	Introducción.....	72

5.2.	Criterios de desempeño del sistema de aislamiento del puente “Los Caras”	73
5.3.	Desarrollo de los Sistemas Friccionales	73
5.3.1.	Aislador de Simple Péndulo de Fricción	73
5.3.2.	Aislador de Doble Péndulo de Fricción	74
5.3.3.	Aislador de Triple Péndulo de Fricción	75
5.4.	Descripción Genérica del Sistema de Aislamiento TPF	77
5.5.	Descripción del Sistema de Aislamiento TPF del Puente “Los Caras”	79
5.5.1.	Geometría:	79
5.5.2.	Materiales	80
5.5.3.	Pintura	80
5.5.4.	Tolerancias.....	81
5.6.	Resultados de Pruebas de Aisladores:.....	81
5.6.1.	Capacidades y Requerimientos de Diseño	81
5.7.	Resultados de Pruebas de Aisladores para reemplazo en la pila No. 12:	82
5.8.	Capacidades y Requerimientos de Diseño:	84
5.8.1.	Coefficientes de Fricción para Aisladores TPF 8836/14-12/10-7	85
5.9.	Resumen.....	88
CAPÍTULO VI.....		90
MODELO NUMÉRICO DE ANÁLISIS DE AISLADORES TRIPLE PÉNDULO FRICCIONANTES.....		90
6.1.	Introducción.....	90
6.2.	Análisis Numérico de Aisladores TPF por Regímenes de Comportamiento.....	90
6.3.	Comportamiento de Fases:	91
6.3.1.	Régimen de Análisis Fase I	92
6.3.2.	Régimen de Análisis Fase II.....	97
6.3.3.	Régimen de Análisis Fase III	98
6.3.4.	Régimen de Análisis Fase IV	99
6.3.5.	Régimen de Análisis Fase V	100
6.4.	Resumen de Regímenes de Desplazamiento en los Aisladores Sísmicos de la Pila No. 12.	102
6.5.	Especificaciones de Diseño del Sistema de Aisladores TPF8836/14-12/10-7 para el puente “Los Caras”, en base al software 3pleANI.	103
6.5.1.	Prueba controlada de desplazamiento mediante software 3pleANI.....	105

6.5.2.	Análisis de los cinco regímenes del aislador TPF8836/14-12/10-7 que se encuentra en el puente “Los Caras”.....	106
6.5.2.1.	Régimen I.....	106
6.5.2.2.	Régimen II.....	107
6.5.2.3.	Régimen III.....	108
6.5.2.4.	Régimen IV.....	109
6.5.2.5.	Régimen V.....	110
6.6.	Resumen.....	115
CAPÍTULO VII.....		116
ANÁLISIS DINÁMICO DEL AISLADOR TPF8836/14-12/10-7 DE LA PILA No. 12.....		116
7.1.	Introducción.....	116
7.2.	Análisis Dinámico del aislador TPF8836/14-12/10-7 mediante la interface 3pleANI.....	116
7.3.	Resumen.....	121
CAPÍTULO VIII.....		123
FACTORES DE MODIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS COEFICIENTES DE AISLADORES FRICCIONALES.....		123
8.1.	Introducción.....	123
8.2.	Factores (λ) de Modificación de la Propiedad de los Aisladores Friccionales.....	123
8.2.1.	Factores de modificación de propiedad.....	126
8.2.2.	Condiciones para fabricante desconocido y conocido.....	127
8.2.2.1.	Fabricante Desconocido.....	127
8.2.2.2.	Fabricante Conocido.....	128
8.2.3.	Comportamiento de Fuerza y Deflexión para componentes de sistemas de aislamiento (Upper-Bound y Lower -Bound).....	129
8.3.	Resumen:.....	130
CAPÍTULO IX.....		131
CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.....		131
9.1.	Conclusiones y Recomendaciones.....	131
9.2.	Trabajo Futuro.....	133
REFERENCIAS.....		135
ANEXOS		

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Comparación entre un Puente Convencional y Sísmicamente Aislado.....	4
Figura 2 Varios Esquemas de Aisladores de Péndulo Friccionante.....	5
Figura 3 Imágenes del Puente “Los Caras” y su diseño estructural con aisladores sísmicos.	6
Figura 4 Acción deslizante de un aislador TPF deformado	8
Figura 5 Espectros de Respuesta de Aceleración y Desplazamiento para Estructuras Fijas y Aisladas.	15
Figura 6 Dispositivos de Aislamiento Sísmico más comunes	15
Figura 7 Diagrama de Cuerpo Libre de un Aislador Péndulo Friccionante Cóncavo Sencillo ...	16
Figura 8 Diagramas Experimentales Fuerza – Desplazamiento para un Aislador DPF.	18
Figura 9 Esquema de la sección interna y externa de un aislador Triple Péndulo Friccionante...	20
Figura 10 Aislador Tipo TPF en Régimen de Deslizamiento I, (Diagrama de Cuerpo Libre).	24
Figura 11 Relación Fuerza – Desplazamiento del Aislador TPF durante el Régimen de Deslizamiento I.....	26
Figura 12 Aislador Tipo TPF en Régimen de Deslizamiento II, (Diagrama de Cuerpo Libre)....	29
Figura 13 Relación Fuerza - Desplazamiento del Aislador TPF durante el Régimen de deslizamiento II en relación con el Régimen de Deslizamiento I.	29
Figura 14 Relación Fuerza - Desplazamiento del Aislador TPF, durante el Régimen Deslizante III en relación con los Regímenes Deslizantes I-II.....	31
Figura 15 Aislador Tipo TPF en Régimen de Deslizamiento IV, (Diagrama de Cuerpo Libre). .	34
Figura 16 Relación Fuerza - Desplazamiento para una sola superficie cóncava cuando el control deslizante entra en contacto con el limitador de desplazamiento.....	35
Figura 17 Relación entre la Fuerza y el Desplazamiento del Aislador TPF durante el Régimen de Deslizamiento IV que se muestra en relación con los regímenes deslizantes I-III...35	35
Figura 18 Relación Fuerza - Desplazamiento del aislador TPF durante el Régimen de Deslizamiento V que se muestra en relación con los Regímenes Deslizantes I-IV.	38
Figura 19 Resumen del comportamiento del Aislador TPF.....	40
Figura 20 Distribución de las Pilas existentes en el Puente “Los Caras”	43
Figura 21 Fotografías que sintetizan el comportamiento de los Regímenes de Deslizamiento del Aislador TPF.....	44
Figura 22 Curva de histéresis de las propiedades para el modelamiento estructural.....	45
Figura 23 Curva de Histéresis de los aisladores fabricados por EPS para el sismo DBE y MCE 46	46
Figura 24 Fotografías que esbozan el estado de los aisladores luego del sismo del 16 de abril del 2016 e Imagen 3D que esquematiza el movimiento de la superestructura por el movimiento sísmico y la acción de los aisladores de la Pila No. 12	47
Figura 25 Esquema que permite visualizar el tipo de suelo en el sector de la Pila No. 12 del Puente “Los Caras”.....	49
Figura 26 Vista del estuario del Rio Chone y puente “Los Caras”.....	49
Figura 27 Desplazamiento en los aisladores sísmicos (cm).....	51

Figura 28 Fotografías del estado actual de dos aisladores de la pila No12 en que se puede visualizar daño en sus componentes internos.	52
Figura 29 Evidencia de la dirección del sismo del 16 de Abril de 2016, de acuerdo al daño presentado en el Aislador No. 1.....	53
Figura 30 Modelo en 3D del movimiento y retorno a la posición original del puente los Caras durante el sismo de abril, 2016.....	54
Figura 31 Fotografía de la Pila No. 12 y Esquema 3D que referencia a los aisladores TPF, que serán reemplazados.....	56
Figura 32 Fotografías que demuestran el estado de los cuatro aisladores sísmicos tipo TPF, de la pila No. 12 del Puente “Los Caras”	57
Figura 33 Descripción del levantamiento de la superestructura con los gatos hidráulicos.....	59
Figura 34 Partes del aislador que se removerá para el reemplazo	60
Figura 35 Esquema de la ubicación de los gatos hidráulicos para el reemplazo.	61
Figura 36 Rollers que serán colocados para el movimiento de los aisladores.....	62
Figura 37 Esquema donde se muestra la ubicación de los gatos hidráulicos y apoyos temporales.....	63
Figura 38 Diagrama de procesos para la inspección y actuación del reemplazo de los aisladores	68
Figura 39 Técnicos del CEE, después del Terremoto del 2016.	73
Figura 40 Aislador de Simple Péndulo de Fricción y Esquema de Funcionamiento Interno	74
Figura 41 Aislador de Doble Péndulo de Fricción y Esquema de Funcionamiento Interno.....	75
Figura 42 Aislador Triple Péndulo Friccionante y componentes.....	76
Figura 43 Diferencias entre Aisladores Péndulo Friccionante Dobles y Triples.	77
Figura 44 Regímenes de Comportamiento del Aislador TPF y Ciclo de Histéresis Tipo.	79
Figura 45 Corte de Sección de Aislador Sísmico empleado en el Puente “Los Caras”.....	80
Figura 46 Máquina de Ensayo de Aisladores Sísmicos tipo TPF	83
Figura 47 Diagrama obtenido para la Prueba de Carga de Ensayo No. 1	86
Figura 48 Diagrama obtenido para la Prueba de Carga de Ensayo No. 2.....	86
Figura 49 Diagrama obtenido para la Prueba de Carga de Ensayo No. 3.....	87
Figura 50 Diagrama obtenido para la Prueba de Carga de Ensayo No. 4.....	87
Figura 51 Diagrama de Histéresis (Fuerza – Desplazamiento) de ensayo.....	88
Figura 52 Corte de Sección de Aislador Sísmico empleado en el Puente “Los Caras”.....	90
Figura 53 Diagrama de Histéresis del Régimen I para el aislador TPF8836/14-12/10-7	96
Figura 54 Diagrama de Histéresis del Régimen II para el aislador TPF 8836/14-12/10-7	98
Figura 55 Diagrama de Histéresis del Régimen III para el aislador TPF 8836/14-12/10-7	99
Figura 56 Diagrama de histéresis del Régimen IV para el aislador TPF 8836/14-12/10-7	100
Figura 57 Diagrama de histéresis del Régimen V para el aislador TPF 8836/14-12/10-7	101
Figura 58 Diagrama de Histéresis con cinco fases del Aislador Sísmico Empleado en el Puente “Los Caras”.....	102

Figura 59 Parámetros a ingresar en 3pleANI de acuerdo a la nomenclatura en inglés para un aislador TPF.....	104
Figura 60 Imágenes del Puente “Los Caras” y su diseño estructural con aisladores sísmicos. ...	105
Figura 61 Ejemplo de la Curva de Histéresis del Aislador TPF8836/14-12/10-7 con una amplitud de 23 plg.	105
Figura 62 Interface 3pleANI (Visualización de Aislador). Parámetros de Diseño y Curva Régimen I.....	106
Figura 63 Curva de Histéresis Régimen I.....	107
Figura 64 Interface 3pleANI (Visualización de Aislador). Parámetros de Diseño y Curva Régimen II.	107
Figura 65 Curva de Histéresis Régimen II.....	108
Figura 66 Interface 3pleANI (Visualización de Aislador). Parámetros de Diseño y Curva Régimen III.....	108
Figura 67 Curva de Histéresis Régimen III.....	109
Figura 68 Interface 3pleANI (Visualización de Aislador). Parámetros de Diseño y Curva Régimen IV.....	109
Figura 69 Curva de Histéresis Régimen IV.....	110
Figura 70 Interface 3pleANI (Visualización de Aislador). Parámetros de Diseño y Curva Régimen V.....	110
Figura 71 Curva de Histéresis Régimen V.....	111
Figura 72 Modelamiento del régimen V, en donde se aprecia el contacto del núcleo interior con los limitadores de movimiento, debido al máximo desplazamiento del aislador TPF8836/14-12/10-7.....	111
Figura 73 Curva de histéresis para los cinco regímenes de desplazamiento de acuerdo al software 3pleANI.....	112
Figura 74 Curva de histéresis para los cinco regímenes de desplazamiento de acuerdo con el modelamiento numérico.....	112
Figura 75 Análisis Dinámico del Aislador TPF8836/14-12/10-7 de la Pila No. 12 del puente “Los Caras”.....	117
Figura 76 Esquema del Puente “Los Caras” y su diseño estructural con aisladores sísmicos....	117
Figura 77 Modelo de SAP-2000, para la obtención de datos necesarios en el análisis de la rigidez de la pila No.12 del puente “Los Caras.....	118
Figura 78 Acelerograma del Sismo del 16 de Abril de 2016, registrado en Manta (N-S).....	119
Figura 79 Análisis Dinámico del Aislador TPF8836/14-12/10-7 de la Pila No. 12, con el Registro de la Ciudad de Manta escalado.....	119
Figura 80 Espectro de diseño del sismo de Manta escalado a 1.84.....	121
Figura 81 Espectro de diseño del sismo de Manta sin escalar.....	121
Figura 82 Diagrama Fuerza – Desplazamiento, Límite Superior y Límite Inferior.....	130

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Máximo desplazamiento en los aisladores</i>	47
Tabla 2 <i>Desplazamientos máximos de los aisladores</i>	51
Tabla 3 <i>Equipo necesario para el reemplazo de aisladores sísmicos en la pila No. 12</i>	69
Tabla 4 <i>Datos Técnicos de Pruebas de Ensayo realizadas a Aisladores Sísmicos</i>	82
Tabla 5 <i>Prueba de Control de Calidad</i>	82
Tabla 6 <i>Valores de Fricción Promedio aplicados al Ensayo</i>	83
Tabla 7 <i>Coefficientes de Fricción Promedio aplicados al Ensayo</i>	85
Tabla 8 <i>Parámetros Geométricos del Aislador TPF 8836/14-12/10-7</i>	91
Tabla 9 <i>Resumen de Parámetros Obtenidos</i>	92
Tabla 10 <i>Datos de Coeficientes de Fricción empleados para el análisis</i>	93
Tabla 11 <i>Prueba de Control de Calidad</i>	102
Tabla 12 <i>Propiedades del aislador TPF8836/14-12/10-7 ubicado en el puente “Los Caras”</i> .	104
Tabla 13 <i>Resumen de las curvas de histéresis del modelo matemático y modelo en 3pleANI</i> ...	113
Tabla 14 <i>Parámetros Obtenidos Mediante el Análisis Numérico</i>	114
Tabla 15 <i>Parámetros Obtenidos Mediante la Interface 3pleANI</i>	114
Tabla 16 <i>Pesos de la pila No.12 de acuerdo a los diferentes niveles de profundidad en el puente “Los Caras”</i>	118
Tabla 17 <i>Cuadro Comparativo de Resultados obtenidos del Análisis Dinámico del Aislador TPF8836/14-12/10-7 entre la pila No. 7 y la pila No. 12</i>	120
Tabla 18 <i>Factores de Multiplicación para Límite Superior y Límite Inferior Fabricantes Desconocidos</i>	124
Tabla 19 <i>Factores de Multiplicación para Límite Superior y Límite Inferior Fabricantes Conocidos</i>	125
Tabla 20 <i>Factores de Multiplicación para Límite Superior y Límite Inferior, Fabricantes Conocidos</i>	129

NOMENCLATURA

Simbología	Representación
ASCE	American Society of Civil Engineers
ATC	Asociación Técnica de Carreteras
AASHTO	Association of State Highway and Transportation Officials
BSSC	Building Seismic Safety Council
β_{eff}	Coficiente de amortiguamiento efectivo
CEE	Cuerpo de Ingenieros del Ejercito
D	Desplazamiento máximo
DBE	Sismo Básico de Diseño
Dtmc	Capacidad de Desplazamiento Máximo (Considerada en Ensayo)
DmMAX	Desplazamiento máximo del aislador
DPF	Doble Péndulo Friccionante
d_i	Capacidad de desplazamiento de la interfaz deslizante i
EDC	Energía disipada por ciclo (área de ciclo de histéresis)
EPN	Escuela Politécnica Nacional
EPS	Earthquake Protection Systems
FEMA	Federal Emergency Management Agency
FP	Péndulo Friccionante
FPS	Friction Pendulum System (Sistema de Péndulo Friccionante)
F_{maxh}	Fuerza Máxima Horizontal

F_{dri}	Fuerza lateral en el instante i
F_{fi}	Fuerza de Fricción en la superficie i
f_i	Coefficiente de fricción de la superficie i
h_i	Altura de la interfaz deslizante i
Kd	Rigidez post elástica (Kd es la función de W y el radio de curvatura efectivo)
k_{eff}	Rigidez efectiva
MCEER	Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research
MCE	Sismo Máximo Considerado
Mw	Escala sismológica de magnitud de momento
N	Fuerza de Reacción Vertical
NEC	Norma ecuatoriana de la construcción
NEHRP	National Earthquake Hazards Reduction Program
$R=\phi_1$	Radio de Curvatura
R_{effi}	Radio efectivo
R_i	Radio de curvatura de la superficie deslizante i
PGA	Peak Ground Acceleration
PRA	Peak Rock Acceleration
SPT	Standar Penetration Test
TPF	Triple Péndulo Friccionante
T_{eff}	Período efectivo
u_i	Desplazamiento relativo del control deslizante
u_{dr1}	Desplazamiento de transición entre el Régimen III y IV

u_{dr4}	Desplazamiento de transición entre el Régimen IV y V
u^*	Desplazamiento de transición entre el Régimen I y II
u^{**}	Desplazamiento de transición entre el Régimen II y III
u_{max}	Máximo Desplazamiento Horizontal
μ_i	Coefficiente de fricción de la superficie deslizante i
Qd	Fuerza en relación a desplazamiento (Función del coeficiente de fricción)
W	Carga vertical
WSDOT	Washington State Department of Transportation
θ	Ángulo de Rotación
$\lambda_{(ae,max)}$	Factor de modificación para calcular el valor máximo ante los efectos de envejecimiento y condiciones de medio ambiente.
$\lambda_{(ae,min)}$	Factor de modificación para calcular el valor mínimo ante los efectos de envejecimiento y condiciones de medio ambiente.
$\lambda_{(test,max)}$	Factor de modificación para calcular el valor máximo ante los efectos de calentamiento, valor de carga, y torsión.
$\lambda_{(test,min)}$	Factor de modificación para calcular el valor mínimo ante los efectos de calentamiento, valor de carga, y torsión.
$\lambda_{(spec,max)}$	Factor de modificación para calcular el valor máximo en relación a la variación permisible del promedio de las propiedades de un grupo de aisladores de la misma medida.
$\lambda_{(spec,min)}$	Factor de modificación para calcular el valor mínimo en relación a la variación permisible del promedio de las propiedades de un grupo de aisladores de la misma medida.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo analizar y establecer el desempeño de los cuatro aisladores tipo Triple Péndulo Friccionante (TPF), colocados en la Pila No. 12 del Puente “Los Caras”, ubicado en la provincia de Manabí. Este puente es la principal vía de comunicación entre San Vicente y Bahía de Caráquez y que, después del sismo del 16 de abril de 2016, de magnitud 7.8 en la escala de Richter, no presentó daños generales en sus componentes estructurales, gracias al empleo de tecnología de aislamiento de base, en su diseño y construcción. Los aisladores sísmicos que presentaron mayores desplazamientos durante la acción sísmica fueron evaluados inicialmente por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército (CEE), concluyendo que aquellos que requerían analizarse están ubicados en la Pila No. 12. De estas evidencias, se establece una metodología para realizar el reemplazo de los aisladores. Posteriormente, se analizan los resultados obtenidos en la Prueba de Carga Dinámica previa a la adquisición de los aisladores para el Puente “Los Caras”, contrastando esta información con los resultados obtenidos en las Pruebas de Carga Dinámica realizadas a los cuatro aisladores de la Pila No. 12. sobre la base de las ideas expuestas, se someten las características y propiedades de los Aisladores TPF, a un análisis empleando un modelo analítico y un modelo computacional, los que describen propiedades tales como: período natural, rigidez, frecuencia, amortiguamiento, regímenes de comportamiento, entre otras; a fin de establecer el comportamiento real que presentaron estos aisladores.

Palabras Clave:

- **AISLADORES SÍSMICOS**
- **DESPLAZAMIENTOS**
- **REGÍMENES DE COMPORTAMIENTO**
- **PERÍODO NATURAL**

ABSTRACT

This work aims to analyze and establish the performance of the four isolators type TPF. (Frictional Pendulum System) of third generation, existing in Pier No. 12 of the "Los Caras" Bridge, located in the province of Manabí. This bridge is the main communication route between San Vicente and Bahía de Caráquez; and after the earthquake of April 16, 2016 of magnitude 7.8 on the Richter scale, did not present general damages in its structural components, thanks to the use of basic isolation technology in its design and construction. The seismic isolators that presented the greatest displacements during the seismic action were initially evaluated by the Army Corps of Engineers (CEE), concluding that those that needed to be analyzed are located in Pier No. 12. From these evidences, a methodology is established to perform the replacement of the isolators. Subsequently, the results obtained in the Dynamic Load Test prior to the acquisition of the isolators for the "Los Caras" Bridge are analyzed, contrasting this information with the results obtained in the Dynamic Load Tests performed on the four isolators of the No 12. On the basis of the ideas presented, the characteristics and properties of the TPF Isolators are subjected to an analysis using an analytical model and a computational model, which describe properties such as: natural period, stiffness, frequency, damping, behavior regimes, among others; in order to establish the real behavior presented by these isolators.

Keywords:

- **SEISMIC ISOLATORS**
- **DISPLACEMENTS**
- **BEHAVIOR REGIMES**
- **NATURAL PERIOD**

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. Introducción

El presente capítulo hace una revisión general del puente “Los Caras” construido sobre el estuario del río Chone, el mismo que presenta como tecnología constructiva aislamiento sísmico en sus componentes estructurales. Además, comprende un breve marco teórico sobre aislamiento sísmico en puentes, específicamente con lo relacionado a los Aisladores de Base TPF, vinculado al concepto de sus propiedades, ventajas y comportamiento como parte de una estructura esencial, ante un evento sísmico.

En consecuencia, se menciona la normativa de diseño, para este tipo de estructuras, a fin de lograr un desempeño sísmico adecuado frente a posibles sollicitaciones sísmicas. Las respuestas dinámicas están determinadas por las aceleraciones, velocidades y desplazamientos de sus elementos, las mismas que deben ser minimizadas, con la finalidad de garantizar la operatividad del puente. Una adecuada filosofía de diseño, basada en objetivos de respuesta sísmica, permite reducir el daño y garantiza la funcionalidad del proyecto.

1.2. Generalidades del proyecto

El 4 de agosto de 1998 a las 13:59, se produjo un terremoto de magnitud $M_w = 7,1$ con epicentro localizado en el poblado de Canoa (Nikolaou et al., 2017). La experiencia ante los errores constructivos que se vieron en esa tragedia, obligó a considerar en la etapa de diseño del proyecto del puente “Los Caras”, el uso de aislamiento de base, tecnología usada en otros países, con riesgos sísmicos similares a los de Ecuador, iniciando su construcción por parte del CEE en el 2007, para ser inaugurado en el 2010.

En la actualidad, el puente “Los Caras”, construido entre Bahía de Caráquez y San Vicente, constituye una estructura primordial para nuestro país, llegando a ser una vía de comunicación prioritaria que une las ciudades antes citadas.

Tiene una longitud total de 1.980m; estructuralmente está conformado por 3 sectores: el acceso desde Bahía de Caráquez, constituido por 6 tramos de 20m de luz y una longitud total de 120m; el acceso desde San Vicente, constituido por 5 tramos curvos de 30m de luz y una

longitud total de 150 m; y, el sector central sobre el río Chone, conformado por 38 tramos rectos de 45m de luz, con una longitud total de 1.710m (L. M. Romo, 2008).

La innovación tecnológica de este puente se da gracias a 152 aisladores sísmicos, colocados a lo largo de las 38 pilas ubicadas bajo el agua, de las 48 existentes en el puente, como respuesta a la filosofía de diseño basada en la Norma Ecuatoriana de la Construcción Ecuatoriana (NEC-15), en la que se cita como uno de sus objetivos principales: la reducción del riesgo sísmico a niveles aceptables para el contexto ecuatoriano. El riesgo sísmico tiene que ver con las condiciones geotécnicas del Ecuador y con la vulnerabilidad de las edificaciones que se reducirá con la aplicación obligatoria de criterios y métodos de diseño especificados en esta norma (MIDUVI, 2015).

El sábado 16 de abril de 2016, a las 18:58 ECT, ocurrió un movimiento sísmico, con epicentro en coordenadas $0.353^{\circ}\text{N } 79.925^{\circ}\text{W}$, entre las parroquias Pedernales y Cojimíes del cantón Pedernales, en la provincia ecuatoriana de Manabí, con una magnitud de 7,8Mw en la escala de Richter. Este sismo afectó algunas provincias de la Costa Ecuatoriana (E.P.N., 2016). El Puente “Los Caras” no presentó daño y fue empleado como vía principal de abastecimiento, traslado de heridos y ayuda humanitaria, debido principalmente a su diseño estructural con aislamiento sísmico.

Esta investigación pretende determinar el comportamiento de los aisladores sísmicos tipo TPF que presentaron mayores desplazamientos durante el sismo mencionado anteriormente, toda vez que previo a una inspección realizada por el CEE, se pudo determinar que en la Pila No. 12, se encuentran los cuatro aisladores que presentaron estas consideraciones ante las solicitudes ocasionadas.

Los aisladores sísmicos tipo TPF de tercera generación, fueron adquiridos a la fábrica Norteamericana Earthquake Protection Systems (EPS), previo a los ensayos pertinentes, de acuerdo con las propiedades requeridas y en función del diseño estructural, siendo entregados, de manera estandarizada, para su colocación en el Puente “Los Caras”. En relación a estas evidencias, se determinará los máximos desplazamientos y el desempeño que presentaron estos aisladores, aplicando la investigación histórica y descriptiva. Histórica debido a que se pretende entender un hecho o experiencia en función del diseño y la colocación de cuatro aisladores sísmicos ubicados en la Pila No. 12, en donde se cuenta con fuentes primarias y secundarias,

que en general permitirán la contratación de esta en función de una actividad o hecho actual. Descriptiva en razón de que comprende la descripción, registro, análisis e interpretación de los resultados inherentes al aislamiento sísmico en puentes, posterior a la comparación de resultados de diseño y de comportamiento durante el sismo del 16 de abril del 2016.

En este contexto, los capítulos que integran el presente trabajo abarcan el marco teórico sobre aislamiento sísmico en puentes, específicamente en lo relacionado con los Aisladores Sísmicos TPF, sus propiedades y su comportamiento como parte de una estructura sísmicamente diseñada. Posteriormente, se expone el procedimiento a emplearse para el retiro de los aisladores sísmicos TPF de la Pila No. 12, basado en un protocolo concomitante con la Normativa Internacional; con esta actividad se pretende reemplazar estos aisladores y contrastar su comportamiento con los resultados de los ensayos dinámicos previos realizados por la empresa EPS, contrastando los mismos con la información seleccionada de registros de acelerogramas, según lo establece la norma señalada para el efecto; con esta información, se discretizará resultados de diseño basados en modelos analíticos, frente a los obtenidos durante este proceso. Se empleará el software computacional 3pleANI para modelar y validar los resultados del comportamiento de estos aisladores en la Pila No. 12, añadiendo un análisis dinámico integrado a la pila No. 12, para finalmente hacer una breve descripción de los Factores de Propiedad de Modificación Lambda y así llegar a conclusiones que permitirán dar la pauta y cuantificar la efectividad del aislamiento sísmico en este tipo de superestructuras estratégicas para nuestro país.

1.3. Antecedentes

El aislamiento sísmico es una técnica de modificación de la respuesta que reduce los efectos de los terremotos en puentes y otras estructuras. El aislamiento desacopla físicamente la superestructura de un puente de los componentes horizontales del movimiento sísmico del suelo, lo que lleva a una reducción sustancial de las fuerzas generadas por un terremoto (Buckle, Constantinou, Diceli, & Ghasemi, 2006). Por lo tanto, se puede obtener un mejor rendimiento sin costes adicionales.

En la *Figura 1*, se puede observar la diferencia entre el desacoplamiento de la subestructura y superestructura de un puente, interponiendo dispositivos mecánicos con una rigidez

horizontal muy baja. Estos dispositivos se denominan aisladores sísmicos o simplemente aisladores.

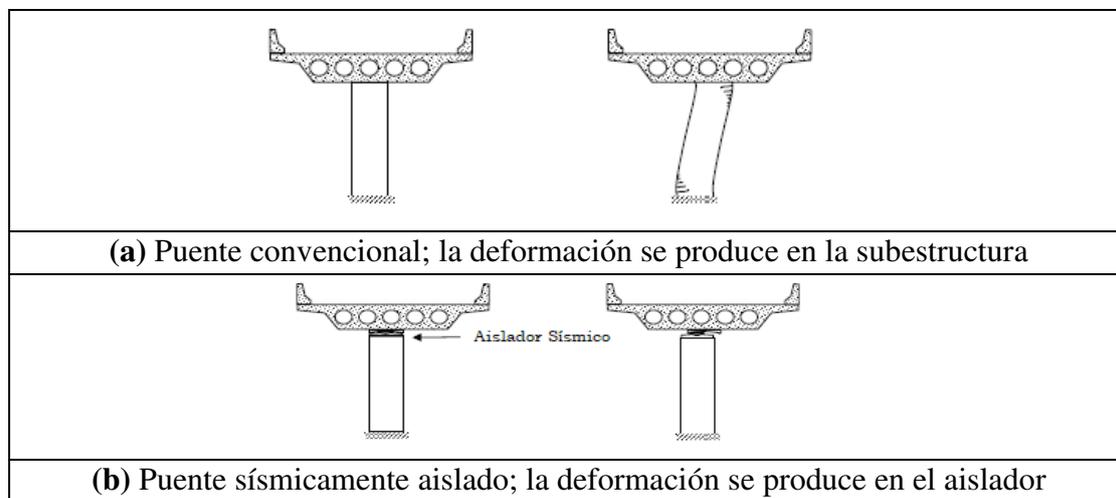


Figura 1 Comparación entre un Puente Convencional y Sísmicamente Aislado

Fuente: (Buckle et al., 2006)

Cuando un puente aislado es sometido a una acción sísmica la deformación se produce en los aisladores, en lugar de los elementos de la subestructura. Esto reduce en gran medida las fuerzas sísmicas y los desplazamientos transmitidos desde la superestructura a la subestructura.

La tecnología sismo resistente ha sido probada en puentes a escala mundial, de manera que reduce las fuerzas de inercia de las estructuras hacia la capacidad elástica de las mismas, eliminando o reduciendo la deformación inelástica y el daño en los elementos estructurales del puente, esto se ha obtenido alargando los períodos del sistema, es decir reduciendo las demandas, en base al espectro de aceleraciones.

Los sistemas de aislamiento sísmico con fuerza de restauración se han utilizado en puentes en Nueva Zelanda, Japón, Chile, Turquía, y los Estados Unidos. Un gran número de estos puentes se aísla sólo en la dirección longitudinal (denominada aislamiento parcial o unidireccional); en el Japón, siguieron un enfoque diferente en la protección de puentes, que prefieren el uso de sistemas de aislamiento rígido con el fin de aumentar la disipación de energía y lograr la distribución efectiva de las fuerzas laterales. Este enfoque se llama "Menshin" (Tsopelas, Constantinou, Kim, & Okamoto, 1996).

En 1991, la Universidad de Buffalo y Taisei Corporation, Japón, comenzaron un programa de investigación sobre el estudio de sistemas de protección sísmica a utilizarse en Japón, que

tuvo como objetivo estudiar sistemas de aislamiento establecidos que no se habían probado previamente en un modelo de puente. Estos incluyeron los sistemas elastoplásticos italianos y el sistema deslizante esférico denominado Friction Pendulum System (FPS) (Tsopelas et al., 1996).

Los Sistemas de Péndulo Friccionante (FPS), tienen características de péndulo para alargar el periodo natural de la estructura aislada y así evitar altas fuerzas sísmicas. En la *Figura 2* (a) se presenta un aislador de péndulo simple con una superficie de deslizamiento esférica, que actúa muy bien como el péndulo esférico de la *Figura 2* (b), pero tiene rigidez lateral como resultado de la curvatura de la interfaz de deslizamiento. Estos aisladores son capaces de transportar cargas axiales muy grandes y pueden ser diseñados para tener largos periodos de vibración (5 segundos o más) con grandes capacidades de desplazamiento lateral (Buckle et al., 2006). En la *Figura 2* (c) se puede observar el esquema de construcción del Aislador de Péndulo Friccionante y sus parámetros básicos de diseño.

El Aislador TPF reúne tres péndulos en un solo apoyo, cada uno con propiedades específicas para optimizar la respuesta de la estructura a diferentes fuerzas sísmicas, como se observa en la *Figura 2* (d).

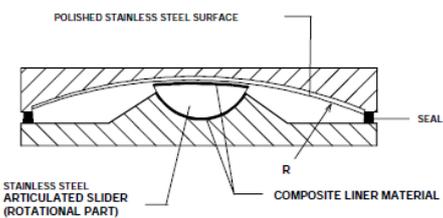
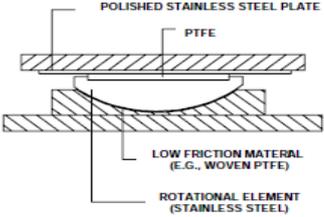
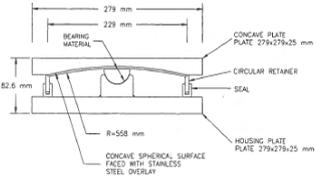
	
<p>(a) Aislador de Péndulo Friccionante Fuente: (Buckle et al., 2006)</p>	<p>(b) Aisladores Deslizantes Planos (Aislador Esférico) Fuente: (Buckle et al., 2006)</p>
	
<p>(c) Construcción de un sistema de rodamientos simple Fuente: (Tsopelas et al., 1996)</p>	<p>(d) Aislador de Triple Péndulo Friccionante Fuente: (EPS, 2009)</p>

Figura 2 Varios Esquemas de Aisladores de Péndulo Friccionante

Con esta filosofía de diseño, en nuestro país, se generó la tendencia de diseño y construcción de estructuras sísmicamente aisladas, dentro de las cuales, el Puente de Esmeraldas y el Puente “Los Caras” emplearon aislamiento de base con sistemas TPF, que fue descrito anteriormente.

En la *Figura 3* (a) se puede apreciar los tramos del Puente “Los Caras”, desde el tramo central hasta sus accesos de conexión entre Bahía de Caráquez y San Vicente; en la *Figura 3* (b) se puede apreciar la subestructura del puente conectada con las vigas a través de sistemas de aislamiento de base; y, en la *Figura 3* (c) se aprecia uno de los aisladores tipo TPF colocado en el Puente “Los Caras”.



Figura 3 Imágenes del Puente “Los Caras” y su diseño estructural con aisladores sísmicos.

Fuente:(CEE, 2010)

1.4. Estado del Arte

De las investigaciones revisadas se puede deducir que, principalmente, el análisis de la peligrosidad sísmica ha llevado a un sinnúmero de soluciones estructurales que permitieron el desarrollo de sistemas pasivos de disipación de energía y de aislamiento de base, como técnicas eficaces en el diseño resistente a terremotos, reduciendo el nivel de respuesta de las estructuras en comparación con sistemas convencionales.

La NEC-15, es la normativa nacional que propicia los lineamientos para la construcción de estructuras con estándares internacionales de seguridad y de acuerdo con el avance tecnológico. Esto se debe principalmente a que nuestro país está localizado en una zona calificada de alto riesgo sísmico (MIDUVI, 2015).

Las normas internacionales referidas en la NEC-15, después de varias experimentaciones y análisis, han demostrado a escala mundial, la eficacia en procedimientos que reducen el nivel de respuesta de las estructuras en comparación con los sistemas convencionales, y son principalmente las emitidas por la American Society of Civil Engineers (ASCE/SEI 7-10) “Minimum Design Loads for Buildings and other Structures”; actualmente fue revisada, estando vigente ya la ASCE/SEI 7-16.

De igual forma, las consideraciones emitidas por la Building Seismic Safety Council (BSSC 2004) “National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP): Recommended Provisions and Commentary for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures” Federal Emergency Management Agency (FEMA 450), así como las contenidas en la “Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures” Federal Emergency Management Agency (FEMA 440).

Dentro de las especificaciones para el diseño de Puentes, específicamente, la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) establece a la “Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design” para la estandarización de objetivos de desempeño, niveles de amenaza sísmica (probabilidad de excedencia o período de retorno) y niveles de desempeño estructural (estados límites) principalmente.

Muchas investigaciones experimentales y analíticas han demostrado la eficacia del uso del aislamiento de base y otros sistemas de protección sísmica, haciéndolos actualmente muy comunes para el diseño de infraestructuras importantes como el caso de puentes.

El Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER), desde 1987, ha publicado reportes que describen nuevas innovaciones, desarrollo y análisis estructurales relacionados a la parte sísmica, dentro de una variedad de temas específicos. Estas publicaciones son base fundamental para esta investigación, específicamente las consideradas para el análisis de aisladores sísmicos tipo FPS en puentes.

Según (Michalakis C Constantinou, Kalpakidis, Filiatrault, & Lay, 2011), el significado de un procedimiento de análisis y diseño unificado para los rodamientos convencionales de un puente y los aisladores sísmicos, se resalta por la filosofía emergente de que todos los sistemas de aislamiento deben estar diseñados para el desplazamiento esperado y las demandas de fuerza en las acciones sísmicas.

De igual forma, (Sarlis & Constantinou, 2013) manifiestan que se puede modelar un elemento de triple fricción pendular en estructuras de cualquier tipo para realizar un “Time History Analysis”, que permita calcular explícitamente el desplazamiento deslizante y las velocidades para cada una de las cuatro superficies que posee. La formulación del elemento permite la inclusión de los efectos de inercia de las partes móviles del aislador, carga vertical diferente sobre cada superficie de deslizamiento debido al efecto del peso propio de los componentes por encima de cada superficie y variación en los valores del coeficiente de fricción (como funciones de velocidad de deslizamiento, temperatura y otros parámetros). Además, el dispositivo permite que la placa cóncava superior e inferior gire y sea capaz de realizar comprobaciones para la estabilidad de los diversos componentes del elemento, que pueden facilitar su uso para el análisis del levantamiento, como se puede apreciar en la *Figura 4*.



Figura 4 Acción deslizante de un aislador TPF deformado

Fuente: (Sarlis & Constantinou, 2013)

Finalmente, con una selección adecuada de geometría y parámetros de fricción, el elemento es capaz de modelar otros aisladores de péndulo de fricción como el Doble Péndulo Friccionante (DFP) con deslizamiento rígido, el DPF con un deslizamiento articulado y un neumático sencillo FP con un deslizador articulado.

Los parámetros de diseño analizados en el presente trabajo, se basan en el comportamiento propio de las cinco fases que presenta este tipo de aislador TPF, por lo cual, (Fenz & Constantinou, 2008a) establecen que, cuando el aislador está configurado correctamente, presenta cambios estimados en rigidez y amortiguación con una amplitud creciente de desplazamiento. Se ha demostrado que las transiciones en rigidez y amortiguación resultan de las diversas combinaciones de deslizamiento que se producen en las múltiples superficies cóncavas.

Por otro lado, este tipo de sistemas de aislamiento utilizados en puentes como el de Esmeraldas y el de Bahía de Caráquez, han sido parte del diseño sísmico del Centro de Investigaciones de la Universidad de Fuerzas Armadas - ESPE. De acuerdo al análisis realizado por (M. Constantinou, Aguiar, Morales, & Caiza, 2016), sobre el desempeño del aislador TPF 8833/12-12/8-5; que se pensaba utilizar en la construcción del nuevo Centro de Investigaciones Científicas y de Post Grado de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE y fue modelado como un sistema de un grado de libertad ante la acción del sismo de diseño que recomienda la Norma Ecuatoriana de la Construcción, NEC-15, con la finalidad de determinar la estabilidad del sistema y los máximos desplazamientos utilizando los coeficientes de fricción nominales más bajos, se pudo concluir que era necesario incrementar la altura del aislador al TPF 8833/12-12/8-6; el cual finalmente es el que se utilizó en el Proyecto.

1.5. Justificación e Importancia

En la actualidad, los aisladores sísmicos ya no pueden permanecer solo como tema de estudio en la academia, sino que tienen que ser implementados en las estructuras que así lo requieran, como filosofía de diseño, sobre todo en zonas con altos índices de peligrosidad sísmica como lo es el Ecuador. Es indispensable innovar tecnológicamente diferentes métodos y técnicas que tengan un enfoque experimental, comprobado y competente. Los avances en las investigaciones han tenido relevancia en países desarrollados como Estados Unidos y Japón, que han sido los principales países que han aportado al desarrollo de esta tecnología. Debido a la falta de práctica

en la implementación de estos sistemas, en el Ecuador el uso de este tipo de metodologías de construcción aún es incipiente.

Los estándares de diseño y construcción en el puente “Los Caras”, han permitido tener desempeños sísmicos adecuados que evitaron el daño, alcanzando niveles de protección en esta obra emblemática, diseñada y construida por el CEE. Este puente mantuvo funcionalidad continua o total operatividad, durante y después del terremoto del 16 de abril de 2016, a pesar de que en Bahía se tuvieron aceleraciones pico en suelos horizontales muy altas.

Los criterios de diseño de aislamiento con factores de seguridad que fueron implementados en el puente “Los Caras”, salvaron vidas, lo cual demostró que una adecuada filosofía de diseño sísmico utilizando aislamiento de base, permite reducir el riesgo y evitar el colapso.

Para corroborar la funcionalidad y la implementación de aisladores sísmicos FPS, se propuso realizar esta investigación referente al desempeño de los aisladores TPF instalados en el puente de Bahía de Caráquez, específicamente con relación a los desplazamientos máximos presentados por los aisladores TPF de la Pila No. 12, previo a la inspección realizada por parte del CEE, lo que permitirá obtener resultados que arrojen conclusiones del comportamiento posterior al sismo de Pedernales 2016.

Debido a la variedad de métodos constructivos, es importante contar con una fuente de investigación que permita optimizar el uso de esta tecnología en nuestro medio, específicamente en lo relacionado al retiro y desalojo de este tipo de aisladores en puentes.

Cabe señalar que este trabajo constituye una importante contribución para los académicos y constructores del país; se espera que con los resultados estimados se genere una fuente de investigación que aporte al conocimiento de este tipo de solución estructural y a la metodología de análisis. Además, es necesario considerar la reducción de costos a futuro, por su implementación, estimando únicamente los establecidos por mantenimiento y no por reconstrucción de la estructura.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo General

Analizar los aisladores sísmicos tipo TPF, colocados en la Pila No. 12 del puente “Los Caras” que presentaron mayores desplazamientos, mediante resultados de ensayos

y análisis de métodos dinámicos en el rango no lineal, para verificar los efectos mediante la metodología usada en el diseño constructivo de este puente.

1.6.2. Objetivos Específicos

- Verificar el estado de los aisladores sísmicos tipo TPF de la Pila No. 12 del puente “Los Caras”.
- Analizar el comportamiento de los aisladores tipo TPF.
- Determinar la estabilidad del sistema y los máximos desplazamientos.
- Diseñar un modelo numérico que describa el funcionamiento de los aisladores FPS.
- Analizar mediante un modelo computacional el comportamiento de los aisladores TPF de la Pila No. 12 del puente “Los Caras”, sometiéndolos a registro existentes del sismo ocurrido.

1.7. Área de Influencia

Geográficamente, la zona de estudio está situada en Ecuador, provincia de Manabí, entre las poblaciones de Bahía de Caráquez y San Vicente. El puente “Los Caras” se encuentra ubicado en las coordenadas: Latitud: 0° 36' 54' Sur y Longitud: 80° 25' 24" Oeste.

El área de influencia es a escala local y regional; debe considerarse que el estudio del aislamiento sísmico, como parte de la filosofía de diseño, es un concepto aplicado en países tecnológicamente avanzados; frente a este señalamiento, es prioritario que en nuestro medio se aporte en el ámbito de la investigación, innovación y transferencia de tecnología, específicamente en lo relacionado con la industria de la construcción, cuyo fin primordial y esencial está relacionado con el bienestar de las personas y con la necesidad de precautelar la vida humana.

Dentro del ámbito de seguridad y defensa, es necesario conceptualizar y visualizar que dentro de la prospectiva institucional existen misiones dentro de Fuerzas Armadas que se correlacionan con esta área del conocimiento. Estas misiones en tiempos de paz, principalmente las relacionadas con las construcciones, están a cargo del CEE, por lo cual es importante manejar nuevos estándares de diseño que van de la mano con la innovación en el mundo.

1.8. Resumen

En este capítulo se ha resaltado la importancia de los sistemas de aislamiento sísmico, su desarrollo y la aplicación efectiva en nuestro medio, para mejorar los sistemas constructivos y reducir la pérdida de vidas humanas; por lo tanto, se proporciona una visión general de algunos sistemas TPF, así como algunos detalles en su diseño.

Se realiza un estudio del estado del arte de estos sistemas, a fin de deducir, principalmente, el análisis de la peligrosidad sísmica que ha llevado a un sin número de soluciones estructurales que han permitido el desarrollo de estas técnicas de disipación de energía, como un medio para mejorar el rendimiento sísmico en estructuras como el puente “Los Caras”.

En el Capítulo 2 se trata sobre los sistemas pasivos de control sísmico y las técnicas efectivas para un diseño estructural óptimo como aislamiento de base, además se describe cada uno de los regímenes deslizantes, para el análisis del deslizamiento en las superficies de un aislador TPF.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Introducción

En este capítulo se presenta la funcionalidad de los sistemas pasivos de control para aislamiento sísmico, infiriendo al estudio relacionado con el uso en estructuras que aumentan el periodo fundamental; por otra parte, se describe también el costo y beneficio de los sistemas de aislamiento de base.

El sistema principal, al cual se hace referencia, es el aislamiento de base a través del uso de una interfaz flexible o deslizante, la que cambia el periodo fundamental de la estructura, sin que se vea afectado por las altas frecuencias.

Se muestra cómo los aisladores TPF presentan múltiples ventajas, una de ellas es la de ser un dispositivo compacto que adapta su desempeño en relación con la demanda, para aumentar la capacidad de desplazamiento y reducir la velocidad en el movimiento.

Finalmente, se presentan los principios de operación de aisladores de base TPF, basados en el comportamiento de los cinco tipos de regímenes deslizantes y la relación fuerza - desplazamiento.

2.2. Sistemas Pasivos de Control Sísmicos

Los sistemas pasivos de control sísmico, como el aislamiento sísmico, son técnicas efectivas en el diseño de estructuras con actividad sísmica. Muchas investigaciones experimentales y analíticas han demostrado la efectividad de los sistemas de aislamiento de base, los cuales sirven para reducir el nivel de respuesta de las estructuras en comparación con una configuración de diseño convencional.

El aislamiento de base desacopla a la estructura de los efectos de un sismo de alta frecuencia (período corto). Esto se logra mediante el uso de dispositivos mecánicos (por ejemplo, aislamiento sísmico con rodamientos), que aumentan el período fundamental de la estructura varias veces que el de la estructura sin aislamiento (Morales, Filiatrault, & Aref, 2017).

Generalmente, se instala el sistema de aislamiento sísmico entre la fundación y la superestructura, por lo cual se deduce el nombre de aislamiento de base. Sin embargo, varios dispositivos de aislamiento sísmico se pueden instalar a lo largo de la altura de un edificio para aislar una porción superior de la estructura.

El uso de aislamiento de base y otros sistemas de protección sísmica se han vuelto muy comunes en países desarrollados, quienes emplean estos sistemas en la construcción de infraestructuras importantes como hospitales, edificios históricos y puentes. La efectividad de estos sistemas ha sido demostrada ante eventos que han ocurrido en Nueva Zelanda, Estados Unidos, Japón, Italia y Chile (Morales et al., 2017).

Hay factores que deben considerarse al evaluar el uso de un sistema de aislamiento sísmico, particularmente en países como el Ecuador, en donde todavía hay falta de experiencia y conciencia general. Uno de los principales factores que obstaculizan el uso de sistemas de aislamiento es el alto costo de adquisición e implementación, por esta razón, se necesitan alternativas de bajo costo para infraestructura prioritaria, tales como hospitales, edificios y puentes.

2.3. Aislamiento de Base en Estructuras

El objetivo de un sistema de aislamiento sísmico es aumentar el período fundamental de vibración de la estructura usando una interfaz flexible o deslizante. El aislamiento de base cambia el período fundamental de la estructura, evitando que sea afectada por las altas frecuencias (períodos cortos), asociados con movimientos de terremotos. Los tres principios fundamentales para considerar en el diseño de sistemas de aislamiento sísmico son:

- Disipación de Energía
- Rigidez bajo niveles de carga de servicio bajos
- Estabilidad

La *Figura 5*, muestra la aceleración absoluta típica y los espectros de respuesta de desplazamiento relativo de los movimientos del terremoto. La estructura aislada observada en la *Figura 5 (a)*, tiene un período más largo en comparación a la estructura fija y está sujeta a aceleraciones más bajas. La *Figura 5 (b)*, ilustra que el cambio en el período da como resultado

mayores desplazamientos relativos. La flexibilidad del sistema aumenta los desplazamientos relativos que se concentran en el dispositivo/capa de aislamiento, en lugar de la estructura misma. A fin de retener la estabilidad, una estructura debe tener la capacidad de soportar las cargas verticales mientras se somete a desplazamientos horizontales.

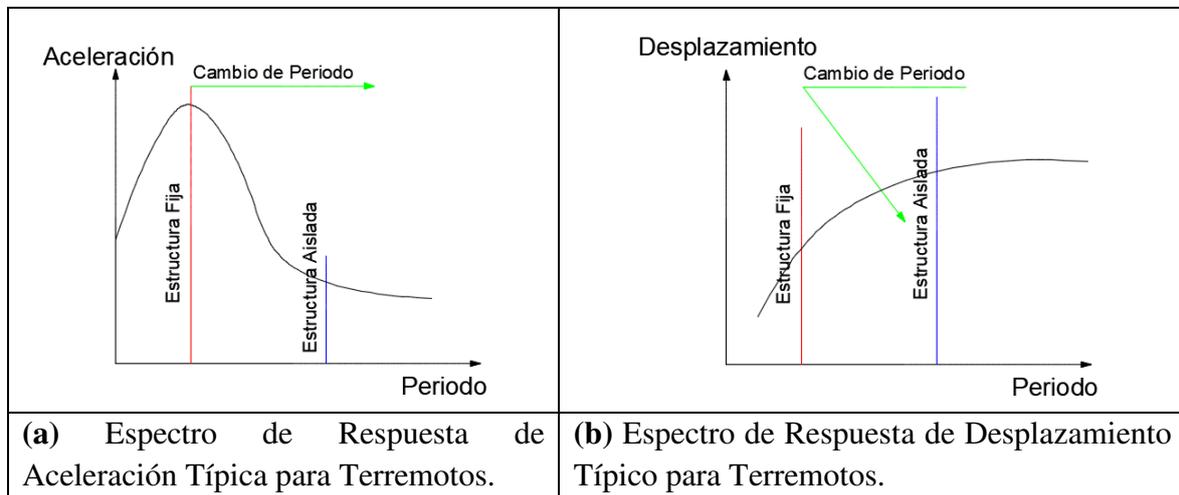


Figura 5 Espectros de Respuesta de Aceleración y Desplazamiento para Estructuras Fijas y Aisladas.

El dispositivo de aislamiento sísmico más común es el aislador elastomérico que se lo puede visualizar en la *Figura 6* (a). Varios puentes han sido diseñados y modernizados en todo el mundo con esta técnica rentable para la protección sísmica (Buckle et al., 2006). Otro dispositivo de aislamiento sísmico comúnmente utilizado es el aislador de péndulo friccionante, que está basado en la fricción y usualmente hecho de acero inoxidable con teflón para las superficies de contacto, como se puede observar en la *Figura 6* (b).

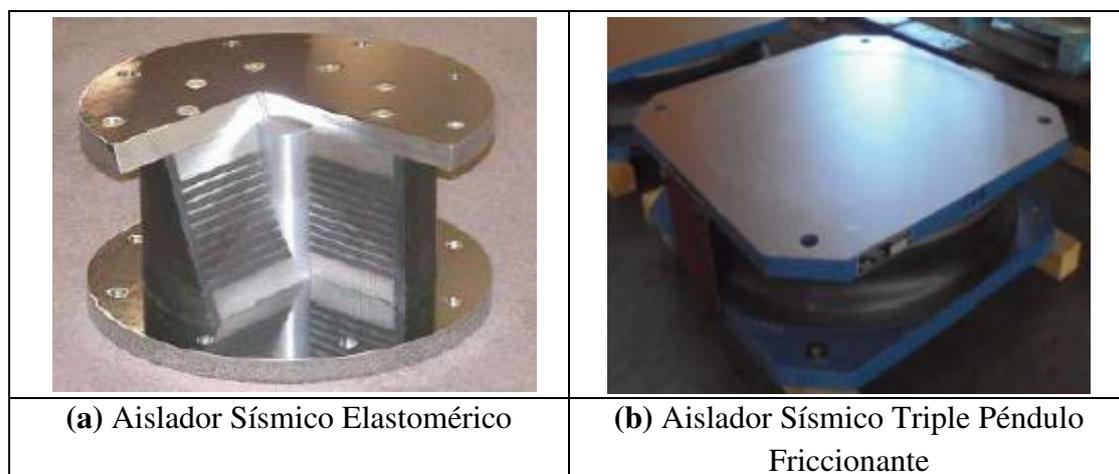


Figura 6 Dispositivos de Aislamiento Sísmico más comunes

Fuente: (Morales et al., 2017)

2.4. Aisladores Sísmicos Deslizantes

Los sistemas deslizantes usan fricción para mitigar los efectos de los terremotos. La superficie deslizante tiene una rigidez lateral baja que aumenta el período de la estructura más allá de los períodos dominantes de un terremoto dado. El primer sistema basado en deslizamiento se propuso en 1909. Ese sistema deslizante se basó en una capa de arena, permitiendo que la estructura se deslizara durante un terremoto (Naeim & Kelly, 1999).

La tecnología de los sistemas FPS simples, dobles o triples, son los dispositivos deslizantes que se usan comúnmente en la actualidad. Como su nombre lo indica, los aisladores FP simples están diseñados con una superficie deslizante, los aisladores DPF están diseñados con dos interfaces deslizantes y los TPF están diseñados con múltiples superficies deslizantes que tienen diferentes propiedades geométricas y de fricción (Daniel M. Fenz & Michael C. Constantinou, 2006). La *Figura 7*, ilustra el diagrama de cuerpo libre y las ecuaciones básicas de una estructura rígida soportada por un aislador FP, que es un aislador deslizante con capacidad de auto - centrado debido al efecto de la gravedad y la curvatura de las superficies de deslizamiento. El diagrama de cuerpo libre muestra el funcionamiento del dispositivo. La ecuación 1 proporciona la fuerza para un sistema de péndulo deslizante.

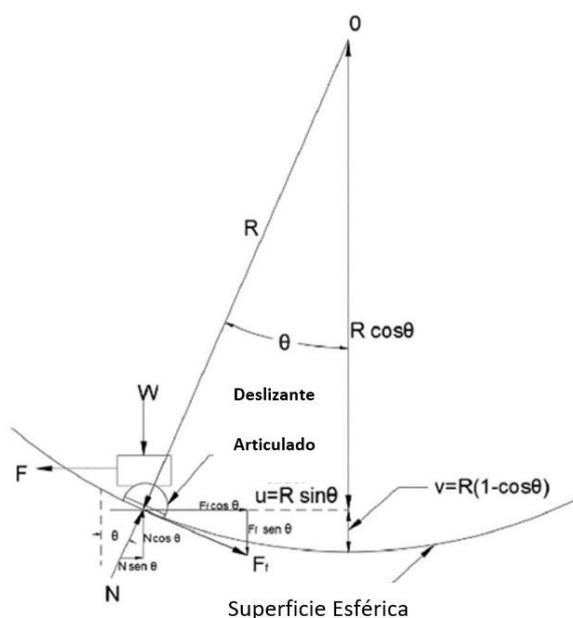


Figura 7 Diagrama de Cuerpo Libre de un Aislador Péndulo Friccionante Cóncavo Sencillo
Fuente: (Villaverde, 2009)

$$\sum F_x = N \sin \theta + F_f \cos \theta = 0 \quad (1)$$

$$\sum F_y = N \cos \theta - W = 0; \frac{W}{\cos \theta} = 0$$

Las fuerzas de fricción han sido reemplazadas por $\mu W \operatorname{sgn}(\dot{u})$

$$N \sin \theta + F_f \cos \theta \quad (2)$$

$$F = \frac{W}{R} u + \mu W \operatorname{sgn}(\dot{u}) \quad (3)$$

Donde $\frac{W}{R}$ es la Rigidez

Dónde:

- W = Peso
- N = Fuerza de Reacción Vertical
- F_f = Fuerza de Fricción
- R = Radio de Curvatura
- μ = Coeficiente de Fricción
- θ = Ángulo de Rotación

A continuación, se presenta el período natural de un sistema rígido aislado FPS (Ecuación 4), el cual es una función del radio de curvatura (R). Esta es una gran ventaja del sistema FPS sobre los sistemas de aisladores de goma ya que el peso de la estructura admitida no entra en la ecuación de período aislado, de esta manera las estructuras livianas y pesadas, pueden ser analizadas analíticamente de manera sencilla.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (4)$$

La *Figura 8 (a)*, muestra los diagramas experimentales de fuerza vs. desplazamiento para un aislador doble FP (Fenz & Constantinou, 2008b). La relación de fuerza - desplazamiento y la curva de histéresis bilineal es una función del radio de curvatura efectivo, el coeficiente de fricción y la carga axial en el aislador. La rigidez inicial del aislador está dominada por el coeficiente de fricción. La rigidez elástica K_d se reduce significativamente porque la rigidez del aislador está controlada por el radio efectivo de las placas curvas. Por otro lado, la *Figura 8 (b)*, muestra la respuesta histerética de un sistema de péndulo friccionante, la cual puede modelarse mediante un simple modelo bilineal con las siguientes variables:

- W = Peso.
- Qd = Fuerza en desplazamiento pequeño que es función del coeficiente de fricción ($Qd = \mu W$).
- μ = coeficiente de fricción.
- Kd = rigidez post elástica (Kd es la función de W y el radio de curvatura efectivo).
- D = Desplazamiento máximo.
- EDC = Energía disipada por ciclo (área de ciclo de histéresis).

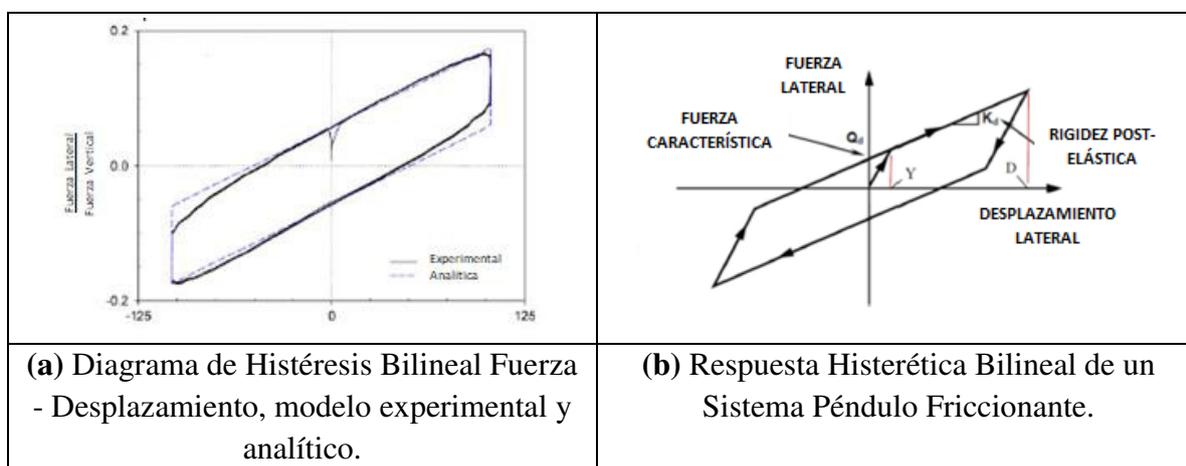


Figura 8 Diagramas Experimentales Fuerza – Desplazamiento para un Aislador DPF.

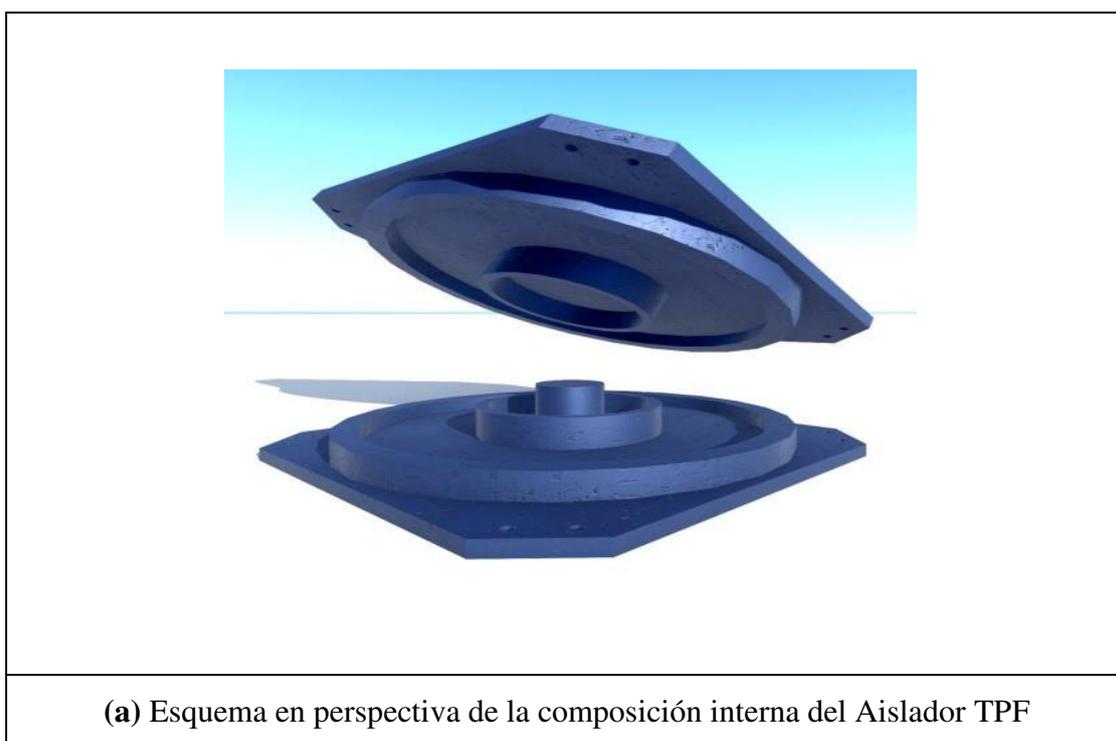
Fuente: (Fenz & Constantinou, 2008b)

La última generación de aisladores de péndulo se denominan triple péndulo friccionante (TPF), la cual consta de múltiples interfaces esféricas de deslizamiento, que proporcionan una rigidez de restauración, con fricción entre las mismas para disipar la energía y limitar el movimiento relativo.

Los aisladores sísmicos tipo TPF, exhiben un comportamiento dependiente entre la fuerza, amplitud y rigidez instantánea, representando un nuevo desarrollo en temas de aislamiento sísmico. El aislador TPF, presenta múltiples cambios en rigidez y resistencia aumentando la amplitud de desplazamiento. El nombre “Triple”, describe un comportamiento en el que su desempeño ocurre en tres superficies de deslizamiento, independientemente de la geometría y los valores de fricción (Fadi & Constantinou, 2010).

Cuando se diseñan correctamente, estos aisladores dan como resultado demandas reducidas de desplazamiento y/o demandas reducidas en fuerza y aceleración en los sistemas estructurales primarios y secundarios, en comparación con los aisladores de péndulo de fricción convencionales.

Los aisladores TPF presentan múltiples ventajas, como las de ser un dispositivo compacto con el comportamiento de adaptar su desempeño en relación con la demanda, para aumentar la capacidad de desplazamiento y reducir la velocidad en el movimiento, evitando así la variación en los coeficientes de fricción (Fenz & Constantinou, 2008b). En la *Figura 9* podemos apreciar un esquema general y específico de la composición externa e interna del aislador TPF.



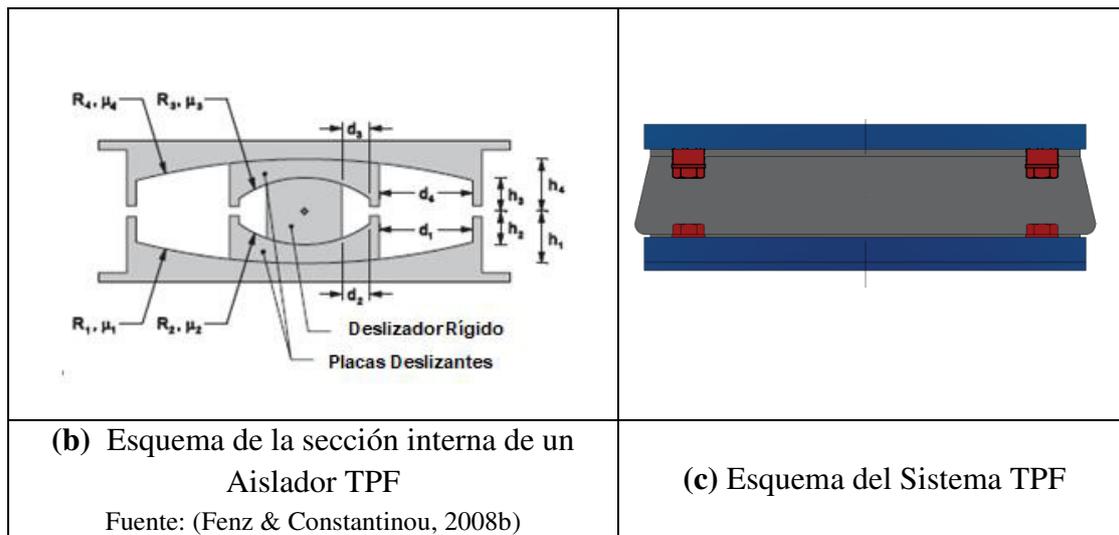


Figura 9 Esquema de la sección interna y externa de un aislador Triple Péndulo Friccionante

El comportamiento de un TPF se rige por las siguientes variables:

- R_i = Radio de curvatura de la superficie deslizante i .
- μ_i = Coeficiente de fricción de la superficie deslizante i .
- h_i = Altura de la interfaz deslizante i .
- d_i = Capacidad de desplazamiento de la interfaz deslizante i .

2.5. Principios de Operación de Aisladores de Base Tipo Triple Péndulo Friccionantes

El aislador TPF consta de dos superficies cóncavas de acero inoxidable separadas por un conjunto deslizante anidado internamente. Con referencia a la *Figura 9* (b), las placas cóncavas externas presentan radios de efectividad $R_{eff1} = R_1 - h_1$ y $R_{eff4} = R_4 - h_4$, donde R_i es el radio de curvatura de la i th superficie esférica y h_i es la distancia radial entre la i th superficie esférica y el punto de pivote del deslizador articulado. El conjunto deslizante articulado consta de dos placas de deslizamiento cóncavas separadas por un control deslizante rígido. La superficie de las placas deslizantes donde se acoplan las placas cóncavas externas, están recubiertas con un material deslizante no metálico. Los coeficientes de fricción de estas interfaces son μ_1 y μ_4 . Las superficies internas de las dos placas deslizantes tienen huecos cóncavos esféricos con radios $R_{eff2} = R_2 - h_2$ y $R_{eff3} = R_3 - h_3$. Ambas superficies externas del deslizador rígido también están recubiertas con un material deslizante no metálico caracterizado por coeficientes de fricción μ_2 y μ_3 . Esto permite el deslizamiento en las

superficies interiores de las placas de deslizamiento de acero inoxidable (Fenz & Constantinou, 2008b).

Las capacidades de desplazamiento nominal de las superficies deslizantes 1-4, se indican como $d_1 - d_4$ (debido a los efectos de la altura deslizante y la rotación deslizante, las capacidades de desplazamiento reales son ligeramente diferentes de lo establecido en la Figura 9 (b)). El comportamiento único del aislador TPF y los otros apoyos adaptativos se basa en parte a los diversos controles deslizantes que logran la capacidad de desplazamiento horizontal total de las superficies de deslizamiento respectivas durante la ejecución del movimiento. Por lo tanto, las capacidades de desplazamiento $d_1 - d_4$ son parámetros de diseño que influyen significativamente en el comportamiento global, no solo en los límites de capacidad general (Fenz & Constantinou, 2008b).

El comportamiento adaptativo del aislador TPF, resulta de las diferentes combinaciones de deslizamientos, esto puede ocurrir en las múltiples superficies cóncavas. El movimiento está organizado en varios regímenes de deslizamientos, cada uno corresponde a una combinación distinta de superficies sobre las cuales ocurre el movimiento. La rigidez del aislador es inversamente proporcional a la suma de los radios de curvatura de las superficies en que se produce deslizamiento. El coeficiente de fricción efectivo o nominal, también está relacionado con los coeficientes de fricción de las superficies sobre las cuales se produce el deslizamiento.

La secuencia de los regímenes de deslizamiento está determinada por el coeficiente de fricción de cada superficie y la relación de capacidad de desplazamiento al radio de curvatura. Comenzando desde el reposo, el deslizamiento inicia en la superficie cuando la fuerza horizontal transmitida a través del aislador, F , excede la superficie de la fuerza de fricción, $F_{fi} = \mu_i W$, donde W es la carga vertical en el aislador. El deslizamiento es detenido por un controlador deslizante en la i th superficie cuando el desplazamiento relativo del control deslizante en esta superficie, u_i , se vuelve igual a la capacidad de desplazamiento, d_i . La fuerza lateral en el instante que el deslizador comienza a apoyarse en el dispositivo de contención de desplazamiento de esta superficie es:

$$F_{dri} = \frac{W}{R_{effi}} d_i + F_{fi} \quad (5)$$

La secuencia de activación y desactivación del deslizamiento en diversas superficies está determinada por la comparación de los valores relativos de F_{fi} y F_{dri} .

La configuración estándar del aislador TPF, está dada por radios efectivos grandes e iguales para las placas cóncavas externas y radios efectivos pequeños para las placas deslizantes internas, $R_{eff1} = R_{eff4} \gg R_{eff2} = R_{eff3}$.

Los coeficientes de fricción se seleccionan para que el aislador presente inicialmente una alta rigidez y baja fricción; posteriormente disminuye en rigidez y aumenta la fricción efectiva, así como la amplitud de desplazamiento. Esto se logra mediante el uso de materiales de fricción que dan $\mu_1 = \mu_3 < \mu_2 < \mu_4$. Las capacidades de desplazamiento de cada superficie son seleccionadas para que haya una rigidez gradual a grandes desplazamientos. El control deslizante debe contactar el limitador de desplazamiento en las superficies 1 y 4 antes de las superficies 2 y 3. Siempre que el movimiento inicie en las superficies 2 y 3 antes que las superficies 1 y 4, esto está garantizado siempre que $F_{f1} < F_{dr2}$ y $F_{f4} < F_{dr3}$. En términos de desplazamientos, esta condición es $d_2 > (\mu_1 - \mu_2)R_{eff2}$ y $d_3 > (\mu_4 - \mu_3)R_{eff3}$. Además, el deslizamiento debería iniciar en la superficie de mayor fricción antes de la aparición de cualquier rigidez, siendo $F_{f4} < F_{dr1}$. Esto es para evitar una situación en la que el aislador se endurece, luego se ablanda y luego se endurece nuevamente, lo que ocurriría si $F_{dr1} < F_{f4}$. El rodamiento se endurecería al entrar en contacto con el limitador de desplazamiento de la superficie 1, suavizándose cuando el deslizamiento comience en la superficie 4, para luego volverse a poner rígido al entrar en contacto con el control deslizante de la superficie 4 (Fenz & Constantinou, 2008b).

2.6. Relaciones Fuerza – Desplazamiento de un Aislador TPF

En este literal se demuestra cómo se deriva la relación Fuerza -Desplazamiento para un aislador de configuración estándar tipo TPF. Para este análisis, se asume que:

$$\mathbf{R}_{eff2} = \mathbf{R}_{eff3} \ll \mathbf{R}_{eff1} = \mathbf{R}_{eff4} \quad (\text{a})$$

$$\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 < \mu_4 \quad (\text{b})$$

$$d_2 > (\mu_1 - \mu_2)R_{eff2} \quad \text{y} \quad d_3 > (\mu_4 - \mu_3)R_{eff3} \quad \text{así que} \quad (c)$$

$$F_{f1} < F_{dr2} \quad \text{y} \quad F_{f4} < F_{dr3}$$

$$F_{f4} < F_{dr1} \quad (d)$$

2.6.1. Régimen Deslizante I

Este régimen consiste en el análisis del deslizamiento en las superficies 2 y 3, sin que el mismo avance a las superficies 1 y 4, para lo cual, el movimiento comienza desde el reposo, cuando la fuerza horizontal, F , excede a la fuerza de fricción en la superficie (s) de menor fricción. Por lo tanto, el deslizamiento comienza en las superficies 2 y 3 cuando $F = F_{f2} = F_{f3}$. Las formas desplazadas y diagramas de cuerpo libre (DCL), de los componentes del aislador durante este régimen se muestran en la *Figura 10*. En los diagramas de cuerpo libre, F_{fi} es la fuerza de fricción resultante que actúa a lo largo de la i th interfaz deslizante y S_i es la fuerza resultante de la presión normal que actúa a lo largo de la i th interface de deslizamiento.

En base al DCL III de la *Figura 10* (b), se obtienen las siguientes relaciones considerando el equilibrio en las direcciones vertical y horizontal, respectivamente:

$$S_1 + F_{f2} \sin \theta_2 - S_2 \cos \theta_2 = 0 \quad (6)$$

$$F_{f2} \cos \theta_2 + S_2 \sin \theta_2 - F_{f1} = 0 \quad (7)$$

También, del DCL IV de la *Figura 10* (b):

$$F = F_{f1} \quad (8)$$

$$W = S_1 \quad (9)$$

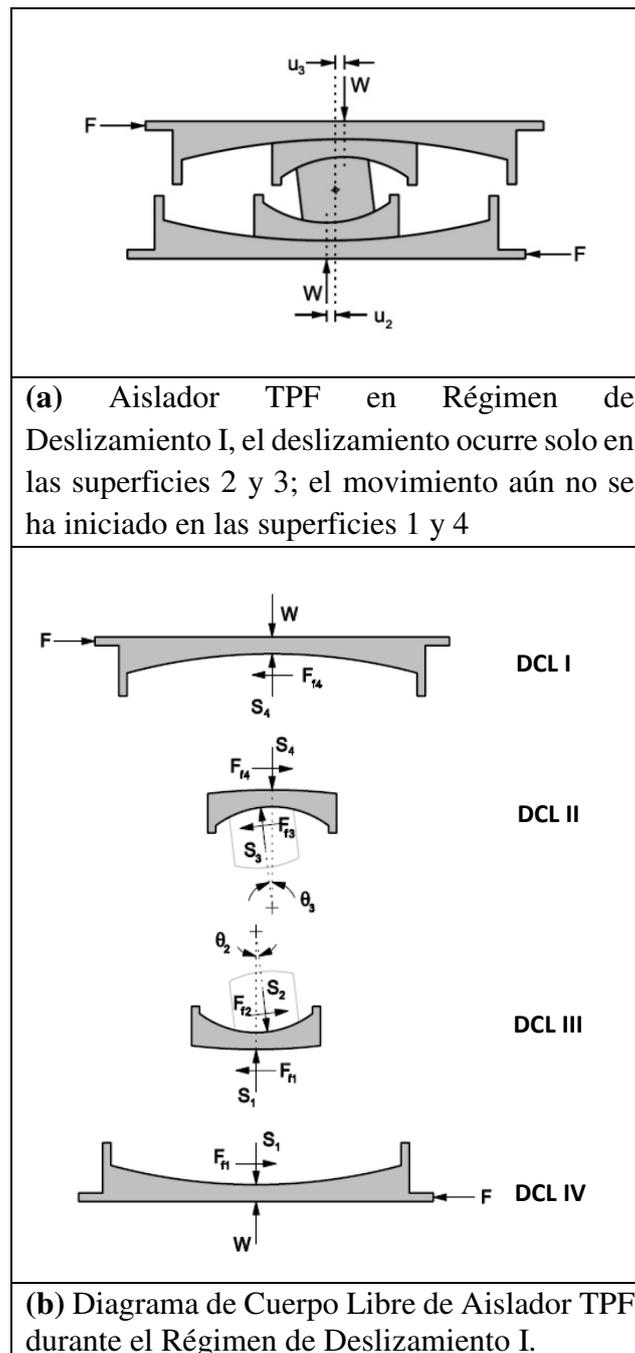


Figura 10 Aislador Tipo TPF en Régimen de Deslizamiento I, (Diagrama de Cuerpo Libre).

Fuente: (Fenz & Constantinou, 2008b)

De la geometría, se depende que el desplazamiento relativo del control deslizante en la superficie 2, u_2 , es:

$$u_2 = R_{eff2} \sin \theta_2 \quad (10)$$

Sustituyendo las ecuaciones (6) y (7) en la (10), y asumiendo que el desplazamiento relativo u_2 es suficientemente pequeño comparado con el radio efectivo R_{eff2} para que $\cos \theta_2 \approx 1$:

$$F = \frac{W}{R_{eff2}} u_2 + F_{f2} \quad (11)$$

Las ecuaciones (6), (7) y (11) son las ecuaciones de equilibrio para el aislador sencillo y convencional FP. Un análisis similar del equilibrio esquematizado en el DCL I y DCL II proporciona la siguiente ecuación para la superficie 3:

$$F = \frac{W}{R_{eff3}} u_3 + F_{f3} \quad (12)$$

La relación Fuerza - Desplazamiento Total para el aislador durante el régimen de deslizamiento I está determinada por la combinación de las ecuaciones (11) y (12) basadas en el hecho de que el desplazamiento total u es la suma de los desplazamientos u_2 y u_3 ; como $u_1 = u_4 = 0$, que resulta en:

$$F = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff3}} u + \frac{F_{f2}R_{eff2} + F_{f3}R_{eff3}}{R_{eff2} + R_{eff3}} \quad (13)$$

Tras la inversión del movimiento, el aislador se descarga por $2F_{f2}(= 2F_{f3})$ y el deslizamiento se inicia de nuevo en las superficies 2 y 3. Como se muestra en la *Figura 11*, el comportamiento histerético es rígido lineal con rigidez post-elástica igual a la suma de los radios efectivos de las superficies 2 y 3 y la fuerza igual a la media de los coeficientes de fricción en estas dos superficies. El comportamiento es idéntico a un aislador doble FP, con superficies cóncavas de radios y fricciones iguales.

2.6.2. Régimen Deslizante II

Cuando $F = F_{f1}$, el movimiento comienza en la superficie 1, marcando el inicio del Régimen de Deslizamiento II. La transición se produce en el desplazamiento u^* , dado por:

$$u^* = (\mu_1 - \mu_2)R_{eff2} + (\mu_1 - \mu_3)R_{eff3} \quad (14)$$

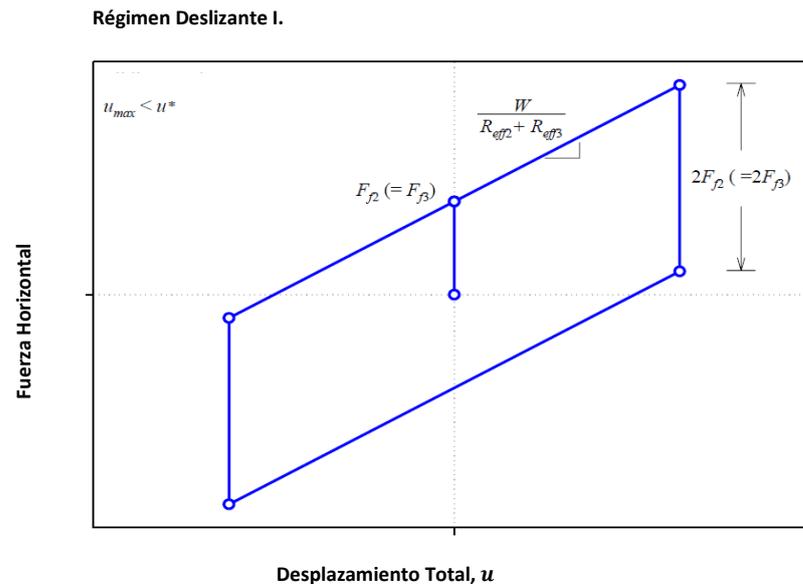


Figura 11 Relación Fuerza – Desplazamiento del Aislador TPF durante el Régimen de Deslizamiento I.

Fuente: (Fenz & Constantinou, 2008b)

La ecuación (14), se obtiene al resolver la ecuación (13) para el desplazamiento cuando $F = F_{f1}$. La forma desplazada y los diagramas de cuerpo libre para el Régimen de Deslizamiento II, se muestran en la *Figura 12*. La rotación de la placa deslizante inferior con respecto a la placa cóncava inferior es θ_1 y la rotación del control deslizante rígido con respecto a la placa de deslizamiento inferior es θ_2 . Cuando los ángulos se definen de esta manera, los desplazamientos relativos u_1 y u_2 son:

$$u_1 = R_{eff1} \sin \theta_1 \quad (15)$$

$$u_2 = R_{eff2} \sin \theta_2 \quad (16)$$

A partir del DCL IV de la Figura 12 (b), las ecuaciones de equilibrio para el aislador FP convencional son obtenidas en base a la siguiente relación que gobierna el movimiento en la superficie 1:

$$F = \frac{W}{R_{eff1}} u_1 + F_{f1} \quad (17)$$

Aunque pequeña en magnitud, la rotación de la placa deslizante inferior cuando se desliza, se produce en la superficie 1 y tiene un impacto significativo en el comportamiento. El ángulo que el deslizador rígido hace con respecto a la dirección vertical es ahora la suma de los ángulos θ_1 y θ_2 , como se refleja en las ecuaciones de equilibrio del DCL III de la Figura 12 (b):

$$S_1 \cos \theta_2 + F_{f2} \sin(\theta_1 + \theta_2) - S_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) - F_{f1} \sin \theta_1 = 0 \quad (18)$$

$$S_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + F_{f2} \cos(\theta_1 + \theta_2) - S_1 \sin \theta_1 - F_{f1} \cos \theta_1 = 0 \quad (19)$$

Usando las ecuaciones (15), (16) y (18), (19) y asumiendo que los ángulos individuales θ_1 y θ_2 son pequeños, se tiene que $\cos \theta_1 \approx \cos \theta_2 \approx 1$ y $\sin \theta_1 \times \sin \theta_2 \approx 0$, para la superficie 2 se encuentra que:

$$F = W \left(\frac{u_1}{R_{eff1}} + \frac{u_2}{R_{eff2}} \right) + F_{f2} \quad (20)$$

Sustituyendo la Ecuación (17) en la Ecuación (20), se tiene que:

$$u_2 = (\mu_1 - \mu_2) R_{eff2} \quad (21)$$

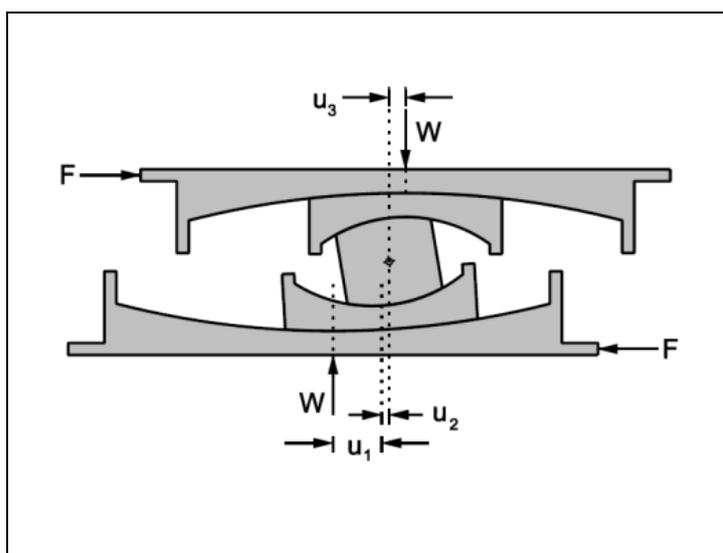
La ecuación (21) revela que el desplazamiento en la superficie 2 es constante con una magnitud igual a la del valor u_2 cuando el movimiento pasa del régimen deslizante I al régimen deslizante II (Solución dada en la ecuación (5) para u_2 con $F = F_{f1}$). Esto

significa que el movimiento instantáneo comienza en la superficie 1 y se detiene en la superficie 2.

La inspección a los DCL I y DCL II de la Figura 12 (b) muestra que no hay cambios desde el DCL I y DCL II de la Figura 11 (b), excepto que el ángulo θ_3 es mayor debido al aumento del desplazamiento u_3 . Por lo tanto, no hay deslizamiento en la superficie 4 y el movimiento en la superficie 3 todavía se rige por la ecuación (12). La relación Fuerza - Desplazamiento total para el régimen deslizante II determinada en base a las ecuaciones (12), (17) y (20) es:

$$F = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff3}} u + \frac{F_{f1}(R_{eff1} - R_{eff2}) + F_{f2}R_{eff2} + F_{f3}R_{eff3}}{R_{eff1} + R_{eff3}} \quad (22)$$

Esta relación se muestra en la Figura 13. Tras la inversión del movimiento, el aislador se descarga por $2F_{f2}(= 2F_{f3})$ y el movimiento se reanuda en las superficies 2 y 3. El movimiento continúa en las superficies 2 y 3 para una distancia de $2u^*$ hasta que el aislador se haya descargado por $2F_{f1}$, momento en el que el deslizamiento comienza de nuevo en la superficie 1 y se detiene en la superficie 2.



(a) Aislador TPF en Régimen de Deslizamiento II, el deslizamiento ocurre en las superficies 1 y 3, el movimiento aún no se ha iniciado en la superficie 4, y hay desplazamiento constante en la superficie 2.

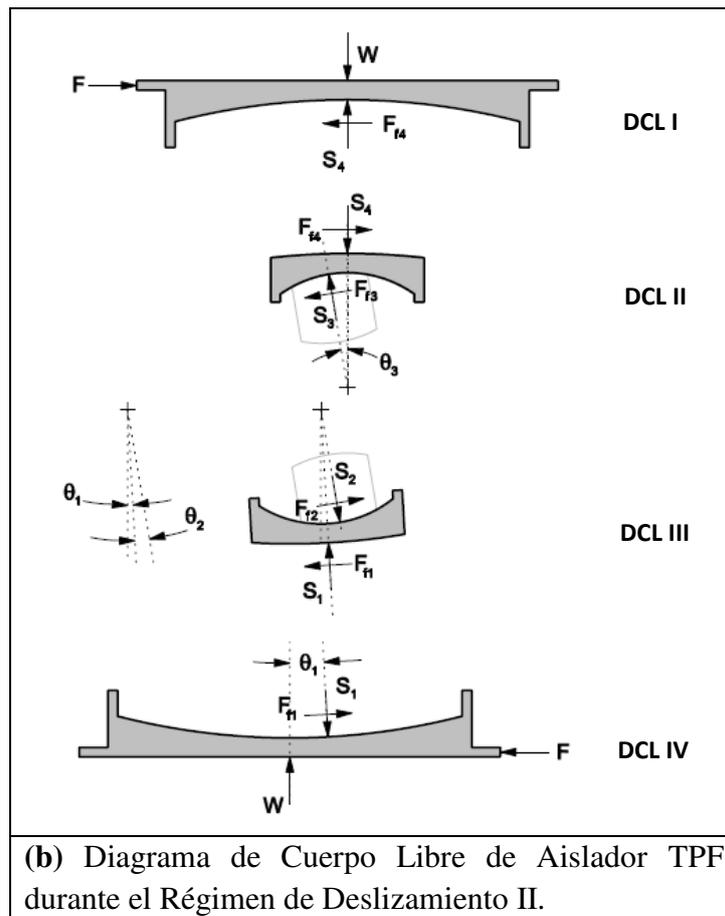


Figura 12 Aislador Tipo TPF en Régimen de Deslizamiento II, (Diagrama de Cuerpo Libre).

Fuente: (Fenz & Constantinou, 2008b)

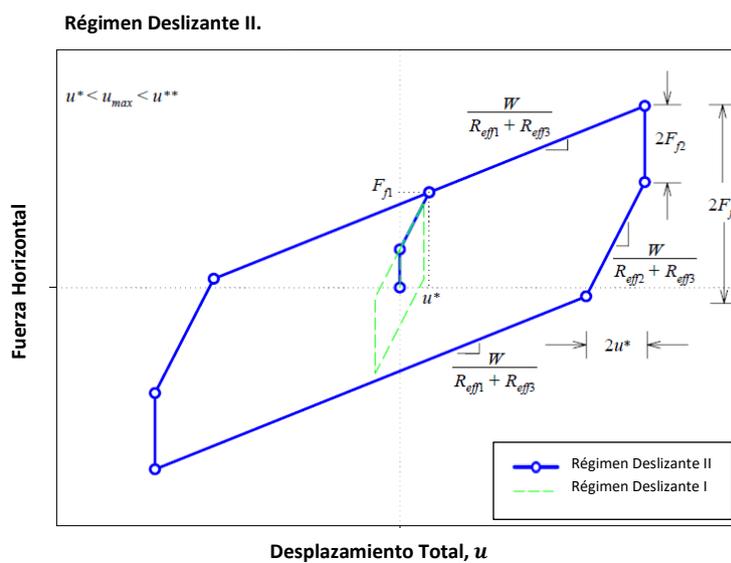


Figura 13 Relación Fuerza - Desplazamiento del Aislador TPF durante el Régimen de deslizamiento II en relación con el Régimen de Deslizamiento I.

Fuente: (Fenz & Constantinou, 2008b)

El deslizamiento continúa en las superficies 1 y 3. En comparación con el régimen de deslizamiento I, la transición al régimen de deslizamiento II va acompañada de una reducción de la rigidez y un aumento de la fricción efectiva.

2.6.3. Régimen Deslizante III

El deslizamiento inicia en la superficie 4 cuando $F = F_{f4}$, ocurriendo el desplazamiento u^{**} dado por:

$$u^{**} = u^* + (\mu_4 - \mu_1)(R_{eff1} + R_{eff3}) \quad (23)$$

La ecuación (23) se obtiene al resolver la ecuación (22) para el desplazamiento cuando $F = F_{f4}$. Los desplazamientos u_1 y u_2 y los ángulos θ_1 y θ_2 se definen como antes; la rotación de la placa deslizante superior con respecto a la placa cóncava superior es θ_4 ; y la rotación de la placa deslizante superior con respecto al control deslizante rígido es θ_3 . Cuando los ángulos se definen de esta manera, los desplazamientos relativos u_3 y u_4 son:

$$u_3 = R_{eff3} \sin \theta_3 \quad (24)$$

$$u_4 = R_{eff4} \sin \theta_4 \quad (25)$$

El movimiento en la superficie 1 todavía se rige por la ecuación (17) y el movimiento en la superficie 2 todavía se rige por la ecuación (20). De un análisis de equilibrio similar al que se llevó a cabo para el DCL III y el DCL IV de la Figura 12 (b), se deduce que para la superficie 4:

$$F = \frac{W}{R_{eff4}} + F_{f4} \quad (26)$$

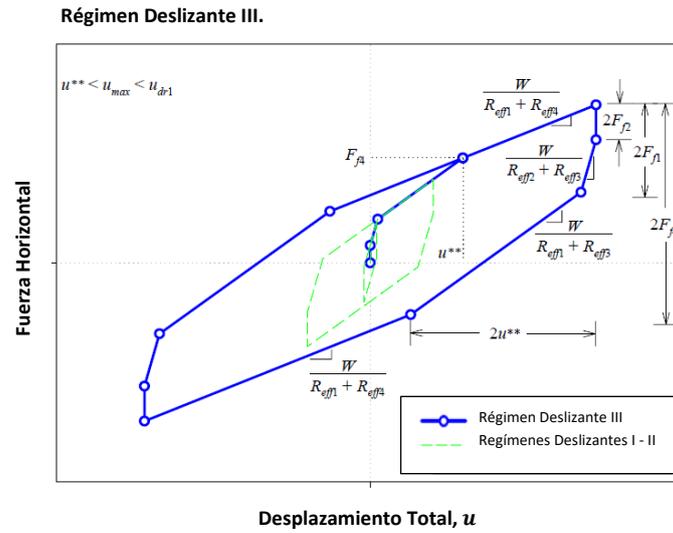


Figura 14 Relación Fuerza - Desplazamiento del Aislador TPF, durante el Régimen Deslizante III en relación con los Regímenes Deslizantes I-II.

Fuente: (Fenz & Constantinou, 2008b)

Y para la superficie 3:

$$F = W \left(\frac{u_3}{R_{eff3}} + \frac{u_4}{R_{eff4}} \right) + F_{f3} \quad (27)$$

$$u_3 = (\mu_4 - \mu_3) R_{eff3} \quad (28)$$

La ecuación (28) demuestra que tan pronto como el deslizamiento comienza en la superficie 4, se detiene en la superficie 3. Esto se puede probar resolviendo la ecuación (12) para u_3 con $F = F_{f4}$. La relación Fuerza - Desplazamiento Total para el Régimen Deslizante III, determinado combinando las ecuaciones (17), (20), (26) y (27), es:

$$F = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff4}} u + \frac{F_{f1}(R_{eff1} - R_{eff2}) + F_{f2}R_{eff2} + F_{f3}R_{eff3} + F_{f4}(R_{eff4} - R_{eff3})}{R_{eff1} + R_{eff4}} \quad (29)$$

Esta relación se muestra en la *Figura 14*. En comparación con los regímenes I y II, la transición de deslizamiento del régimen III se acompaña de una reducción de la rigidez y un aumento de la fricción efectiva. Cuando el movimiento se invierte, el aislador se descarga en $2F_{f2} (= 2F_{f3})$ y el deslizamiento se reanuda en las superficies 2 y 3.

El movimiento continúa en las superficies 2 y 3 para una distancia de $2u^*$ hasta que el aislador se haya descargado por $2F_{f1}$, en cuyo punto el deslizamiento comienza en la superficie 1 y se detiene en la superficie 2. Desde este punto, el movimiento continúa en las superficies 1 y 3 para una distancia de $2u^{**} - 2u^*$ hasta que el aislador se haya descargado por $2F_{f4}$.

En este punto, el movimiento se reanuda en la superficie 4 (y se detiene en la superficie 3) deslizándose sobre las superficies 1 y 4.

2.6.4. Régimen Deslizante IV

El comportamiento de la rigidez del aislador TPF ante grandes desplazamientos, se logra al detener el movimiento en superficies con un gran radio efectivo, forzándolo a ocurrir en las superficies que poseen un radio efectivo pequeño. El régimen de deslizamiento IV comienza cuando el contacto se realiza con el limitador de desplazamiento en la superficie 1, cambiando los deslizamientos desde las superficies 1 y 4 a las superficies 2 y 4. El desplazamiento en la superficie 1 es $u_1 = d_1$ y la fuerza horizontal, F_{dr1} es:

$$F_{dr1} = \frac{W}{R_{eff1}} d_1 + F_{f1} \quad (30)$$

La transición entre regímenes deslizantes ocurre con un desplazamiento total de u_{dr1} , dado por:

$$u_{dr1} = u^{**} + d_1 \left(1 + \frac{R_{eff4}}{R_{eff1}} \right) - (\mu_4 - \mu_1)(R_{eff1} + R_{eff4}) \quad (31)$$

La ecuación (31) se obtiene resolviendo la ecuación (29) para u con $F = F_{dr1}$. La forma desplazada y los diagramas de cuerpo libre para el movimiento durante el régimen IV se dan en la *Figura 15*. En el DCL III y el DCL IV de la *Figura 15*, se muestra que el efecto del limitador de desplazamiento entra en contacto con el control deslizante en la superficie 1, lo cual se da para introducir una fuerza adicional en el control deslizante,

F_{r1} . Se supone que el limitador de desplazamiento es rígido, y por lo tanto en el DCL IV de la *Figura 15*, la relación Fuerza - Desplazamiento que rige el movimiento en la superficie 1 es:

$$F = \frac{W}{R_{eff1}} d_1 + F_{f1} + F_{r1} \quad (32)$$

La fuerza F_{r1} explica el hecho de que la fuerza horizontal F aumenta sin incremento en el desplazamiento de la superficie 1. En la *Figura 16*, la fuerza horizontal se traza contra el desplazamiento en la superficie i , que ilustra el significado de la fuerza F_{ri} . El comportamiento mostrado en la *Figura 16* fue demostrado en un estudio experimental original del aislador FP en la Universidad de Berkeley.

Usando el DCL III y el DCL IV de la *Figura 15* (b), podemos deducir que la relación fuerza - desplazamiento que gobierna el movimiento en la superficie 2 es:

$$F = W \left(\frac{d_1}{R_{eff1}} + \frac{u_2}{R_{eff2}} \right) + F_{f2} \quad (33)$$

Esto demuestra que el deslizamiento se reanuda en la superficie 2 cuando se establece contacto con el limitador de desplazamiento en la superficie 1. La ecuación (33) es simplemente la ecuación (20) con $u_1 = d_1$. Nada ha cambiado en la superficie superior, de modo que el movimiento en las superficies 3 y 4 todavía se rige por las ecuaciones (27) y (26), respectivamente. Por lo tanto, la relación fuerza - desplazamiento total es:

$$F = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff4}} (u - u_{dr1}) + \frac{W}{R_{eff1}} d_1 + F_{f1} \quad (34)$$

Esta relación se muestra en la *Figura 17*. Tras la inversión del movimiento, el aislador se descarga por $2F_{f2}$ ($= 2F_{f3}$) y el movimiento se reanuda en las superficies 2 y 3. Como se muestra en la *Figura 16*, después que el control deslizante contacta el limitador de desplazamiento en la superficie 1, el movimiento no comenzará en esta superficie hasta que el aislador haya sido descargado por $F_{r1} + 2F_{f1}$ a $F_{dr1} - 2F_{f1}$.

El deslizamiento se reanuda en la superficie 4 cuando el aislador ha descargado por $2F_{f4}$. El orden en que se reanuda el deslizamiento se determina comparando las cantidades $F_{r1} + 2F_{f1}$ y $2F_{f4}$. Se puede demostrar que para el régimen deslizante IV, la magnitud del desplazamiento total máximo, u_{max} , satisface la siguiente relación:

$$u_{max} > u_{dr1} + 2(\mu_4 - \mu_1)(R_{eff2} + R_{eff4}) \quad (35)$$

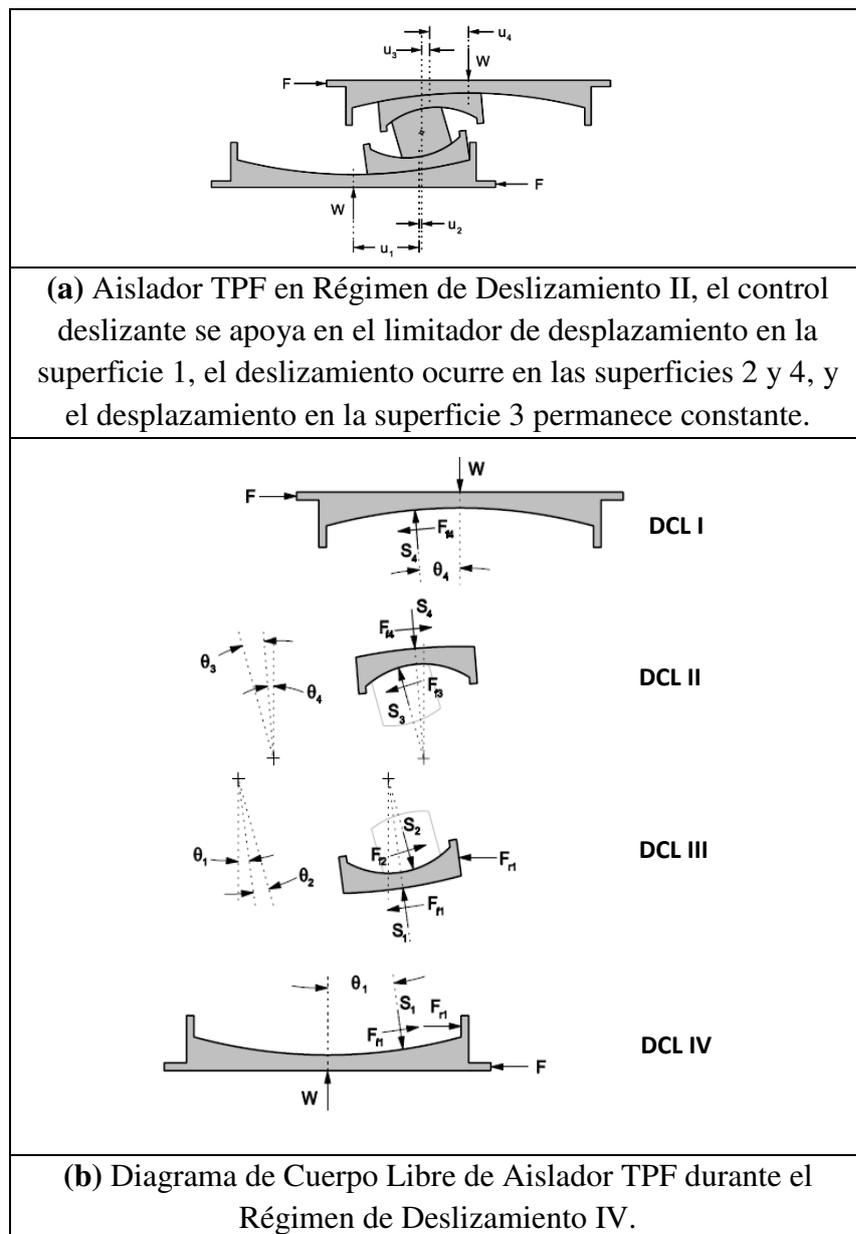


Figura 15 Aislador Tipo TPF en Régimen de Deslizamiento IV, (Diagrama de Cuerpo Libre).

Fuente:(Fenz & Constantinou, 2008b)

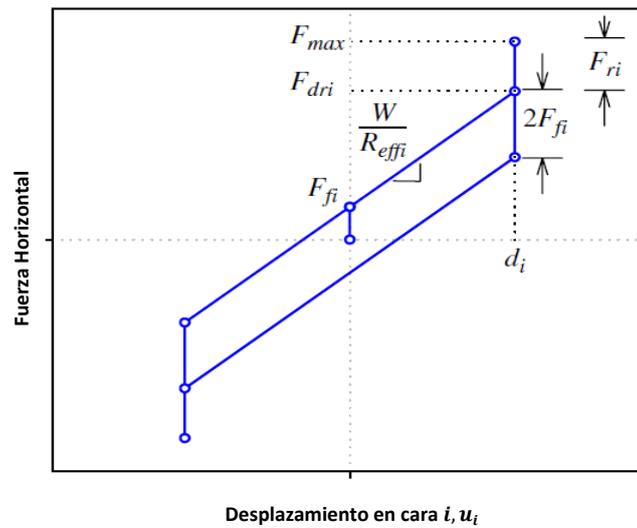


Figura 16 Relación Fuerza - Desplazamiento para una sola superficie cóncava cuando el control deslizante entra en contacto con el limitador de desplazamiento.

Fuente: (Fenz & Constantinou, 2008b)

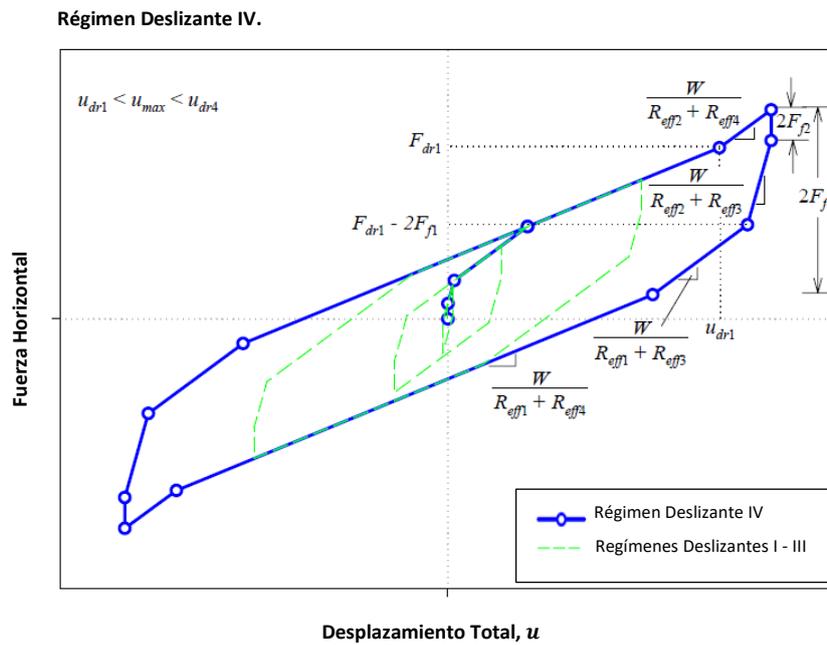


Figura 17 Relación entre la Fuerza y el Desplazamiento del Aislador TPF durante el Régimen de Deslizamiento IV que se muestra en relación con los regímenes deslizantes I-III.

Fuente: (Fenz & Constantinou, 2008b)

Luego de la descarga, el movimiento se iniciará en la superficie 4 antes de la superficie 1 ($2F_{f4} < F_{r1} + 2F_{f1}$). Si la ecuación (35) no se cumple, el movimiento se

iniciará en la superficie 1 antes de la superficie 4 ($F_{r1} + 2F_{f1} < 2F_{f4}$). Esto demuestra que es posible tener diferentes tipos de comportamiento de descarga dependiendo del desplazamiento máximo alcanzado. Sin embargo, basado en la ecuación (37) que sigue, uno puede mostrar que para la configuración típica con $d_1 = d_4$ y $R_{eff1} = R_{eff4}$, la ecuación (35) no puede estar satisfecha antes del inicio del régimen deslizante V. Por lo tanto, el movimiento se reanuda en la superficie 1 antes de la superficie 4 para la configuración típica del aislador TPF.

2.6.5. Régimen Deslizante V

El régimen de deslizamiento V comienza cuando se establece contacto con el limitador de desplazamiento en la superficie 4. Los cambios de movimiento desde el deslizamiento en las superficies 2 y 4 hasta el deslizamiento en las superficies 2 y 3, están acompañados por una mayor rigidez. En el punto de transición, el desplazamiento relativo en la superficie 4 es $u_4 = d_4$ y la fuerza horizontal, F_{dr4} , es:

$$F_{dr4} = \frac{W}{R_{eff4}} d_4 + F_{f4} \quad (36)$$

La transición entre regímenes deslizantes ocurre con un desplazamiento total de u_{dr4} , dado por:

$$u_{dr4} = u_{dr1} + \left[\left(\frac{d_4}{R_{eff4}} + \mu_4 \right) - \left(\frac{d_1}{R_{eff1}} + \mu_1 \right) \right] (R_{eff2} + R_{eff4}) \quad (37)$$

De un análisis de equilibrio similar al que se hizo para DCL III y DCL IV de la *Figura 15* (b), se sigue el mismo procedimiento para la superficie 4:

$$F = \frac{W}{R_{eff4}} d_4 + F_{f4} + F_{r4} \quad (38)$$

y para la superficie 3:

$$F = W \left(\frac{d_4}{R_{eff4}} + \frac{u_3}{R_{eff3}} \right) + F_{f3} \quad (39)$$

El movimiento continúa en la superficie 2 con la placa deslizante sobre el limitador de desplazamiento de la superficie 1.

La combinación de las relaciones fuerza - desplazamiento para las superficies 1-4 viene dada por:

$$F = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff3}} (u - u_{dr4}) + \frac{W}{R_{eff4}} d_4 + F_{f4} \quad (40)$$

Esto se muestra en la *Figura 18*. Cuando el movimiento se invierte, el aislador se descargará en $2F_{f2} (= 2F_{f3})$ y el deslizamiento ocurrirá inicialmente en las superficies 2 y 3. El movimiento se reanuda en la superficie 1 cuando el aislador se descarga a $F_{dr1} - 2F_{f1}$, y el movimiento se reanuda en la superficie 4 cuando el aislador se descarga a $F_{dr4} - 2F_{f4}$. Dado que el primero es más grande que el último (asumiendo la configuración estándar), se iniciará el deslizamiento en la superficie 1 antes de la superficie 4 cuando se descarga desde $u_{max} > u_{dr4}$.

2.6.6. Comentarios Adicionales

(a) Para la configuración estándar del aislador TPF que se ha descrito en este capítulo, las fuerzas F_{dr2} y F_{dr3} calculadas usando la ecuación (5) no son en realidad las fuerzas a las que el control deslizante contacta con el limitador de desplazamiento en las superficies 2 y 3. Esto es porque el movimiento en estas superficies se interrumpe cuando se inicia el deslizamiento en las superficies 1 y 4, respectivamente. Basado en la ecuación (33), la fuerza real a la que el deslizador hace contacto con el limitador de desplazamiento de la superficie 2 es:

$$F = W \left(\frac{d_1}{R_{eff1}} + \frac{d_2}{R_{eff2}} \right) + F_{f2} \quad (41)$$

Se puede derivar una expresión similar basada en la ecuación (39) para la superficie 3. Las fuerzas F_{dr2} y F_{dr3} son las fuerzas a las que el control deslizante entraría en contacto con el limitador de desplazamiento si el deslizamiento todavía no se iniciara en las superficies 1 y 4. Aunque no son físicamente significativas, se utilizan para verificar la secuencia de regímenes.

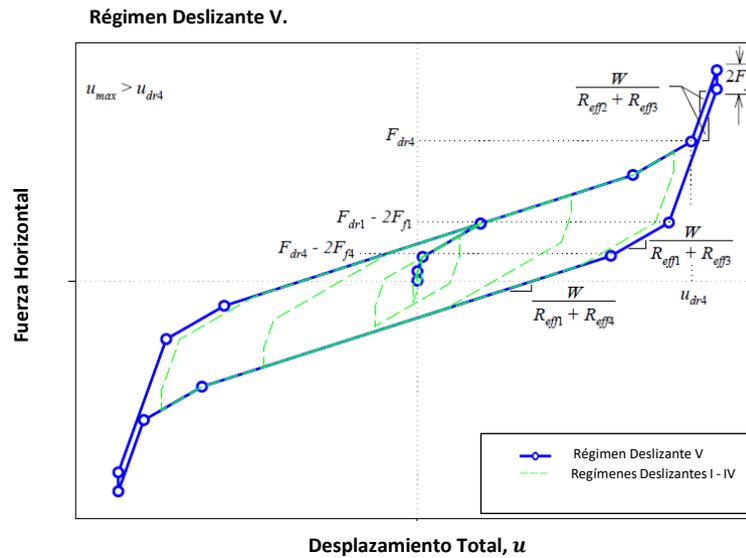


Figura 18 Relación Fuerza - Desplazamiento del aislador TPF durante el Régimen de Deslizamiento V que se muestra en relación con los Regímenes Deslizantes I-IV.

Fuente: (Fenz & Constantinou, 2008b)

(b) Aunque el coeficiente de fricción, μ_i , aparece como un parámetro de valor único en las expresiones a lo largo de este capítulo, en realidad varía en función de varios factores, incluida la velocidad de deslizamiento y presión. El coeficiente de fricción de un solo valor es una simplificación, no una limitación de la teoría. Cuando se requiere el modelado de la dependencia de la velocidad, las ecuaciones se usan de la misma forma con $\mu_i(\dot{u}_i)$, un coeficiente de fricción que se actualiza en cada paso de tiempo en función de la velocidad instantánea de deslizamiento de la superficie i .

(c) El punto de pivote es el punto sobre el que gira el deslizador articulado. En aisladores FP sencillos y dobles, solo hay una articulación en el control deslizante. La rotación está físicamente restringida para que suceda sobre el centro de la esfera definida por la articulación esférica. En el aislador TPF, no existe tal restricción mecánica que define la ubicación del punto de pivote. En cambio, el pivote corresponde al centro instantáneo de velocidad rotacional cero del conjunto deslizante, que no es un punto

fijo. En la mayoría de los casos, se introduce un pequeño error al asumir el centro de la velocidad de rotación cero, por lo que se fija a la altura media del conjunto deslizando articulado.

(d) En trabajos relacionados sobre el Aislador DPF, se observa que el control deslizando se compensa dentro del aislador durante ensayos de armónicos controlados por desplazamiento cuando la fricción es diferente en las superficies superiores e inferiores. En los desplazamientos totales iguales a cero, los desplazamientos individuales en cada superficie son iguales y opuestos. El mismo fenómeno ocurre en el aislador TPF. La compensación se produce porque el coeficiente de fricción efectivo (la Fuerza Horizontal Normalizada a cero desplazamientos totales) es diferente de los coeficientes de fricción en las superficies individuales (la fuerza horizontal normalizada en el desplazamiento relativo cero). Expresiones explícitas para las compensaciones individuales no están incluidas en este trabajo, sin embargo, se pueden determinar siguiendo los ciclos de histéresis. Los desplazamientos están relacionados con las pruebas controladas por desplazamiento y son diferentes del fenómeno de los desplazamientos totales permanentes al final de la excitación sísmica.

2.7. Síntesis de los Regímenes de Deslizamiento del Aislador TPF

Régimen	Descripción	Relación Fuerza - Desplazamiento
	I Deslizamiento solo en las superficies 2 y 3	$F = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff3}} u + \frac{F_{f2} R_{eff2} + F_{f3} R_{eff3}}{R_{eff2} + R_{eff3}}$ <p>Válido hasta: $F = F_{f1}$, $u = u^* = (\mu_1 - \mu_2) R_{eff2} + (\mu_1 - \mu_3) R_{eff3}$</p>
	II El movimiento se detiene en la superficie 2; deslizamiento en las superficies 1 y 3.	$F = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff3}} u + \frac{F_{f1}(R_{eff1} - R_{eff2}) + F_{f2} R_{eff2} + F_{f3} R_{eff3}}{R_{eff1} + R_{eff3}}$ <p>Válido hasta: $F = F_{f4}$, $u = u^{**} = u^* + (\mu_4 - \mu_1)(R_{eff1} + R_{eff3})$</p>
	III El movimiento se detiene en las superficies 2 y 3; deslizamiento en las superficies 1 y 4.	$F = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff4}} u + \frac{F_{f1}(R_{eff1} - R_{eff2}) + F_{f2} R_{eff2} + F_{f3} R_{eff3} + F_{f4}(R_{eff4} - R_{eff3})}{R_{eff1} + R_{eff4}}$ <p>Válido hasta: $F = F_{dr1} = \frac{W}{R_{eff1}} d_1 + F_{f1}$, $u = u_{dr1} = u^{**} + d_1 \left(1 + \frac{R_{eff4}}{R_{eff1}} \right) - (\mu_4 - \mu_1)(R_{eff1} + R_{eff4})$</p>
	IV El control deslizante hace contacto con el limitador en la superficie 1; El movimiento permanece detenido en la superficie 3; Deslizamiento en la superficie 2 y 4.	$F = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff4}} (u - u_{dr1}) + \frac{W}{R_{eff1}} d_1 + F_{f1}$ <p>Válido hasta: $F = F_{dr4} = \frac{W}{R_{eff4}} d_4 + F_{f4}$, $u = u_{dr4} = u_{dr1} + \left[\left(\frac{d_4}{R_{eff4}} + \mu_4 \right) - \left(\frac{d_1}{R_{eff1}} + \mu_1 \right) \right] (R_{eff2} + R_{eff4})$</p>
	V El control deslizante se apoya en el dispositivo de retención de la superficie 1 y 4; deslizamiento en las superficies 2 y 3.	$F = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff3}} (u - u_{dr4}) + \frac{W}{R_{eff4}} d_4 + F_{f4}$

Suposiciones: (1) $R_{eff1} = R_{eff4} \gg R_{eff2} = R_{eff3}$, (2) $\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 < \mu_4$, (3) $d_1 > (\mu_4 - \mu_1) R_{eff1}$, (4), $d_2 > (\mu_1 - \mu_2) R_{eff2}$
(5) $d_3 > (\mu_4 - \mu_3) R_{eff3}$

Figura 19 Resumen del comportamiento del Aislador TPF

Fuente: (Daniel M Fenz & Michalakis C Constantinou, 2006)

2.8. Resumen

En este capítulo se destacó el sistema de funcionamiento de los aisladores de base tipo TPF, analizando su comportamiento en cada una de las fases y parámetros que determinan su esencia, empleando principios físicos estáticos y dinámicos que deducen ecuaciones que permiten llegar al análisis histerético fuerza – desplazamiento. La efectividad de estos sistemas ha sido demostrada ante eventos que han ocurrido en Nueva Zelanda, Japón, Italia, Chile y Ecuador.

Además, se presentó los tres principios fundamentales para considerar en el diseño de sistemas de aislamiento sísmico: disipación de energía, rigidez bajo niveles de carga de servicio bajos y estabilidad del sistema.

En el siguiente capítulo se presentará las evidencias de daño en los aisladores de la Pila No. 12, en donde es importante analizar la relación existente entre los suelos de cimentación y la estructura. Al comparar estas evidencias y el vínculo existente con el aislamiento sísmico empleado, se determina la implicación existente entre los mayores desplazamientos y el tipo de suelo determinado.

CAPÍTULO III

EVIDENCIA DEL COMPORTAMIENTO DE LOS AISLADORES DE LA PILA No. 12 Y ESTADO DEL PUENTE “LOS CARAS”

3.1. Introducción

El presente capítulo muestra las evidencias del comportamiento del puente “Los Caras” después del sismo del 16 de abril de 2016; el cual permaneció funcional durante y después de este evento sísmico. En este sentido, se presentan las características del suelo de cimentación, incluyendo el comportamiento del suelo del estuario del río Chone.

Además, se resume el comportamiento general de las 38 pilas que se encuentran ubicadas bajo el estuario del Río Chone, de las 48 existentes en el puente, para realizar un análisis específico de la pila No. 12; la cual presentó los mayores desplazamientos laterales de los previstos en los modelos analíticos y de interacción computacional usados para el diseño del puente.

Se describe de manera global cómo los aisladores y las pilas mostraron desplazamientos similares, menores como en el caso de las pilas de los primeros tramos del puente por ejemplo la pila No. 6 o en algunos casos mayores al previsto en el diseño como es el caso de la pila No.12.

3.2. Evidencias

El CEE, como institución responsable de la construcción del puente “Los Caras”, ha monitoreado el desempeño de la superestructura con el personal técnico que estuvo involucrado en el diseño, construcción y ahora mantenimiento del puente.

Según el Ingeniero Marcelo Romo, miembro del equipo técnico del CEE para la inspección técnica del Puente “Los Caras”, después del sismo de abril 2016, las aceleraciones pico en roca en el puente, durante el sismo manifestado anteriormente, fueron de hasta 0,40 gravedades (PRA) para un periodo de recurrencia del sismo de 475 años, correspondiente al sismo básico de diseño (DBE). El desplazamiento esperado en los aisladores sísmicos nuevos, para el sismo de diseño fue de 26 cm, sin considerar reducción

de la fuerza sísmica. Esta característica es una de las condiciones importantes de diseño, ya que son parte de la estructura de hormigón armado y trabajan en conjunto con las pilas en las cuales se soportan estos aisladores.

De acuerdo con el monitoreo y las inspecciones por parte del personal técnico del CEE, se muestra que las pilas evidenciaron un comportamiento relativamente uniforme en el terremoto, a excepción de la pila No. 12 y las adyacentes, en donde los aisladores muestran los mayores desplazamientos laterales. En la *Figura 20*, se presenta la distribución de las 48 pilas y el número a partir del Acceso a Bahía de Caráquez para la ubicación general de la presente investigación.

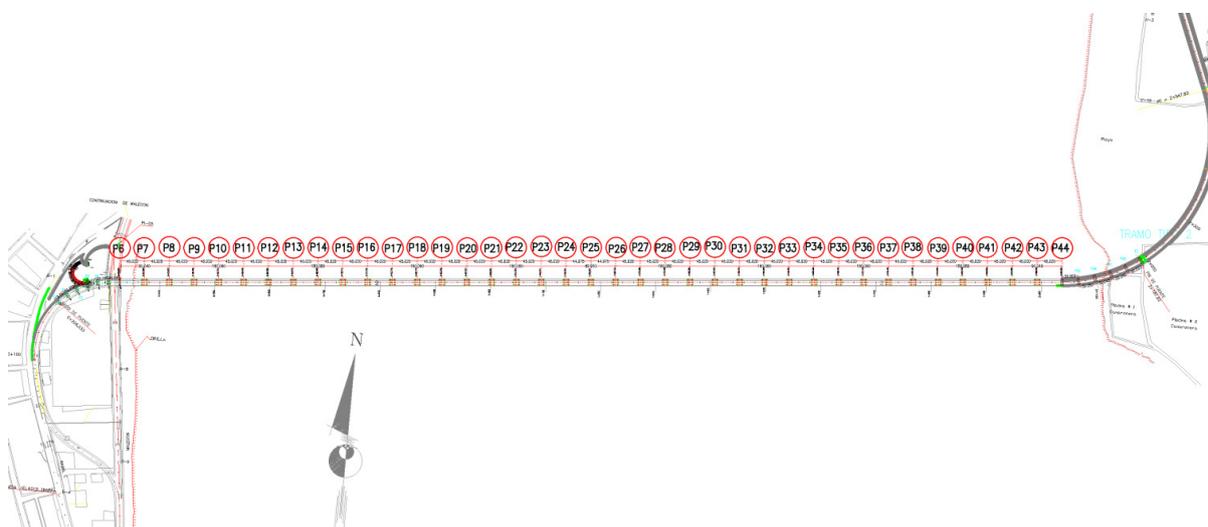


Figura 20 Distribución de las Pilas existentes en el Puente “Los Caras”

Fuente: (C.E.E., 2008)

Las evidencias anteriores se suman a la inspección específica, determinando que el apoyo hacia la cara lateral del puente, en la dirección Sur – Norte, muestra una deformación lateral mayor en aproximadamente un 50%. La pila No. 12 fue la única que mostró desplazamientos mayores, de acuerdo con los registros fotográficos y la información proporcionada por el Ing. Marcelo Romo. Los sistemas de aislamiento mostraron daños, debido a que las diferencias de desplazamiento promedio estaban en el rango de 15 cm en dirección norte y 30 cm en dirección sur como se muestra en la *Figura 21*.

	
<p>(a) Cubierta externa de las pilas y estado actual de la pila No.12</p>	<p>(b) Estado actual del aislador TPF (1), de la pila No. 12, como parte del sistema de aislamiento del Puente “Los Caras”.</p>
	
<p>(c) Vista interna del desplazamiento del aislador No 1 de la pila No. 12 (GPS 0°36'33.58"S, 80°24'58.68"W). Fuente: Romo (2016)</p>	<p>(d) Estado actual de los aisladores No. 2 y 4 de la pila No. 12 del Puente “Los Caras”</p>
	
<p>(e) Estado Actual del aislador No. 1 de la Pila No. 12, con óxido en los pernos de anclaje</p>	<p>(f) Estado Actual del Aislador No. 2 de la Pila No. 12 con daño en la base de hormigón.</p>
	
<p>(g) Vista de Aislador No. 3 en inspección realizada</p>	<p>(h) Autor del presente trabajo, realizando la revisión de los Aisladores de la Pila No. 12</p>

Figura 21 Fotografías que sintetizan el comportamiento de los Regímenes de Deslizamiento del Aislador TPF

Como se observó en la *Figura 21* (h) la técnica de inspección visual fue uno de los principales métodos usados para evaluar y evidenciar posibles daños, así como también observar la condición general de la mayoría de los puentes (Phares, Rolander, Graybeal, & Washer, 2001).

De acuerdo con la información del personal técnico del CEE, que participó en el diseño cuando se realizó el modelo de análisis, se incluyeron dos escenarios para el diseño de las pilas y los aisladores sísmicos, en función de su comportamiento: Sismo Básico de Diseño (DBE) y Sismo Máximo Considerado (MCE), cumpliendo la normativa nacional e internacional vigente para el efecto.

En función de la demanda para esta superestructura, obtenida a través del estudio de peligrosidad sísmica de la zona, se estableció el diseño de los aisladores sísmicos con sus características y propiedades geométricas, a fin de testarlos en los laboratorios de la fábrica oferente y luego contrastar estos resultados con los obtenidos del análisis numérico de diseño. En base a estos ensayos se puede comparar, que el desplazamiento esperado para un sismo DBE, es de 35 cm; mientras que para un sismo MCE es de 52 cm.

En la curva de histéresis de diseño que se encuentra en la *Figura 22*, se puede visualizar el requerimiento de desplazamientos para los aisladores del Puente “Los Caras”. En el año 2008, esta curva fue enviada por parte de EPS y fue utilizada en el modelamiento estructural del Puente a través de la interacción suelo – estructura para un máximo desplazamiento de estos aisladores de 20,5plg (52cm). Sin embargo la fábrica remitió aisladores con un desplazamiento mayor de 23plg., como se observa en la *Figura 23*.

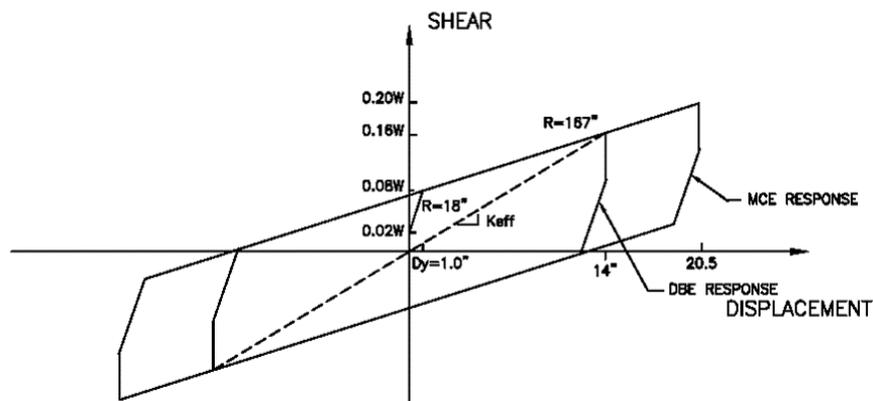


Figura 22 Curva de histéresis de las propiedades para el modelamiento estructural

Fuente: (L. M. Romo, 2008)

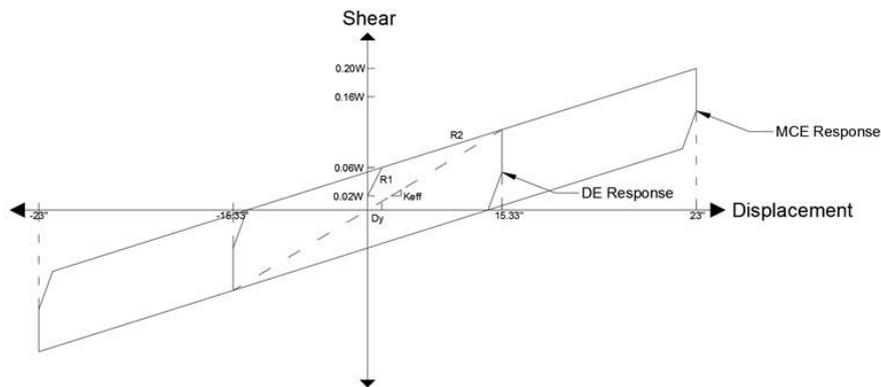


Figura 23 Curva de Histéresis de los aisladores fabricados por EPS para el sismo DBE y MCE

3.3. Desplazamientos medidos en los aisladores

La mayor aceleración que se produjo en el puente “Los Caras” durante el sismo de abril 2016, fue en la dirección transversal, esto produjo que un aislador de pila No.12 tenga el mayor desplazamiento de 52 cm como se puede apreciar en la *Figura 23* (M. Romo, 2016a). Es por esta razón que, de acuerdo a la investigación de las observaciones realizadas, se ha determinado que el desplazamiento máximo después del sismo de abril 2016, se dió en la Pila No.12; esto significa que de las 38 pilas que están directamente sobre el estuario del río Chone únicamente 01 pila tuvo el mayor desplazamiento, esto si deseamos presentar en porcentaje representa el 2.6% de las 38 pilas. (M. Romo, 2016a)

En la *Figura 24* (c) se puede apreciar cómo fue el comportamiento de los tramos del puente y cómo los aisladores trabajaron bajo la superestructura, dando así los desplazamientos mencionados.

<p>(a) Medidas del desplazamiento en el plato deslizante inferior del aislador No. 1 de la pila No.12 Fuente: (M. Romo, 2016a)</p>	<p>(b) Medidas del desplazamiento interno del plato cóncavo inferior del aislador No.1 de la pila No.12 Fuente: (M. Romo, 2016a)</p>



Figura 24 Fotografías que esbozan el estado de los aisladores luego del sismo del 16 de abril del 2016 e Imagen 3D que esquematiza el movimiento de la superestructura por el movimiento sísmico y la acción de los aisladores de la Pila No. 12

Existió poca diferencia en la medida de los desplazamientos de los 4 aisladores que existen en cada pila. Como se mencionó, mediante las inspecciones realizadas a los aisladores, la medida máxima de los desplazamientos en la dirección transversal durante el sismo del 16 de abril del 2016 se expone en la Tabla 1, de acuerdo a las pilas seleccionadas para el efecto:

Tabla 1

Máximo desplazamiento en los aisladores

Pilas	Máximo desplazamiento medido (cm)
Pila 10	31.5
Pila 12	52.0
Pila 44	31.5

Fuente: (M. Romo, 2016a)

De acuerdo a la observación de los datos de medición de los aisladores del puente, se podría considerar que después del sismo de abril 2016, la diferencia importante entre el mayor desplazamiento calculado para el diseño y el máximo desplazamiento relativo medido, ocurrió en la pila No. 12 (27.5 cm calculado y 52 cm medido) (M. Romo, 2016a).

La implementación de aisladores sísmicos como componentes que reduzcan los efectos de un sismo, integró otros mecanismos y soluciones constructivas para que se prevea un trabajo sincronizado, siendo así; el desplazamiento en los tramos del puente, se logró armonizar mediante la implementación de sincronizadores de movimiento y de un diseño óptimo de las juntas sísmicas que permitieron generar la independencia estructural de elementos, previsible con el diseño de los aisladores sísmicos; dividiendo al puente en tramos isostáticos que reduzcan la capacidad de generar momentos negativos en función de la demanda.

Estas juntas sísmicas, abarcaron conceptos estructurales de diseño como la dilatación de temperatura del hormigón, y otros fenómenos físicos que se producen generalmente por las propiedades de los materiales.

3.4. Diagnóstico del Problema de la Pila No.12

El puente “Los Caras”, se mantiene operativo después del sismo de abril de 2016, sin presentar ningún daño grave. Mientras más compleja sea la técnica constructiva y existan mayores elementos estructurales, mayor será el análisis de toda la estructura desde un punto de vista Geotécnico y Estructural.

Geotécnico, en vista que la estructura de la pila fue más flexible de lo que se esperó durante el diseño, debido a la falta de soporte lateral de las capas de suelo. La arena de licuefacción y las arcillas suaves no atrajeron suficiente soporte lateral a las pilas, esto se corrobora con el análisis inicial en la fase de diseño, en donde se consideró que el tipo de suelo predominante en este tramo es el resultado de depósitos aluviales, suelos granulares licuables, o la presencia de arcillas blandas con las características específicas detalladas anteriormente; lo cual obligó a usar pilotes de acero inoxidable generalmente construidos a base de tubos o secciones laminadas para que trabajen a través de la fricción con la arcilla. Este tipo de construcción fue ejecutada en las 38 pilas ubicadas bajo el agua, con diferente profundidad debido a las condiciones propias del suelo como se puede observar en la *Figura 25*.

Las pilas restantes se encuentran en suelo fijo, y comprenden los accesos principales de Bahía y San Vicente.

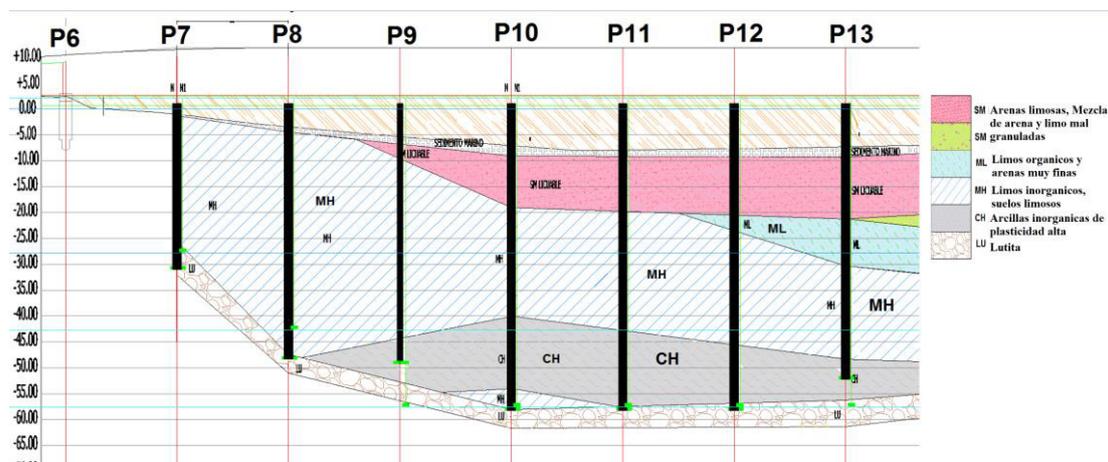


Figura 25 Esquema que permite visualizar el tipo de suelo en el sector de la Pila No. 12 del Puente “Los Caras”

Fuente: (M. Romo, 2016a)

Las pruebas de Standar Penetration Test (SPT) y las pruebas de caracterización del suelo realizadas, no fueron suficientes para describir el comportamiento del suelo de la base en la pila No.12 sometida a cargas sísmicas laterales, ya que los resultados de los estudios fueron desde un solo punto de perforación, y no desde el área lateral de apoyo de todas las pilas, considerando al elemento como un todo (M. Romo, 2016a).

Por otra parte, la base rocosa se encuentra a profundidades generalmente mayores de 100 metros. En la *Figura 26* se aprecia el estuario del río Chone donde está ubicado el puente “Los Caras” y la ubicación de la Pila No. 12

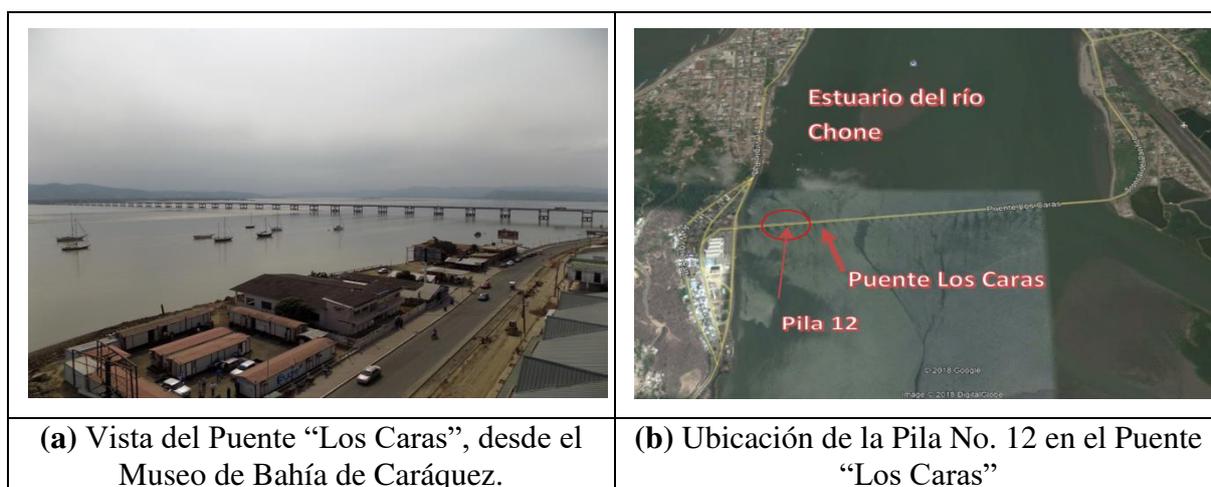


Figura 26 Vista del estuario del Río Chone y puente “Los Caras”.

Fuente: Google Earth

Desde el punto de vista estructural, se considera que tanto la superestructura que corresponde a vigas, capa de rodadura y juntas, así como la subestructura que corresponde a cabezal, pilas, zapata y pilotes; no experimentaron problemas estructurales mayores. Sin embargo, las juntas requirieron de un mantenimiento.

La estructura de la cimentación no sufrió un impacto significativo porque se diseñó con un factor de reducción de la fuerza sísmica de 1,1; lo que se considera como un factor de seguridad para trabajar en el rango elástico como inelástico.

Así mismo, para el análisis de la parte estructural, el tramo central del puente fue revisado integralmente por los técnicos del CEE durante 3 instancias:

- Después del sismo de abril, 2016, durante los 3 días que duró la inspección del puente, la posibilidad de un posible daño general de la estructura fue verificado, para asegurar que el puente pueda continuar en operación, sin restricciones.
- Al llegar a la tercera semana, cada uno de los aisladores había sido revisado internamente, para definir posibles reparaciones, encontrando que los 4 aisladores de la pila No. 12, habían alcanzado su máximo desplazamiento en relación a la capacidad de diseño.
- Al tercer mes, mientras se realizaba el mantenimiento a 148 aisladores de los 152 existentes (remoción de óxido y sal de las superficies deslizantes, reemplazo de las bandas de protección elastoméricas), se aprovechó para revisar al detalle cada elemento estructural del puente, en búsqueda de rastros, deformaciones o fisuras (debido al comportamiento inelástico); muestras que al final de la jornada, no se encontraron.

Dentro de las actividades descritas, se procedió a realizar una medición técnica mediante una inspección visual, usando cinta métrica para medir los desplazamientos en el interior de los aisladores.

En la Tabla 2, se puede apreciar el resultado del desplazamiento de la cabeza de las pilas y de los aisladores, para las condiciones de diseño modeladas en SAP-2000, lo cual nos permite tener datos numéricos para realizar una comparación de la estructura.

Tabla 2*Desplazamientos máximos de los aisladores*

No. Pila	Desplazamientos Longitudinales			Desplazamiento Transversal		
	Cabezal de la pila (cm)	Desplazamiento máx. del aislador (cm)	Desplazamiento relativo del aislador (cm)	Cabezal de la pila (cm)	Desplazamiento máx. del aislador (cm)	Desplazamiento relativo del aislador (cm)
P12	19.67	44.57	24.90	19.87	47.32	27.45

Fuente: (M. Romo, 2016a)

Los técnicos del CEE, han realizado varios controles del puente “Los Caras”, los cuales descartaron, que el puente tenga algún problema que ponga en riesgo la vida de las personas, así como también de la estructura.

Del resultado del monitoreo se pueden arrojar algunos detalles que son necesarios mencionar, tales como:

- La mayor parte de los aisladores sísmicos reflejaron pérdida del sello elastomérico de protección contra polvo y agentes externos del ambiente que deterioran a futuro la calidad del aislador, por las condiciones ambientales a las cuales están sometidos.
- De las observaciones directas por parte del personal técnico el promedio de los desplazamientos registrados para todas las pilas fue de 30 cm, para lo cual se presenta un diagrama comparativo de los desplazamientos de las pilas más relevantes, así como se observa en la *Figura 27* (M. Romo, 2017).

**Figura 27** Desplazamiento en los aisladores sísmicos (cm)

El mínimo desplazamiento corresponde a la pila No. 6, y fue de 12,5 cm, mientras que el máximo desplazamiento lateral en los aisladores se produjo en pila No. 12, donde se registraron desplazamientos laterales en sus 4 aisladores, que superaron los 52 cm, este fenómeno permitió que los aisladores trabajaran al tope de su capacidad, llegando a causar daño en los bordes de este como se aprecia en la *Figura 28* (a), (b), (c) y (d).

	
<p>(a) Aislador TPF de la pila No.12 después del sismo de abril de 2016</p>	<p>(b) Interior del aislador de la pila No.12 en donde el control deslizante rígido entró en contacto con el conjunto deslizante articulado, causando daño.</p>
	
<p>(c) Borde externo de restricción del plato cóncavo inferior afectado en el aislador de la pila No. 12</p>	<p>(d) Fotografía que demuestra el daño de aisladores luego del sismo del 16 de Abril de 2016</p>

Figura 28 Fotografías del estado actual de dos aisladores de la pila No12 en que se puede visualizar daño en sus componentes internos.

Al no existir registros de aceleraciones posteriores al evento sísmico del 16 de Abril del 2016, las evidencias del comportamiento del Aislador Sísmico de la pila No. 12 que se aprecia en la *Figura 29* (a) y (b), demuestra claramente que el sismo mencionado, se produjo en dirección transversal de Norte a Sur ya que al referenciar el daño del aislador, se puede concluir la dirección del movimiento.

Por otro lado, es importante considerar que en la inspección visual se determinó que el péndulo interior pudo llegar al limitador de desplazamiento externo y chocar con gran fuerza hasta hacer que el acero ASTM536 o 570, presente una gran falla ante el corte. Esto genera la incertidumbre de la influencia de agentes externos dentro del comportamiento de los materiales; tal es el caso de salinidad y temperatura que pueden producir efectos de corrosión conforme se puede observar en la figura anteriormente señalada.

Las muestras de micro fisuras en el componente son visibles a la acción de óxido interno, que generaron esfuerzos mayores ante los esfuerzos permisibles que los materiales poseen intrínsecamente, generando la falla visible en la fotografía.



Figura 29 Evidencia de la dirección del sismo del 16 de Abril de 2016, de acuerdo al daño presentado en el Aislador No. 1

A pesar del daño presentado en los aisladores de la pila No. 12, el sentido general del comportamiento del puente fue eficiente, comprobándose que los aisladores sísmicos retornaron a su posición original, debido al correcto desempeño y funcionamiento. En la *Figura 30* (a) y (b), se puede apreciar un esquema del movimiento transversal del puente durante el sismo, donde los aisladores trabajaron adecuadamente.

Estos desplazamientos esquematizados concluyen que la adecuada filosofía de diseño fue eficiente al considerar sistemas isostáticos que reducen la generación de momentos y permiten darle a la estructura un concepto de dispersión ante la acción de fuerzas sísmicas que generen desplazamientos en contraste a un elemento monolítico.

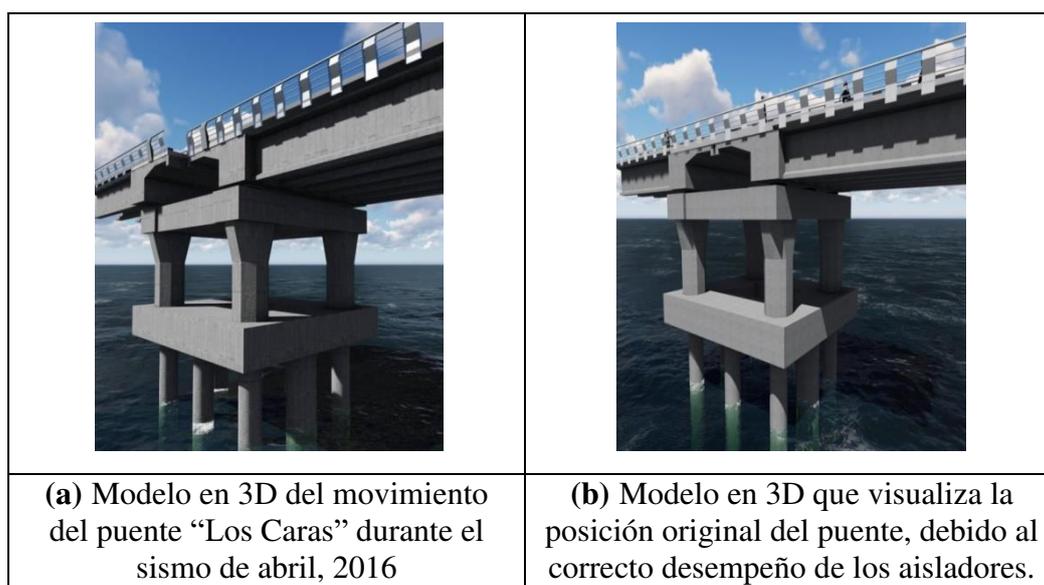


Figura 30 Modelo en 3D del movimiento y retorno a la posición original del puente los Caras durante el sismo de abril, 2016

3.5. Resumen

En este capítulo se presentaron los resultados obtenidos después de la inspección realizada por parte de los técnicos del CEE. El análisis del presente capítulo se orientó a las consideraciones del suelo de cimentación, así como de las capas superiores del suelo de la fundación de las pilas de la sección central del puente “Los Caras”, las cuales son particularmente sensibles a un evento sísmico, debido a la existencia de suelos granulares licuables, o la presencia de arcillas blandas.

De las 38 pilas de la sección central, la pila No. 12 presentó desplazamientos laterales superiores a los previstos en la fase de diseño; el resto de las pilas mostraron desplazamientos similares o menores a los previstos en el modelo de diseño.

En el siguiente capítulo, se propone un proceso de mantenimiento, preservación y metodología para el reemplazo de los aisladores en la pila No. 12 del puente “Los Caras”, el cual está enmarcado en procedimientos esenciales para dar funcionalidad continua al puente.

CAPÍTULO IV

PROCESO DE MANTENIMIENTO, PRESERVACIÓN Y METODOLOGÍA PARA EL REEMPLAZO DE AISLADORES EN LA PILA No. 12 DEL PUENTE “LOS CARAS”

4.1. Introducción

En este capítulo se presenta un esbozo sobre las inspecciones posteriores al sismo de abril de 2016 del puente “Los Caras”, realizadas por parte del personal técnico del CEE. Debido a la falta de sensores de monitoreo, en este estudio también se utilizan versiones de los moradores aledaños al puente, quienes afirman que el puente se deslizó “como una serpiente” durante el sismo mencionado anteriormente. Luego de una inspección visual realizada por el Ingeniero Marcelo Romo, quien fue responsable del diseño como parte del CEE, el puente funciona normalmente, sin evidencia de daño que requiera el cierre de la estructura.

Se propone una metodología enmarcada en procedimientos para el reemplazo de los aisladores, la cual se realiza mediante el levantamiento de toda la superestructura, de tal manera que permita liberar los aisladores para su reemplazo o su reajuste. Para todo este proceso se presentan instrucciones que permitan ejercer un control estricto sobre el levantamiento de la estructura y las actividades subsiguientes para llegar al reemplazo de los aisladores.

4.2. Antecedentes del comportamiento del puente “Los Caras”

La preservación de los puentes, a través de un adecuado mantenimiento, se convierte en una estrategia que previene, o reduce el deterioro de estas estructuras o de sus elementos, para recuperar la funcionalidad de un puente existente, mantenerlo en buena condición, y extender su vida útil; para lo cual, se toman acciones preventivas y correctivas.

Para iniciar con la descripción de este tema, se ha identificado a los cuatro aisladores de la pila No. 12 que serán reemplazados, como se muestra en la *Figura 31 (a) y (b)*.

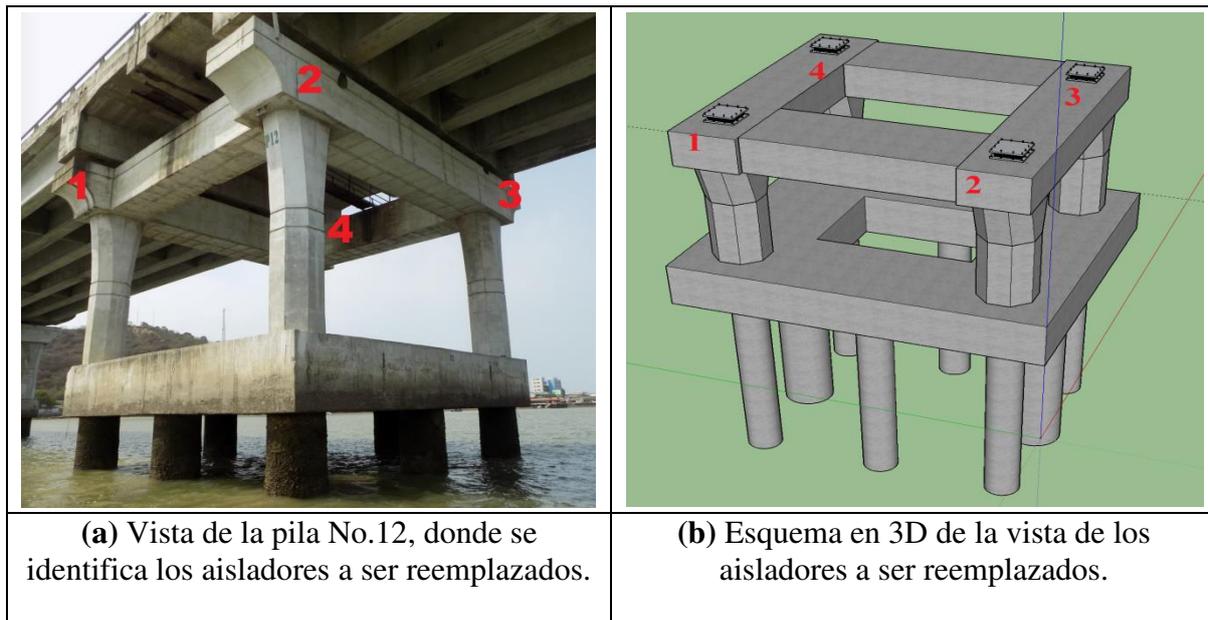


Figura 31 Fotografía de la Pila No. 12 y Esquema 3D que referencia a los aisladores TPF, que serán reemplazados.

Como se observa en la *Figura 32 (a), (b), (c), (d)* los aisladores tipo TPF, presentan daños considerables después de la inspección realizada, por lo cual, es necesario realizar un procedimiento adecuado que ejecute un óptimo reemplazo de los mismos, garantizando intrínsecamente la ejecución de un mantenimiento preventivo del puente “Los Caras”, como parte de una estrategia planificada de procesos rentables para un sistema vial óptimo, que preserve sus estructuras, y evite posteriores deterioros; de esta forma se mantiene y mejora la condición funcional de todo el sistema (Guide, 2011).



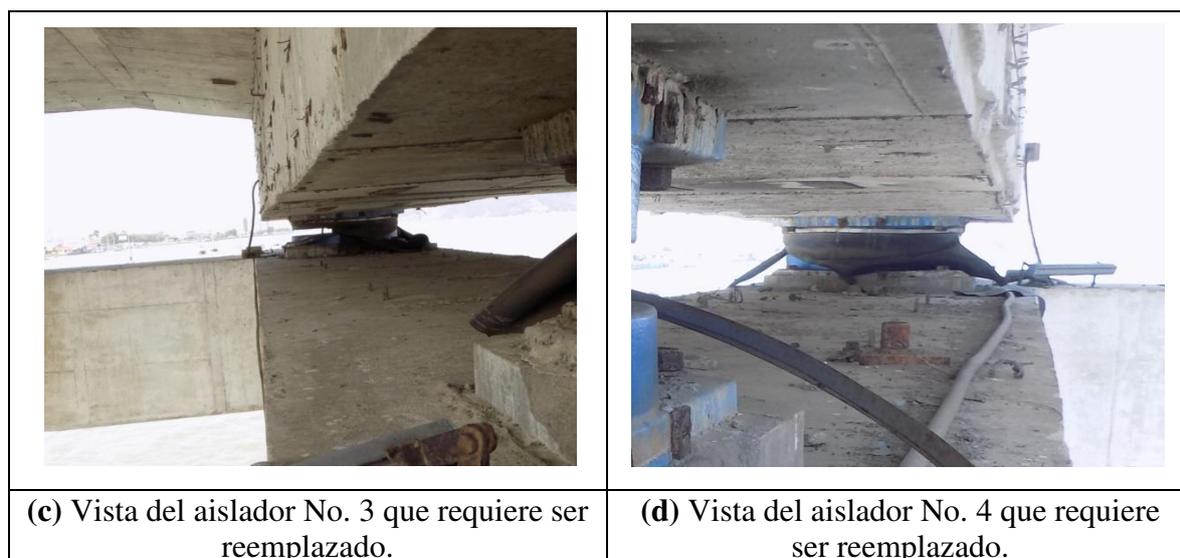


Figura 32 Fotografías que demuestran el estado de los cuatro aisladores sísmicos tipo TPF, de la pila No. 12 del Puente “Los Caras”

Entre los parámetros para el mantenimiento y reemplazo de aisladores sísmicos, se consideró la premisa que para el caso del puente “Los Caras”, los aisladores dañados deben ser sustituidos por un nuevo aislador y, si eventualmente se da la decisión de reparar el aislador original, debe ser bajo condiciones rigurosas y especificaciones técnicas de la empresa fabricante.

Las ideas expuestas, inciden en plantear que en caso de no apreciarse un daño significativo, el rendimiento y la durabilidad del aislador, se pueden mejorar mediante la aplicación de una cubierta protectora para evitar que el agua y la suciedad transportada por el viento y la arena accedan al área de superficie deslizante (Zealand, 2001).

Por otro lado, en caso de considerar que la mejor alternativa es el reemplazo del aislador por haber cumplido su función y encontrarse en mal estado, se debe tener en cuenta que, en este tipo de estructuras, es importante considerar algunas opciones para este proceso mediante gatos planos y gatos hidráulicos. Generalmente, la opción más recomendable para esta actividad se realiza mediante el uso de gatos hidráulicos que permiten levantar las vigas donde se soporta la superestructura del puente, para generar el espacio suficiente y poder reemplazarlos.

Para evitar daños en la estructura y restablecer las reacciones iniciales en los apoyos, es necesario ejercer un control estricto sobre el levantamiento que realizan los gatos hidráulicos y la colocación final en los aisladores.

En relación con las implicaciones que se pudiesen presentar durante este proceso, se debe considerar la eventualidad del retraso en el tráfico debido al cierre del puente, lo cual podría ser un impacto debido al bloqueo de las vías, llegando incluso a consecuencias extremas, si los problemas se extienden durante el trabajo, solamente se cerrará la vía por un breve periodo de tiempo.

En el presente estudio se propone una metodología que consiste en apoyar al puente sobre los gatos hidráulicos que estarán junto al aislador que va a ser reemplazado; posteriormente se accionará la palanca verificando que la acción de empuje hacia arriba sea repartida uniformemente controlando la presión ejercida y verificando que la elevación de carga sea milimétrica. Mientras el aislador es removido, el peso de la superestructura es transferido hacia los gatos hidráulicos que se encuentran asegurados, y un nuevo aislador es instalado en reemplazo del anterior. Los desplazamientos y cargas son monitoreados a través de todo el proceso. (Hart, Asl, & Fletcher, 2017).

Todos los elementos de una estructura, en este caso el puente “Los Caras”, deben tener un nivel de comportamiento crítico, normalmente relacionado con las condiciones de seguridad. Si ese nivel de comportamiento del puente está por debajo del nivel establecido, se deben considerar procedimientos para reubicar el nivel de seguridad adecuado, que podrían deslindar en el reemplazo o reforzamiento del o los elementos afectados con la brevedad posible. Estos trabajos de mantenimiento deben ser considerados como prioritarios o esenciales. Si el comportamiento está sobre este nivel, y algún trabajo es considerado adicional y justificable, los trabajos de mantenimiento serán considerados como preventivos (Frangopol, 1999).

4.3. Descripción del método

El método de reemplazo de apoyos o aisladores se realiza típicamente mediante el levantamiento de todas las vigas en las pilas, de tal manera que permita liberar los aisladores para su reemplazo o su reajuste. Para evitar daños en la estructura y devolver las reacciones

iniciales de los aisladores, es necesario ejercer un control estricto sobre el levantamiento y los niveles finales de los nuevos aisladores. El proceso puede ser complicado por la presencia de resinas epóxicas de espesor variable sobre o bajo los aisladores, lo cual podría ocasionar un retraso significativo en las operaciones (Hart et al., 2017).

Como se aprecia en el esquema de la *Figura 33*, se realizó un esquema de la ubicación de los elementos que ayudarán al levantamiento de la estructura.

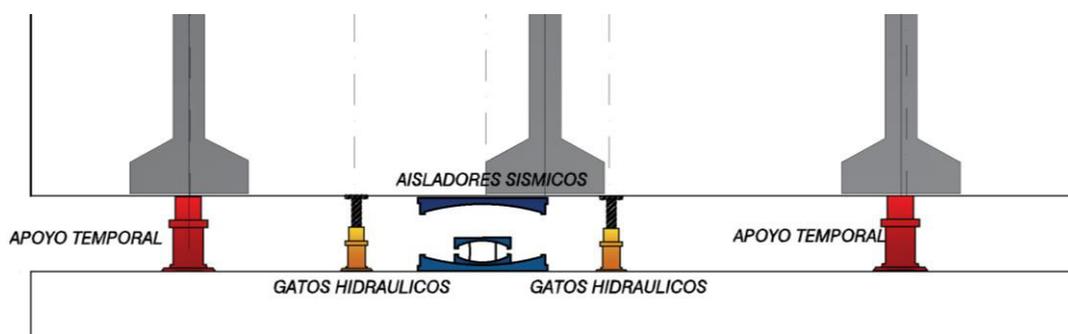


Figura 33 Descripción del levantamiento de la superestructura con los gatos hidráulicos.

Para el reemplazo de los aisladores se han analizado dos alternativas como métodos independientes a fin de obtener un mayor componente de seguridad. Estas alternativas se conjugan bajo un principio común de reemplazo individual de los aisladores usando apoyos temporales y gatos hidráulicos. Ambos métodos consisten en soportar el puente con gatos hidráulicos que estarán ubicados junto a los aisladores que serán reemplazados, con un pequeño (subcentimétrico) desplazamiento hacia arriba. Mientras el aislador es removido se retira la capa de mortero bajo este; con este procedimiento, el peso es transferido a los apoyos temporales. Posteriormente se instala el nuevo aislador con la resina epóxica y se ajustan los pernos a la base, restableciendo el peso anterior en el aislador y los gatos hidráulicos, los cuales serán removidos una vez que la resina haya alcanzado la dureza necesaria. Los desplazamientos y las cargas son monitoreados a través de todo el proceso. En ese sentido las dos alternativas que serán explicadas en los párrafos siguientes podrían llevarse a efecto en el caso de que los aisladores presenten una fácil remoción, y la segunda alternativa en el caso de que se requiera picar las resinas epóxicas de los bordes para

remover los mismos. El Anexo “A” Orden de Acción Táctica, describe militarmente el procedimiento a seguir para el reemplazo de aisladores sísmicos.

4.3.1. Alternativa A: Para el reemplazo de aisladores en la pila No. 12 del Puente “Los Caras”.

Para establecer la secuencia óptima durante la operación de reemplazo de los aisladores sísmicos de la pila No. 12, se han organizado algunas alternativas, desde un enfoque técnico - bibliográfico con parámetros de seguridad, con el fin de mantener la integridad del personal técnico, la maquinaria y los equipos antes durante y después de la operación.

Antes de continuar con la descripción de los pasos secuenciales para ejecutar el retiro y reemplazo de los aisladores, es importante mostrar las partes que constituyen al mismo y son relacionadas directamente en este proceso, las cuales se pueden visualizar en la *Figura 34*.



Figura 34 Partes del aislador que se removerá para el reemplazo
Fuente: (M. Romo, 2016b)

El primer paso lo describiremos una vez que esté listo el dispositivo con el personal técnico, la estructura temporal armada sobre las vigas de zapata del puente, el personal de emergencia, barcasas de monitoreo y seguridad de la operación alrededor de la pila, equipo y maquinaria. Este procedimiento consiste en colocar los gatos distribuidos cerca de cada aislador sísmico según su capacidad (01 en cada esquina, cerca de los extremos

de cada uno de los 02 diafragmas de aproximadamente 11m x 8m, y los restantes ubicarlos en posiciones que no requieran ejecutar el retiro de los gatos descritos anteriormente, ajustándolos hasta topar la viga - diafragma superior.

Una vez que se liberan y se quitan los cuatro pernos inferiores de sujeción de los cuatro aisladores, se da inicio al procedimiento de la Fase que se denomina “Fase 1A”:

1. Con los cuatro gatos hidráulicos ubicados en la posición como se muestra en *Figura 35*, se procede a levantar el tablero del puente, de manera progresiva hasta aproximadamente cuatro cm, o hasta una altura que permita realizar fácilmente los siguientes pasos.

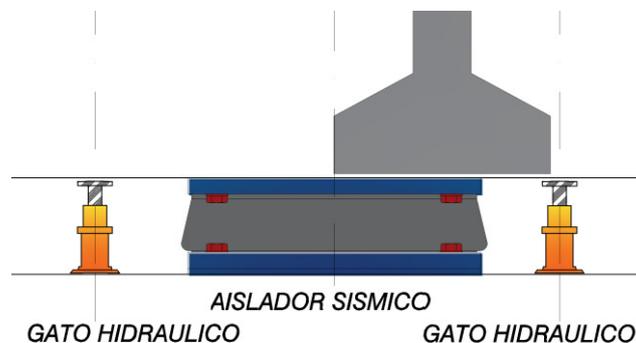


Figura 35 Esquema de la ubicación de los gatos hidráulicos para el reemplazo.

2. Despegar las placas inferiores de los aisladores, del grout (mientras se levantan lentamente los tableros del puente).
3. Liberar los pernos superiores.
4. Despegar del concreto las placas superiores de cada aislador.
5. Quitar los 4 pernos superiores de cada aislador.
6. Sujetar las 4 caras laterales de los aisladores, con varillas de 14 mm, soldadas contra las placas superior e inferior del aislador, de manera similar a las placas laterales de sujeción que traen los aisladores de fábrica.
7. Colocar rollers como los que se aprecia en la *Figura 36* (rodillos tipo barras lisas de acero), de manera lateral para mover el aislador, hacia las vigas superiores longitudinales de la pila (primero mover lateralmente el aislador sobre la viga transversal, y luego sobre la viga longitudinal correspondiente).

8. Mover el aislador mediante poleas y cables, hasta una posición libre, sobre la viga lateral longitudinal, bajo la ciclovía.
9. Colocar cuatro tornillos largos de sujeción, con tuercas, y en la parte superior un ojo de buey, en la posición que ocupaban los pernos principales de anclaje del aislador.
10. Retirar el aislador con una grúa simple o de 10 Tn, con un tecele con contrapesos 2 x 1, desde el tablero del puente (ubicado sobre la ciclovía).
 - a. Colocar cables desde el otro lado del puente, para sujeción lateral.
 - b. Colocar diagonalmente una cadena desde la grúa, que se conecta con el aislador para levantarlo.
 - c. Tensionar la cadena diagonal hasta levantar ligeramente el aislador, sosteniendo con los cables laterales.
 - d. Tensionar más la cadena diagonal hasta levantar el aislador.
 - e. Se afloja el cable lateral hasta que el aislador con la cadena quede en posición vertical.
 - f. La grúa o el tecele levanta el aislador y lo coloca arriba del puente.
11. Repetir el procedimiento desde los pasos 8 al 11 para los otros tres aisladores.
12. Colocar los apoyos temporales, durante el retiro de cada aislador.
13. Retirar el grout de los cuatro aisladores.
14. Bajar los cuatro gatos para abatir las vigas-diafragma (girders) 4 cm y que lleguen a la posición final, soportada en apoyos temporales como se muestra en la *Figura 37*.



Figura 36 Rollers que serán colocados para el movimiento de los aisladores.

Fuente: (M. Romo, 2016c)

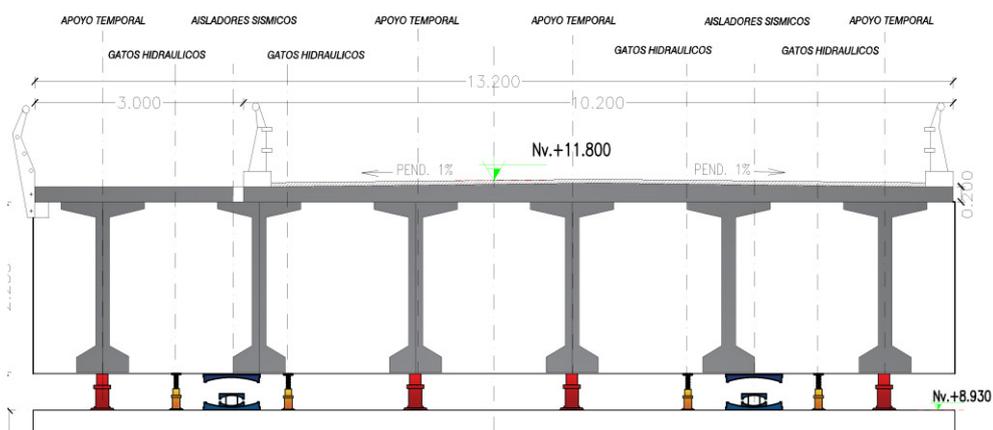


Figura 37 Esquema donde se muestra la ubicación de los gatos hidráulicos y apoyos temporales

En el caso que no se haya requerido remover el hormigón para retirar los pernos de anclaje, se inicia con la segunda fase, la cual consiste en colocar los nuevos aisladores sísmicos, ejecutando el procedimiento que se denomina “Fase 2A”, detallado a continuación:

1. Recortar 2.0 cm, los cilindros de acero con rosca interior, para compartir el espesor de grout que originalmente ocupó la parte inferior al aislador, y que en la reposición requiere colocarse tanto abajo como arriba del aislador, para asegurar el mejor contacto.
2. Cortar el concreto inferior del diafragma, con 2 líneas en cada dirección (1 cm x 1 cm de sección transversal), como canal de escape del aire durante la colocación del grout, en los 4 aisladores.
3. Colocar las placas centrales auxiliares de acero, de 12 cm de diámetro (o cuadradas de igual superficie) y 3 cm de espesor, en la posición central de los 4 aisladores.
4. Bajar un aislador desde el tablero de puente, con la grúa o tecla, y asentarlos en la viga longitudinal más cercana, sobre deslizadores (rollers).
5. Deslizar el aislador hasta su posición final, sobre la placa central correspondiente.
6. Ajustar los 4 pernos de anclaje para nivelar hasta 0.5 cm la placa inferior.
7. Encofrar la zona inferior donde se colocará el grout de contacto con el cabezal de la pila.

8. Mediante una manguera de diámetro aproximado de 1.5 cm, se debe llenar la base de la placa inferior del aislador, por los 4 lados, con grout cementicio autonivelante; empezando alrededor del plato central y terminando en la periferia.
9. Repetir el procedimiento desde el paso 4 hasta 8, para los otros tres aisladores.
10. Aflojar las 4 placas laterales que vienen con los aisladores, para alinear los 4 orificios del aislador con las 4 roscas superiores.
11. Colocar los 4 pernos superiores, y ajustar el nivel del plato superior del aislador. (Cuidar que no se levante el plato superior para que permanezca en contacto con el aislador interior. Nunca se puede tener una fuerza de tensión en más de 2 pernos).
12. Asegurar los tornillos de las 4 placas laterales para mantener el nivel del plato superior.
13. Colocar el encofrado en cada placa superior del aislador.
14. Colocar el grout con la misma manguera, desde el centro hacia la periferia, en los 4 lados.
15. Repetir desde el paso 10 al 14 para los otros 3 aisladores.
16. Retirar los apoyos temporales una vez que el grout haya alcanzado la resistencia a la compresión requerida en el diseño (400 Kg/cm²).
17. Retirar las 4 placas de sujeción laterales, de cada aislador.

En la tercera fase llamada “Fase 3A”, se estandariza el proceso para liberar los nuevos aisladores sísmicos en donde se realizan los siguientes pasos:

1. Esperar 3 días para que el grout alcance una resistencia adecuada.
2. Retirar los encofrados del grout.
3. Retirar las placas laterales de todos los aisladores.
4. Levantar de 1 cm a 4 cm todos los aisladores simultáneamente, con los 4 gatos hidráulicos.
5. Retirar los apoyos temporales.
6. Bajar los gatos hasta que toda la carga la soporten los aisladores.

4.3.2. Alternativa B: Para el reemplazo de aisladores en la pila No. 12 del Puente “Los Caras”.

Como parte de la segunda alternativa, entraría en ejecución la fase denominada “Fase 1B”, que se realizará en el caso de que, al momento del retiro de aisladores en mal estado, se presente algún perno de anclaje dañado o algún aislador no pueda ser retirado directamente, siguiendo el siguiente procedimiento:

1. Se ejecuta el mismo procedimiento del paso 1 de la “Fase 1A”.
2. En caso de no poder retirar directamente alguno o algunos de los pernos de anclaje inferiores de uno o varios aisladores, se procederá a su remoción mediante un sistema de oxicorte para el acero de la placa base y para el sistema apernado. A este procedimiento, se debe incluir el picado y/o taladrado para el hormigón, alrededor del sitio de anclaje de los pernos.
3. Se ejecutan los pasos 3 y 4 de la “Fase 1A”.
4. En el paso 5; en caso de no poder liberar los pernos mediante desajuste, se utilizará oxicorte para el acero de la placa superior y del sistema apernado. Para este proceso hay que considerar el picado y taladrado del hormigón alrededor del sitio de anclaje de los pernos.
5. Ejecutar los pasos 6 a 16 de la “Fase 1A”.

A continuación, se iniciará con la “Fase 2B”, que corresponde a la colocación de nuevos aisladores sísmicos, cuando se requiere picar o taladrar al hormigón para retirar los pernos, incluyendo los siguientes pasos:

1. Se limpian los orificios que surgieron del proceso de picado y taladrado de hormigón en la “Fase 1B”.
2. Se taladran 2 ductos en el hormigón de 10 mm de diámetro en la viga diafragma, para lo cual es necesario que partan desde un nivel superior en una cara del diafragma hasta un nivel inferior, que coincida con la zona superior de los orificios picados en la posición de los pernos, ductos que serán utilizados de acuerdo al siguiente detalle: uno para llenar con grout a los orificios generados al extraer los pernos y otro para el reflujo del grout, una vez que esos orificios se han llenado.
3. Ejecutar el paso 1 de la “Fase 2A” en caso de tener unos pernos retirados con oxicorte, y otros mediante desajuste.
4. Ejecutar los pasos 3 a 5 de la “Fase 2A”.

5. Ejecutar los pasos 6 a 16 de la “Fase 2A”.

En la siguiente fase que se denomina “Fase 3B”, se realizará la liberación de los nuevos aisladores sísmicos donde se ejecutarán todos los pasos de la “Fase 3A” los cuales son:

1. Esperar 3 días para que el grout alcance una resistencia adecuada.
2. Retirar los encofrados del grout.
3. Retirar las placas laterales de todos los aisladores.
4. Levantar de 1 cm a 4 cm todos los aisladores simultáneamente, con los 4 gatos hidráulicos.
5. Retirar los apoyos temporales.
6. Bajar los gatos hasta que toda la carga la soporten los aisladores.

En el Anexo “B” Esquema de procedimiento para el reemplazo de Aisladores Sísmicos, se puede visualizar las alternativas antes descritas.

4.3.3. Recomendaciones para el procedimiento de reemplazo de aisladores y de la Superestructura

Se ha tomado las recomendaciones como parte de la investigación del Washington State Department of Transportation (WSDOT), en base a su experiencia y lineamientos, quienes citan en su procedimiento lo siguiente:

1. Se debe mostrar los detalles en los planos, a fin de aplicar el procedimiento más práctico y permitir al contratista proponer un procedimiento. Se debe indicar los puntos donde se va a levantar la estructura.
 - a. Considerar para efectos de cálculo, los efectos del viento, peso de la estructura y carga viva de ser el caso.
2. La capacidad de los gatos hidráulicos será por lo menos 1,5 veces del peso calculado, así como también, se deberá considerar gatos hidráulicos extras o de apoyo. Si uno de los gatos hidráulicos falla, este puede ser rápidamente reemplazado si se dispone de otros de apoyo. Se debe registrar los datos del fabricante y la capacidad de los gatos hidráulicos debiendo permanecer en un lugar visible. El esquema de diseño

hidráulico, medidores, válvulas, colectores de presión y otros equipos, deberán ser indicados en los esquemas.

3. Se debe controlar los desplazamientos verticales de tal manera que no exista sobrecarga en los elementos estructurales existentes y las conexiones durante el levantamiento de la estructura. Se debe indicar el máximo desplazamiento vertical y el desplazamiento permitido entre puntos de elevación adyacentes y entre vigas adyacentes.
4. Determinar la máxima deflexión permisible. Prevenir excesivo movimiento tanto lateral como longitudinal.
5. Se puede usar gatos con tuercas de bloqueo cuando exista espacio para asegurar la estructura. Generalmente la WSDOT, va asegurando cada 3 mm el incremento de los gatos con tuercas de bloqueo. Si eventualmente fallara un gato hidráulico, no habría un asentamiento significativo y se podría instalar rápidamente un gato hidráulico de apoyo.
6. Por motivos de seguridad no se permite tráfico de vehículos o presencia de personal innecesario cerca del puente durante el reemplazo de los aisladores (Van Lund, 1995).

Es indispensable considerar un proceso donde se incluyan recomendaciones generales para la organización del procedimiento en la fase de estudio, diseño y ejecución. En la *Figura 38* se presenta un diagrama de la Asociación Técnica de Carreteras (ATC) de España, la cual contribuye con un procedimiento que señala acciones para el reemplazo de los aisladores del puente.

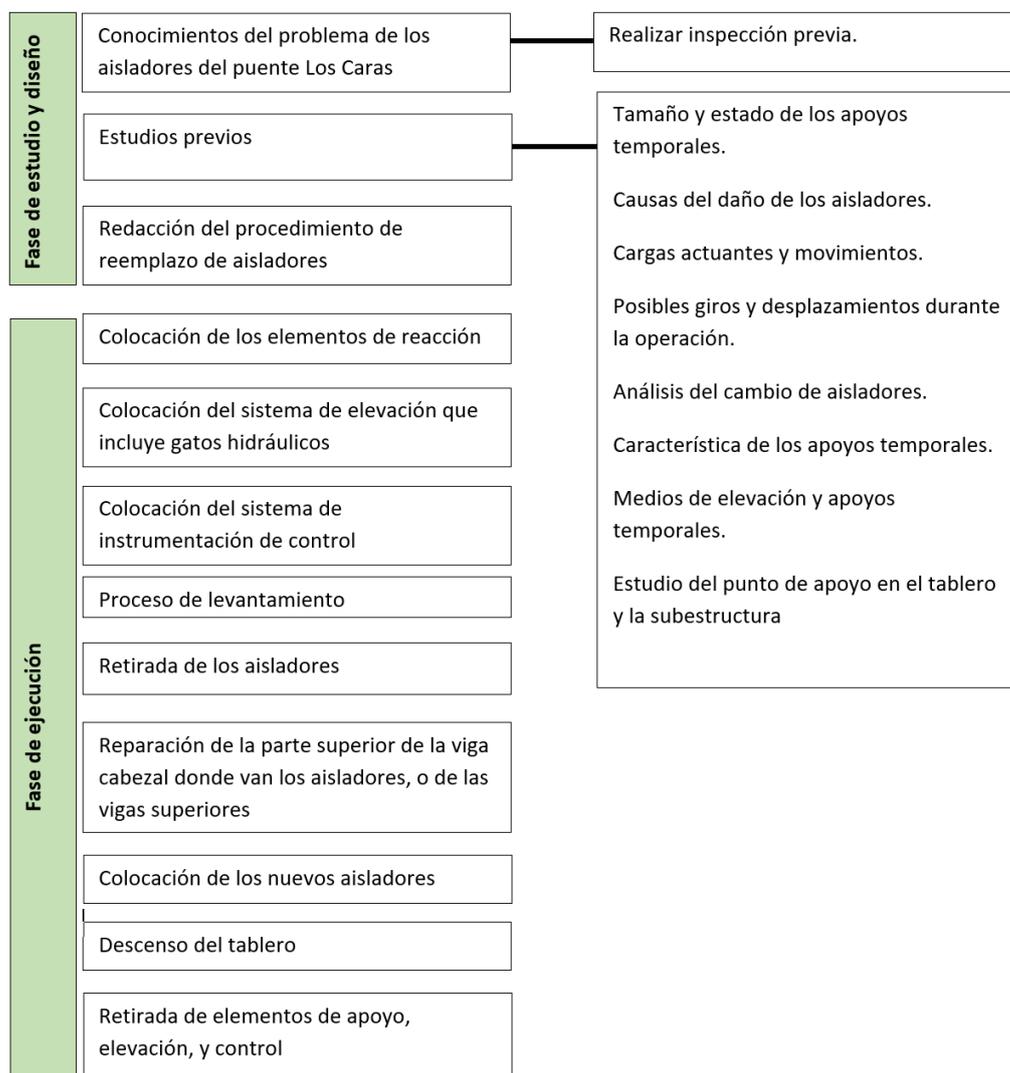


Figura 38 Diagrama de procesos para la inspección y actuación del reemplazo de los aisladores

Fuente: (Rojo, 2012)

En el Anexo “C” Matriz de riesgos para el reemplazo de Aisladores Sísmicos, se encuentra información relevante como parte de las recomendaciones dentro del ámbito de seguridad en esta actividad.

4.4. Consideraciones del equipo a utilizar

En la Tabla 3, se detalla el equipo considerado dentro del procedimiento para el reemplazo de aisladores de la pila No. 12:

Tabla 3

Equipo necesario para el reemplazo de aisladores sísmicos en la pila No. 12

CONCEPTO	UNIDADES	CANTIDAD	OBSERVACIONES
Gatos de 250 Tn	u	4	250 Tn
Apoyos Temporales	u	4	250 Tn
Aceite hidráulico	u	1	Verificar compatibilidad con el equipo hidráulico
Mangueras hidráulicas + conectores	u	5	Verificar medida
Unidad electrohidráulica de izado sincronizado + transductores + potenciómetros.	u	1	Verificar la capacidad y potencia de la central electrohidráulica.
Cuerpos de andamios	u	5	Verificar que alcance el tamaño de la pila
Resina epóxica para cuñas	u	10	Cajas
Resina de adherencia	u	10	Cajas
Mortero de alta resistencia	u	10	De acuerdo a la especificación técnica.
Grúa	u	3	60 Tn
Rollers	u	6	100Tn
Torre de iluminación	u	2	En caso que se realicen trabajos en horas de poca visibilidad.
Generador 152 Kw	u	2	Revisar especificación técnica.
Aisladores triple péndulo	u	4	TPF

4.5. Evidencias de Funcionalidad Continua del Puente “Los Caras”

Es importante considerar que los aisladores sísmicos, actualmente son más conocidos y utilizados con mayor frecuencia como una opción adicional para enfrentar un evento

sísmico sobre estructuras de vital importancia, los cuales al ser empleados en conjunto con criterios técnicos proporcionan “Funcionalidad Continua” de los servicios que presta la estructura.

El criterio “Funcionalidad Continua” de un puente, pretende que deba ser diseñado con análisis técnico de tal manera que sea práctico, utilitario y perdurable en el tiempo.

Este criterio, se complementa con un constante monitoreo del comportamiento de la estructura, antes durante y después de un evento sísmico.

Los aisladores sísmicos por sí solos, no son suficientes para lograr que las estructuras alcancen un comportamiento eficiente ante los grandes sismos, por lo cual es importante que los diseños de sistemas de aislamiento sean adecuados, considerándolos como sistemas complementarios que aseguren los elementos estructurales no aislados, los elementos no estructurales y las conexiones con las zonas que no han utilizado aislamiento sísmico.

Hay que considerar que, en el desempeño del puente y la cimentación de las pilas, jugaron un papel muy importante el diseño de los pilotes circulares huecos de acero A588, que tienen longitudes entre 40 y 74 metros; estos pilotes tubulares trabajan a fricción y a punta.

El análisis sobre aislamiento sísmico en el puente “Los Caras” deja evidenciado sin duda que todos sus componentes estructurales, permiten lograr funcionalidad continua. Sin embargo, con los criterios aseverados en los párrafos anteriores, se debe tomar en cuenta la responsabilidad en el diseño de los aisladores sísmicos y los demás componentes dentro de una estructura que persigue funcionalidad continua como un principio a seguir dentro de una filosofía de calidad. Esto solamente se puede conseguir a través de un diseño integral en función de ensayos experimentales y pruebas apropiadas para lograr niveles de confiabilidad adecuados.

4.6. Resumen

Este capítulo resalta la importancia que tiene la inspección de los puentes, el mantenimiento preventivo y el mantenimiento correctivo, ya que esta preservación es una estrategia que previene o reduce el deterioro de estas estructuras y de sus elementos, para así

recuperar la funcionalidad continua del puente, mantenerlo en buenas condiciones y extender su vida útil, tomando principalmente acciones preventivas.

Se presentó la evidencia del daño causado por el sismo de abril de 2016 a los aisladores sísmicos tipo TPF, ubicados en la pila No. 12; generando un procedimiento abreviado e innovador en nuestro medio para poder reemplazarlos, ya que se encuentran actualmente en mal estado.

Estas alternativas proponen varias opciones en función de los criterios presentados luego del análisis e inspección preliminar realizada por parte del CEE, después del sismo mencionado anteriormente. Esta inspección permitió proponer las mejores consideraciones técnicas que permitan ejecutar el remplazo de los aisladores sísmicos en la pila No.12, sin afectar a la estructura y a la funcionalidad continua del puente.

CAPÍTULO V

DESCRIPCIÓN DE LAS PROPIEDADES Y ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS A LOS AISLADORES TPF DEL PUENTE “LOS CARAS”

5.1. Introducción

Los sistemas de aislamiento de base utilizados en el puente “Los Caras”, fueron diseñados sobre la base de una demanda sísmica existente. El uso del aislamiento de base y otros sistemas de protección sísmica para el diseño de infraestructuras importantes como hospitales, edificios históricos y puentes se ha vuelto muy común en los países desarrollados. La eficacia de estos sistemas para proteger estructuras esenciales o críticas a sido demostrada en eventos sísmicos, como los ocurridos en Nueva Zelanda, Estados Unidos, Japón, Italia y Chile.

La implementación de sistemas de aislamiento de base tiene la finalidad de garantizar la operatividad del proyecto ante una amenaza sísmica existente. En términos generales, se puede indicar que ante un sismo de diseño no debería existir daños y ante un sismo de máxima intensidad los daños deberían ser mínimos, a fin de que continúe la operatividad de la estructura con pequeñas reparaciones.

Los estándares de diseño y construcción en el puente “Los Caras”, han permitido tener desempeños sísmicos adecuados, evitando el daño y alcanzando niveles de protección ya que esta obra emblemática, que fue diseñada y construida por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército, mantuvo funcionalidad continua, o total operatividad, durante y después del terremoto del 16 de abril de 2016.

En este caso el desempeño de los aisladores, definitivamente representa un factor determinante en el desempeño del puente, por lo que, determinar adecuadamente su comportamiento ante cargas dinámicas, permitirá garantizar su eficacia y eficiencia ante sismos severos.

En este capítulo se realiza una descripción general de los sistema friccionales de tipo triple pendulo colocados en el puente “Los Caras”; se detalla geometrías y características de este aislador que fue adquirido a la empresa EPS. Se finaliza indicando las curvas fuerza

- deformación de los aisladores instalados en el puente y los ensayos realizados en los cuatro aisladores, que permitirán remplazar los existentes en la pila No. 12.

5.2. Criterios de desempeño del sistema de aislamiento del puente “Los Caras”

Según el CEE (2010), el cumplimiento de criterios, estándares y metodologías recomendados por la norma, bajo revisiones de diseño del Profesor Constantinou, fueron importantes; estas pautas permitieron asegurar el comportamiento adecuado del puente, ante el terremoto del año pasado.

Los criterios de diseño de aislamiento con factores de seguridad que fueron implementados en el puente “Los Caras”, salvaron vidas y evitaron el colapso de la estructura. Se demostró que una adecuada filosofía de diseño sísmico, utilizando aislamiento de base, permitió reducir el riesgo y evitó el colapso. En la *Figura 39* se muestra la certificación del puente por parte del CEE, posterior al sismo del 16 de abril de 2016.

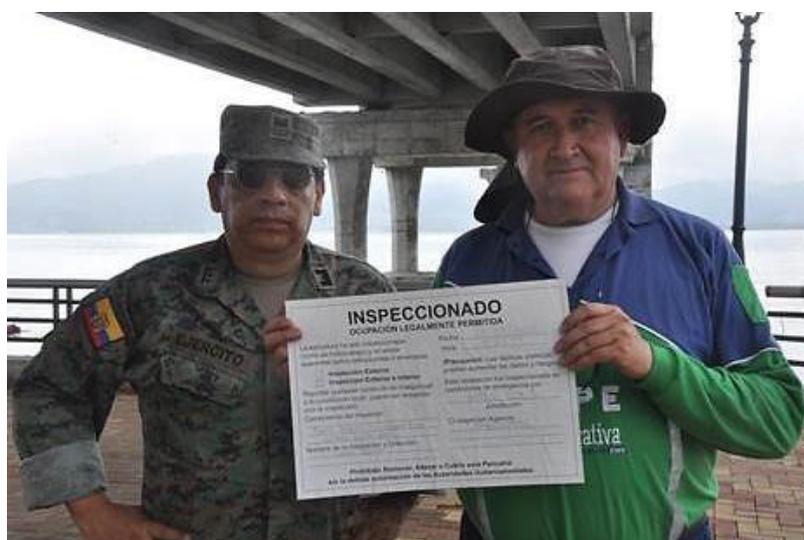


Figura 39 Técnicos del CEE, después del Terremoto del 2016.

5.3. Desarrollo de los Sistemas Friccionales

5.3.1. Aislador de Simple Péndulo de Fricción

El Aislador de Simple Péndulo de Fricción, es el primer tipo de sistemas de aislamiento friccional y fue propuesto por Zayas y su equipo en el año de 1987 (Zayas, Low, & Mahin, 1987). Este sistema consiste en un control pendular deslizante de fricción sobre una superficie esférica cóncava como se puede visualizar en la *Figura 40*. El radio de curvatura del sistema es igual al radio de la superficie esférica, R . Cuando la estructura aislada se mueve en base a una solicitación sísmica, el control deslizante se desplaza de derecha a izquierda y teóricamente crea una interface entre la infraestructura y la superestructura, disipando la energía en el sistema de aislamiento basado en una histéresis determinada. El desempeño de este sistema está basado en las propiedades geométricas y los coeficientes de fricción, μ , lo que limita el desplazamiento ante grandes solicitaciones sísmicas y permite contar con rigideces iniciales que evitan la acción de las cargas de viento o tráfico. La superficie deslizante tiene un borde de restricción alrededor del aislador, el cual incrementa la rigidez y representa un factor de seguridad ante la prevención de colapso (Becker, 2011).

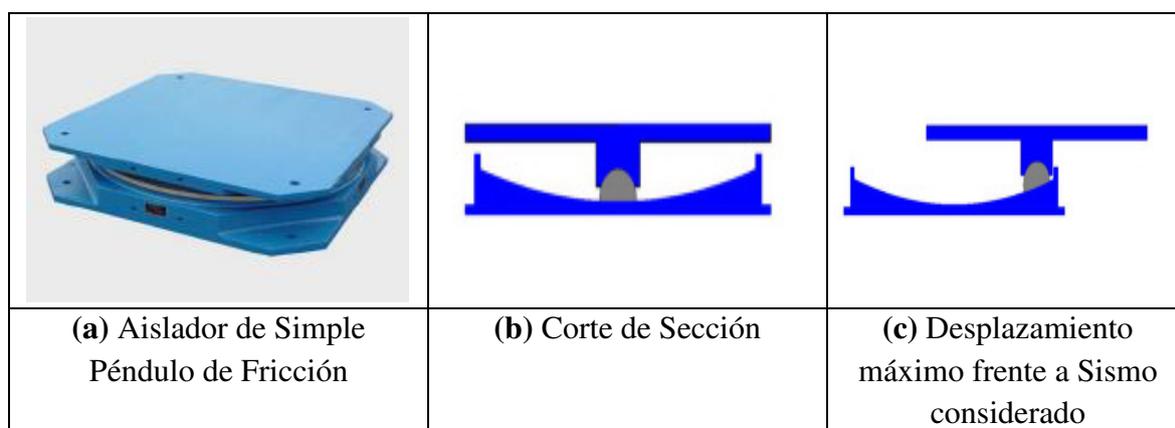


Figura 40 Aislador de Simple Péndulo de Fricción y Esquema de Funcionamiento Interno
Fuente: (EPS, 2009)

El Aislador de Simple Péndulo de Fricción actualmente constituye, dentro de esta gama, un aislador de primera generación; permitiendo que el control deslizante único mantenga la carga vertical de soporte en el centro del elemento estructural.

5.3.2. Aislador de Doble Péndulo de Fricción

Con la finalidad de contar con un sistema que tenga mayor capacidad de desplazamiento y un desempeño adaptable a la demanda, se desarrolló el sistema

denominado FP de segunda generación; en donde el deslizador está recubierto con un tejido de teflón y el control deslizante articulado descansa sobre una superficie esférica cóncava cubierta por acero inoxidable pulido. Este aislador emplea materiales que permitan establecer coeficientes de fricción apropiados, como se puede apreciar en la *Figura 41*.

Este sistema permite reducir y contar con un sistema más compacto, menores radios de curvatura, mayores fuerzas de restitución y velocidades menores, lo que garantiza tener coeficientes de fricción más predecibles (Michael C Constantinou, 2004).

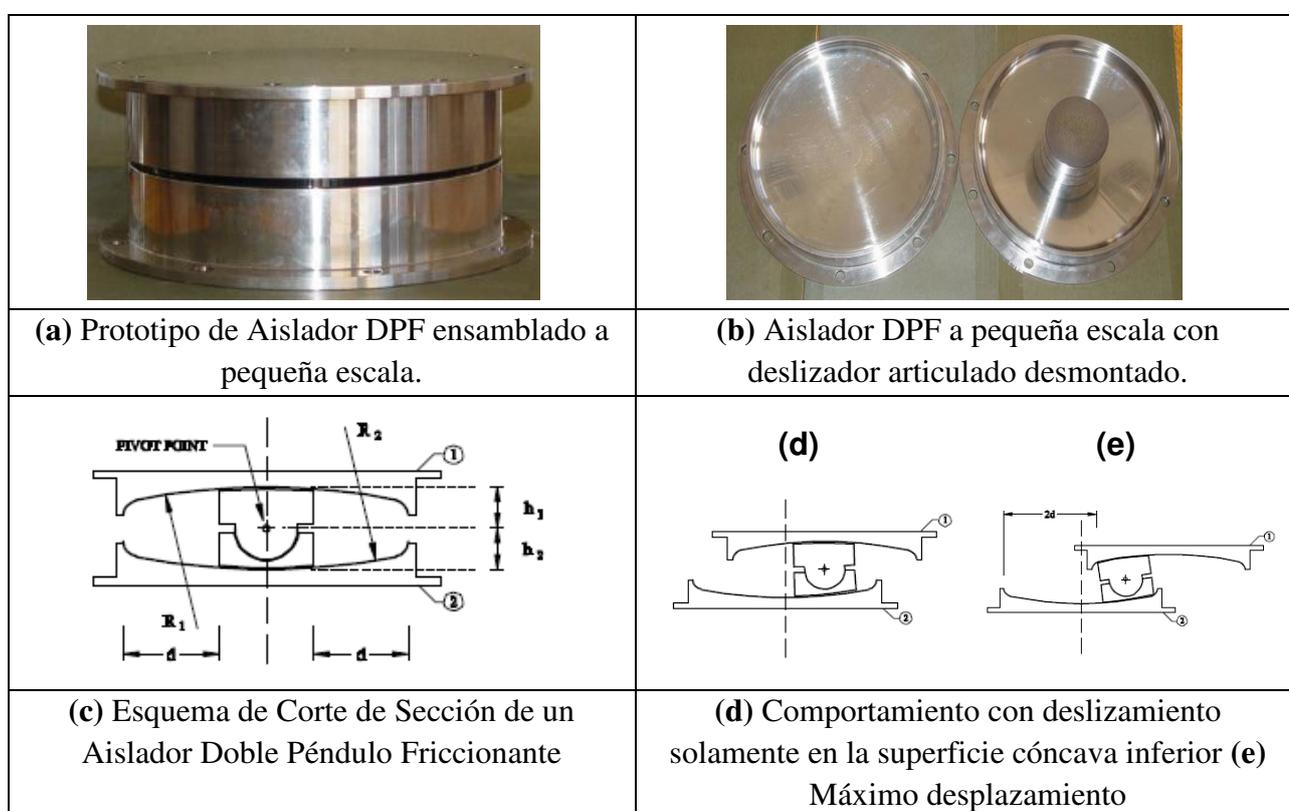


Figura 41 Aislador de Doble Péndulo de Fricción y Esquema de Funcionamiento Interno
Fuente: (Michael C Constantinou, 2004)

5.3.3. Aislador de Triple Péndulo de Fricción

Finalmente, se hace referencia al aislador TPF, que ha demostrado ser uno de los más prometedores en el campo del aislamiento sísmico. La construcción de estos dispositivos se caracteriza por presentar múltiples superficies cóncavas, sobre las cuales sus componentes se pueden deslizar. Como el deslizamiento se comparte entre

superficies cóncavas múltiples, cada superficie individual necesita acomodar solo una porción de la demanda total. Esto permite que los aisladores se fabriquen de tamaño más compacto que los aisladores de deslizamiento esféricos tradicionales, lo que obviamente proporciona ahorro sustancial en el costo de estos dispositivos. Además de los beneficios económicos, hay también beneficios de rendimiento, que se generan debido a la distribución de desplazamientos entre múltiples superficies. Por ejemplo, en los aisladores DPF, las velocidades de deslizamiento se reducen aproximadamente a la mitad, en comparación con los aisladores FP simples. Como resultado, el calentamiento por fricción y problemas asociados, tales como el desgaste y la variabilidad en la fricción, se reducen. (Fenz, 2008).

En la *Figura 42*, se puede observar un Aislador TPF y sus componentes, totalmente ensamblado y listo para su colocación.



Figura 42 Aislador Triple Péndulo Friccionante y componentes

Fuente: (EPS, 2009)

De igual forma, la capacidad de los desplazamientos que presenta un aislador de tipo TPF son mayores a los de uno de tipo DPF y éste a su vez de un aislador pendular de primera generación o simple.

En la *Figura 43*, se muestran los esquemas donde se aprecia las geometrías de cada uno de los dos sistemas anteriormente indicados: DPF y TPF.

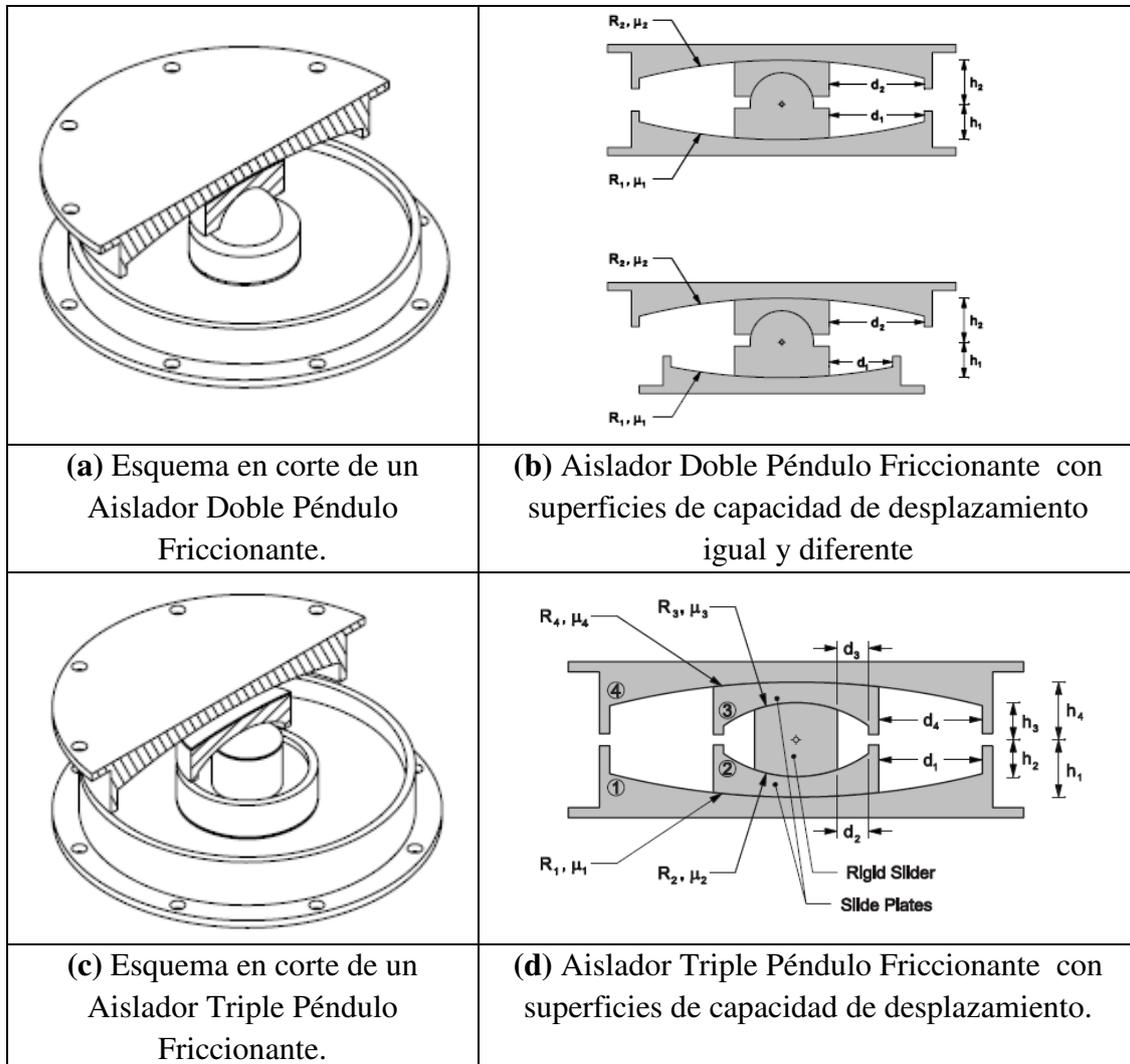


Figura 43 Diferencias entre Aisladores Péndulo Friccionante Dobles y Triples.

Fuente: (Fenz, 2008).

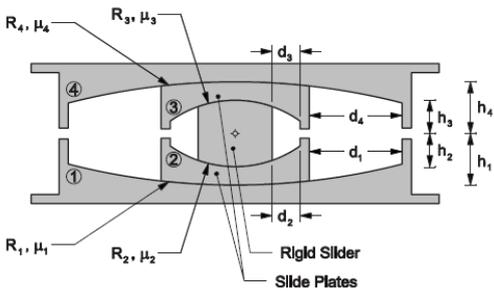
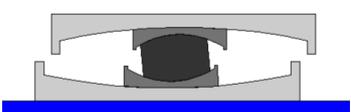
5.4. Descripción Genérica del Sistema de Aislamiento TPF

Los principios de funcionamiento y comportamiento mecánico de los aisladores tipo TPF, se basan en el análisis de sus componentes internos, los que poseen múltiples superficies cóncavas sobre las cuales se puede deslizar el péndulo durante el curso del movimiento. Como las superficies sobre las que ocurre el deslizamiento están en constante movimiento, la rigidez y la fricción efectiva cambian.

Estos aisladores son dispositivos completamente pasivos, que exhiben rigidez y amortiguamiento adoptado, es decir, la rigidez y el amortiguamiento cambia a valores predecibles. Las amplitudes de desplazamiento también son controlables. El principal beneficio del comportamiento adaptativo mencionado, es que un sistema de aislamiento se puede optimizar por separado para obtener un rendimiento múltiple en función de diferentes movimientos de tierra, esto se logra utilizando una tecnología que generalmente no es más compleja de la que actualmente se utiliza dentro de la profesión de Ingeniería Civil. (Daniel M Fenz & Michalakis C Constantinou, 2006).

Se pretende analizar las relaciones Fuerza - Desplazamiento, que se derivan en base a los principios dinámicos expuestos en el capítulo III de esta tesis; extendiendo las teorías básicas que se aplican al deslizamiento sobre una sola superficie cóncava. El comportamiento teórico basado en el análisis de cada uno de los regímenes que presentan estos aisladores, se contrasta con la validación experimental realizada para el reemplazo de estos aisladores en la empresa EPS a través de extensas pruebas de componentes de los diversos dispositivos. Se muestra que las fuerzas y los desplazamientos son controlables y que se basan en las transiciones predecibles de sus propiedades y características como la rigidez.

En la *Figura 44*, se detalla el comportamiento de un aislador TPF en función de sus regímenes, observándose la adaptabilidad del sistema que llega a la generación de una curva de histéresis teórica.

	
<p>(a) Sección transversal del aislador TPF con parámetros que dictan su comportamiento.</p> <p>R_i es el radio de curvatura de la superficie i, h_i es la distancia radial entre el punto de pivote y la superficie i y μ_i es el coeficiente de fricción en la interfaz deslizante.</p> <p>Fuente: (Fenz & Constantinou, 2008a)</p>	<p>(b) Régimen I. Posición Central del Apoyo de Péndulo Triple</p>

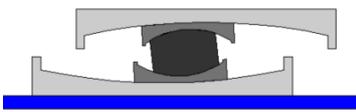
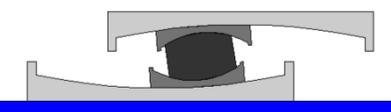
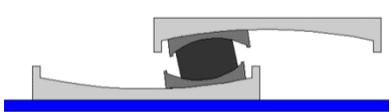
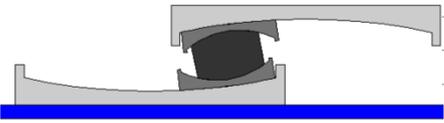
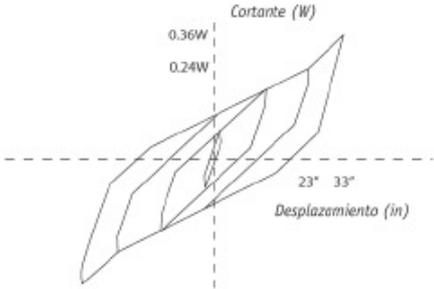
		
(c) Régimen II. Movimiento del Péndulo Interno en Sismo de Nivel de Servicio.	(d) Régimen III. Movimiento del Péndulo Inferior en Sismo de Diseño.	(e) Régimen IV. Movimiento del Péndulo Superior en Sismo de Diseño.
		
(f) Régimen V. Movimiento del péndulo superior en el Máximo Sismo Considerado.	(g) Ciclo Histerético Fuerza-Desplazamiento del Péndulo Triple Fuente: (Fernández, 2014)	

Figura 44 Regímenes de Comportamiento del Aislador TPF y Ciclo de Histéresis Tipo.

5.5. Descripción del Sistema de Aislamiento TPF del Puente “Los Caras”

El sistema de aislamiento sísmico diseñado para el Puente “Los Caras”, está basado en un sistema TPF, en este caso se describirán las propiedades del aislador, generalizando los de la pila 12 como tipo.

5.5.1. Geometría:

La nomenclatura utilizada por EPS para identificar los aisladores es la siguiente: $TPFR_1\phi_1/b_4 - R_2/b_2 - H$. Donde R_1 , R_2 son los radios de las placas 1 y 2; ϕ_1 es el diámetro de las superficies cóncavas 1 y 4; b_4 es el diámetro del aislador interior; b_2 es el diámetro del deslizador rígido; H es la altura interior del deslizador rígido.

Los cuatro aisladores que conforman la pila No. 12 del Puente “Los Caras”, poseen las siguientes dimensiones, según *Figura 45*.

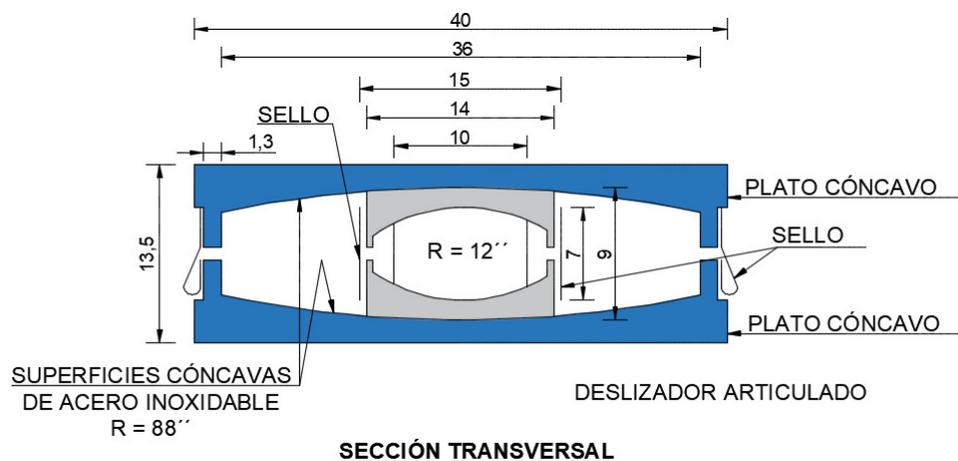


Figura 45 Corte de Sección de Aislador Sísmico empleado en el Puente “Los Caras”

5.5.2. Materiales

El material de la placa cóncava de los aisladores es ASTM A536. El material de la superficie principal esférica cóncava es ASTM A240, acero inoxidable grado 304 o equivalente. El material de los componentes del control deslizante es ASTM A536, o ASTM A576 Grado 1045. El perímetro y el sello son de un material de etileno propileno. Los materiales equivalentes pueden ser utilizados a discreción de EPS. Los requisitos y certificados de materiales, así como los materiales equivalentes, deben cumplir con estándares y especificaciones de fabricación (EPS, 2007).

5.5.3. Pintura

Todas las superficies metálicas del aislador (excluido el acero inoxidable) que están expuestas a la atmósfera, son rociadas con SSPC/SP-6, y se pintan con pintura epóxica con alto contenido de sólidos, como mínimo 5 mils DFT. Las superficies de apoyo superior e inferior que soporta el hormigón o el acero después de la instalación, deben ser pintadas con imprimación de acero, mínimo 1 mils DFT (EPS, 2007).

5.5.4. Tolerancias

Las dimensiones del aislador externo deben estar dentro del rango ± 0.5 plg. de los valores que se muestran en la *Figura 44*. La tolerancia para soportar la instalación en referencia a la ubicación de los agujeros para la colocación de pernos que se utilizan, será de ± 0.03 plg. Las dimensiones y tolerancias internas del aislador, cumplen los estándares y especificaciones de fábrica (EPS, 2007).

5.6. Resultados de Pruebas de Aisladores:

Según la información proporcionada por EPS, se detalla la capacidad de los 152 aisladores tipo TPF 8836/14-12/10-7 instalados en el 2008, los mismos que fueron experimentalmente testeados sobre la base de los parámetros de diseño especificados en el análisis.

5.6.1. Capacidades y Requerimientos de Diseño

En la *Figura 22* del Capítulo III, se muestra la histéresis de diseño, en base a la cual se determinó la capacidad del aislador, con un desplazamiento máximo de 20.5 plg. Cabe indicar que los aisladores que fueron instalados según la información proporcionada por EPS (152 aisladores tipo TPF 8836/14-12/10-7 colocados en el 2008), tienen una capacidad máxima de 23 plg. Estos aisladores fueron experimentalmente testeados, y tienen los siguientes parámetros según la hoja técnica proporcionada por EPS y que se encuentra en el Anexo “D” Planos del Aislador TPF considerado para la colocación en el puente “Los Caras”

- Desplazamiento Lateral = 23 plg. $\pm 0,3$ plg.
- Carga Muerta Vertical Promedio = 600 Kips utilizados para pruebas de propiedades de aisladores
- Capacidad de Carga Máxima Vertical D+L = 1200 Kips Máximo
- Capacidad de Carga Máxima Vertical D+L+E = 1900 Kips Máximo
- Las capacidades máximas de carga vertical se sustentan en las placas cóncavas de los aisladores que soportan hormigón de 5000 psi.
- Capacidad Máxima de Rotación = ± 2 deg.

En la Tabla 4 se detallan datos técnicos relacionados con el programa de pruebas realizados a los aisladores prototipo en tiempo real (2 Aisladores testeados).

Tabla 4

Datos Técnicos de Pruebas de Ensayo realizadas a Aisladores Sísmicos

Carga Vertical Promedio Cíclico	Desplazamiento (in.)	Número de Ciclos	Segundos por Ciclo	Rigidez Efectiva Kips /Kips / plg.	Amortiguamiento Efectivo
600 Kips (Prom.)	10	3	< 8	0,0800 +/- 0,0250	19% ± 7%
600 Kips (Prom.)	14	3	< 8	0,0113 +/- 0,0022	31% ± 5%
600 Kips (Prom.)	20	3	< 8	0,0097 +/- 0,0020	25% ± 5%
300 Kips (Prom.)	14	3	< 8	0,0127 +/- 0,0025	34% ± 5%
1200 Kips (Prom.)	14	3	< 8	0,0098 +/- 0,020	26% ± 5%
1900 Kips (Prom.)	20	1	< 40	0,0082 +/- 0,0016	21% ± 5%

Fuente: (EPS, 2007)

En la Tabla 5 se detallan datos técnicos relacionados con las pruebas de control de calidad en tiempo real (Todos los Aisladores probados).

Tabla 5

Prueba de Control de Calidad

Carga Vertical Promedio Cíclico	Desplazamiento (in.)	Número de Ciclos	Segundos por Ciclo	Rigidez Efectiva Kips /Kips / Plg.	Amortiguamiento Efectivo
600 Kips (Prom.)	14	3	< 8	0,0113 +/- 0,0022	31% ± 5%

Fuente: (EPS, 2007)

5.7. Resultados de Pruebas de Aisladores para reemplazo en la pila No. 12:

Los cuatro aisladores que serán reemplazados en la pila No. 12 del puente “Los Caras”, fueron ensayados tomando en cuenta los requerimientos iniciales del diseñador y tienen geometrías y coeficientes de fricción similares a las del diseño original. Los aisladores sísmicos TPF 8836/14-12/10-7, se sometieron a la prueba de control de calidad, que consistió en una prueba dinámica de compresión de tres ciclos con un desplazamiento de diseño lateral de 15 pulgadas. (aprox. 380 mm) y una carga vertical de 600 Kips (2678 kN)(EPS, 2016).

La prueba de aisladores, se realizó en las instalaciones de EPS mediante un equipo de prueba conforme los requerimientos establecidos en el Manual de Calidad EPS y la Certificación ISO 9001:2008. Las pruebas de aisladores se pueden realizar en una máquina de 15000 Kips de capacidad o en una máquina de prueba de 2000 Kips de capacidad, como se puede observar en la *Figura 46*.

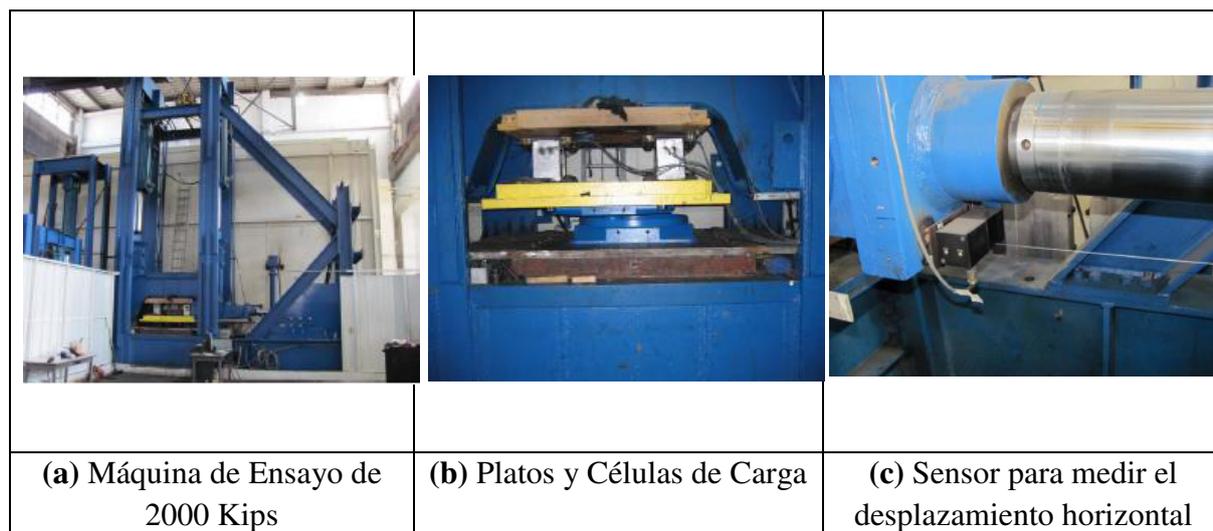


Figura 46 Máquina de Ensayo de Aisladores Sísmicos tipo TPF

Fuente: (EPS, 2016)

Para cada TPF 8836/14-12/10-7, los valores de fricción del péndulo 1, del péndulo 2 y del péndulo 3, se verificaron para comprobar el cumplimiento de los criterios de aceptación. Los resultados de la prueba individual satisfacen los requisitos de los criterios de aceptación de propiedades de aisladores individuales. Los valores de fricción promedio de todos los aisladores de producción se detallan en la Tabla 6.

Tabla 6

Valores de Fricción Promedio aplicados al Ensayo

Aislador	Promedio de Aisladores Testeados		
	$\mu 1$	$\mu 2$	$\mu 3$
TPF8836/14-12/10-7 Números de Serie 01 a 04	1.6%	7.2%	7.2%

Fuente: (EPS, 2016)

Como se aprecia, todos los valores están dentro de los parámetros establecidos como requisitos de tolerancia y demuestran el cumplimiento de las propiedades de los aisladores, como carga vertical y cortante.

Los valores de fricción del péndulo 1, del péndulo 2 y del péndulo 3 se manifiestan como μ_1 , μ_2 , y μ_3 respectivamente. Los valores de k_{eff} , β_{eff} y T_{eff} se indican en los gráficos detallados a continuación en las Figuras 47, 48, 49 y 50, en donde la energía desplazada por ciclo se enuncia como EDC. Estas figuras muestran demandas asociadas a las de diseño. Las pruebas se realizaron mediante desplazamientos cíclicos en la prueba de carga vertical especificada. Para cada desplazamiento, la rigidez efectiva se calcula a partir de la carga lateral, dividida por la carga vertical. Este valor se divide por el desplazamiento lateral obtenido (EPS, 2016).

El Amortiguamiento se calcula a partir del área de los diagramas de fuerza y desplazamiento. Las propiedades de rigidez y amortiguamiento para cada prueba cumplen con el valor especificado como se determina a partir de los resultados promedio para el número de ciclos descritos (EPS, 2016).

5.8. Capacidades y Requerimientos de Diseño:

- Capacidad de Desplazamiento Lateral = $D_{tmc} \pm 26.7$ plg. (679mm); $D_{mc} \pm 22$ plg. (559mm);
- Capacidad de Carga Vertical (Min): Elástica 3140 Kips (14018 kN) Min; Última 4710 Kips (21027 kN) Min.;
- Capacidad de Carga Cortante (Min): Capacidad de Carga Cortante Elástica no menor que 120 Kips (535 Kn), simultáneo con una carga vertical no menor a 600Kips (2678 kN); en desplazamientos laterales no menor que ± 22 plg. (558mm);
- Capacidad de Carga Cortante Última no menor que 150 Kips (670 kN), simultáneo con una carga vertical no menor que 600 Kips (2678 kN).
- Capacidad de Rotación: Imponiendo ± 2 grados de rotación angular de la superficie superior del aislador con relación a la superficie inferior, alrededor de cualquier eje de rotación cartesiano; el aislador debe soportar las capacidades combinadas de carga elástica vertical y de carga elástica cortante.

- Cuando el aislador es soportado en concreto confinado de 5000 psi (34 Mpa), la carga vertical estructural permisible, de acuerdo con la norma ACI 318-08 Sección 10.14 son: $P_{all}=(D + L)=1250$ Kips (5580 Kn); $P_u=(12D+0,5L+E)=2400$ Kips (10714 kN) a 20plg (508mm) de desplazamiento.

5.8.1. Coeficientes de Fricción para Aisladores TPF 8836/14-12/10-7

En la Tabla 7, se pueden apreciar los coeficientes de fricción nominales empleados en las tres pruebas de carga para los cuatro aisladores TPF, ensayados bajo diferentes condiciones de carga, llegando a obtener los valores de coeficientes de fricción promedio para que se cumplan las condiciones técnicas establecidas.

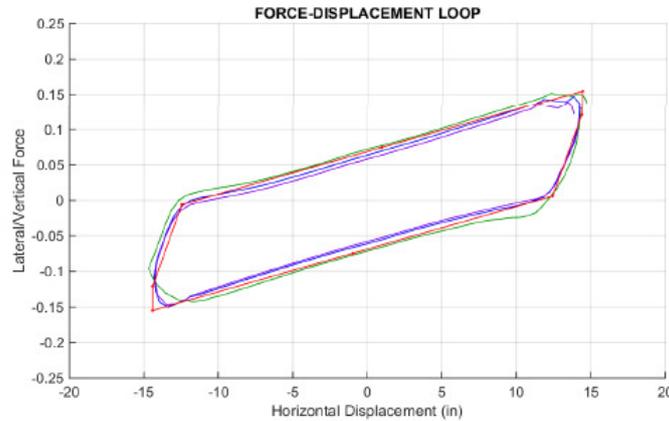
Tabla 7

Coeficientes de Fricción Promedio aplicados al Ensayo

Pruebas de control de calidad de producción	Tolerancia Individual			f1	f2	f3	
	Min.			0.005	0.065	0.065	
	Máx.			0.025	0.100	0.100	
Carga de Prueba Objetivo 600 Kips							
Aislador	Fricciones Individuales			Prueba de Carga (Kip)	Control de Tolerancia Individual		
	f1	f2	f3		f1	f2	f3
1	0.016	0.072	0.072	600	Pasa	Pasa	Pasa
2	0.017	0.072	0.072	592	Pasa	Pasa	Pasa
3	0.016	0.076	0.076	553	Pasa	Pasa	Pasa
4	0.015	0.068	0.068	595	Pasa	Pasa	Pasa
Fricciones Promedio				Tolerancia Promedio	f1	f2	f3
f1	f2	f3		Min.	0.010	0.070	0.070
0.016	0.072	0.072		Máx.	0.020	0.095	0.095
Control de Tolerancia Promedio							
Pasa	Pasa	Pasa					

Fuente: (EPS, 2016)

30- Aug-2016 EPS Bearing Test Report for FPT8836/14-12/10-7, QC600 B1
 Test Date: 8/30/2016 ; Test Time: 10:49:22 ; Test Data File: ECU.Rio.chone.8836.14.QC600.B1.ASC
 Bearing Dim.: Rc = 88 Rsc = 12, IDc = 36, ODsc = 14, IDsc = 13, ODsl = 10, tsc = 1.1, hsl = 7 in; Targ. Frictions: $\mu_1 = 0.015$, $\mu_2 = 0.08$, $\mu_3 = 0.08$
 Target Test: 3 Cycles of Equal Displacement; Target Vertical Load: 600 kips; Target Cyclic Displacement: 14 in



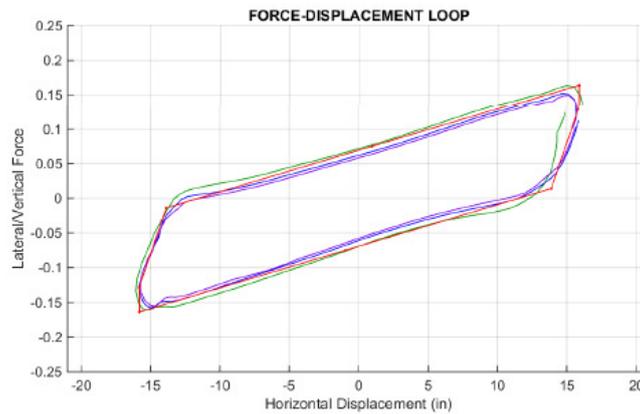
Vert Load: 599.5 kips avg, 670.0 kips max, 540.0 kips min; Velocity: 16.1 in/sec max, 10.4 in/sec avg; Shear Load: 84.8 kips max, -99.8 kips min

Data Results						Analytical Matching Results							
Cycle	Disp	EDC	Avg Fric	(H/V)max	(H/V)min	Disp	EDC	μ_1	μ_2	μ_3	Keff at 14"	β_{eff} at 14"	Teff at 14"
1	14.7	4.10	0.0699	0.152	-0.143	14.7	4.06	0.020	0.079	0.079	0.011208	0.2806	3.02
2	14.3	3.51	0.0615	0.147	-0.150	14.3	3.49	0.014	0.070	0.070	0.010589	0.2616	3.11
3	14.2	3.24	0.0569	0.139	-0.147	14.2	3.27	0.014	0.066	0.066	0.010298	0.2532	3.15

Average Bearing Properties @ 14" Displacement: $\mu_1 = 0.016$, $\mu_2 = 0.072$, $\mu_3 = 0.072$, Keff = 0.010698, $\beta_{eff} = 0.2652$, Teff = 3.09

Figura 47 Diagrama obtenido para la Prueba de Carga de Ensayo No. 1
 Fuente: (EPS, 2016)

30- Aug-2016 EPS Bearing Test Report for FPT8836/14-12/10-7, QC600 B2
 Test Date: 8/30/2016 ; Test Time: 1:04:58 ; Test Data File: ECU.Rio.chone.8836.14.QC600.B2C.ASC
 Bearing Dim.: Rc = 88 Rsc = 12, IDc = 36, ODsc = 14, IDsc = 13, ODsl = 10, tsc = 1.1, hsl = 7 in; Targ. Frictions: $\mu_1 = 0.015$, $\mu_2 = 0.08$, $\mu_3 = 0.08$
 Target Test: 3 Cycles of Equal Displacement; Target Vertical Load: 600 kips; Target Cyclic Displacement: 14 in



Vert Load: 592.4 kips avg, 666.0 kips max, 509.4 kips min; Velocity: 17.6 in/sec max, 10.2 in/sec avg; Shear Load: 88.2 kips max, -106.4 kips min

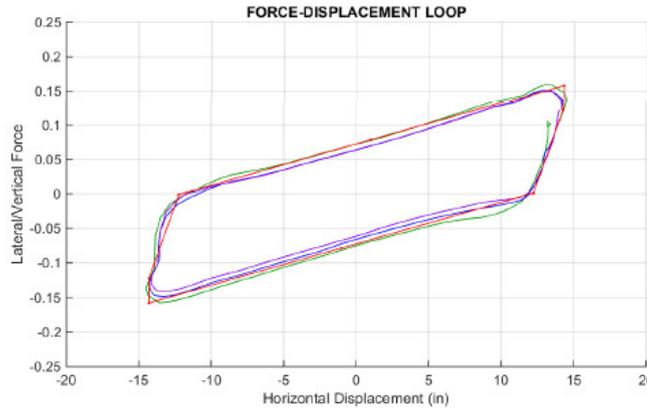
Data Results					Analytical Matching Results								
Cycle	Disp	EDC	Avg Fric	(H/V)max	(H/V)min	Disp	EDC	μ_1	μ_2	μ_3	Keff at 14"	β_{eff} at 14"	Teff at 14"
1	16.1	4.56	0.0709	0.164	-0.161	16.1	4.54	0.025	0.079	0.079	0.011241	0.2840	3.02
2	15.9	3.88	0.0612	0.152	-0.158	15.8	3.87	0.011	0.071	0.071	0.010632	0.2610	3.10
3	15.7	3.63	0.0577	0.149	-0.156	15.6	3.61	0.016	0.065	0.065	0.010281	0.2538	3.15

Average Bearing Properties @ 14" Displacement: $\mu_1 = 0.017$, $\mu_2 = 0.072$, $\mu_3 = 0.072$, Keff = 0.010718, $\beta_{eff} = 0.2663$, Teff = 3.09

Figura 48 Diagrama obtenido para la Prueba de Carga de Ensayo No. 2
 Fuente: (EPS, 2016)

30- Aug-2016 EPS Bearing Test Report for FPT8836/14-12/10-7, QC600 B3

Test Date: 8/30/2016 ; Test Time: 1:21:03 ; Test Data File: ECU.Rio.chone.8836.14.QC600.B3A.ASC
 Bearing Dim.: Rc = 88 Rsc = 12, IDc = 36, ODsc = 14, IDsc = 13, ODsi = 10, tsc = 1.1, hsi = 7 in; Targ. Frictions: $\mu_1 = 0.015$, $\mu_2 = 0.08$, $\mu_3 = 0.08$
 Target Test: 3 Cycles of Equal Displacement; Target Vertical Load: 600 kips; Target Cyclic Displacement: 14 in



Vert Load: 553.4 kips avg, 607.8 kips max, 487.5 kips min; Velocity: 16.9 in/sec max, 9.2 in/sec avg; Shear Load: 89.8 kips max, -92.1 kips min

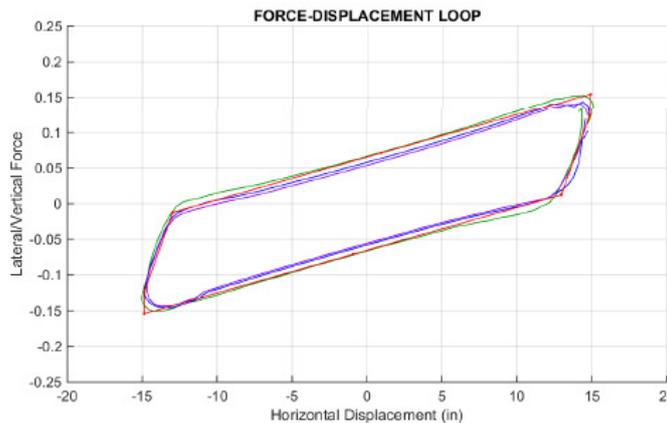
Data Results						Analytical Matching Results							
Cycle	Disp	EDC	Avg Fric	(H/V)max	(H/V)min	Disp	EDC	μ_1	μ_2	μ_3	Keff at 14"	β_{eff} at 14"	Teff at 14"
1	14.5	4.19	0.0723	0.160	-0.158	14.5	4.18	0.019	0.083	0.083	0.011456	0.2856	2.99
2	14.3	3.70	0.0648	0.151	-0.149	14.3	3.69	0.017	0.074	0.074	0.010866	0.2705	3.07
3	14.1	3.50	0.0619	0.149	-0.141	14.1	3.52	0.013	0.072	0.072	0.010709	0.2641	3.09

Average Bearing Properties @ 14" Displacement: $\mu_1 = 0.016$, $\mu_2 = 0.076$, $\mu_3 = 0.076$, Keff = 0.011010, $\beta_{eff} = 0.2734$, Teff = 3.05

Figura 49 Diagrama obtenido para la Prueba de Carga de Ensayo No. 3
 Fuente: (EPS, 2016)

30- Aug-2016 EPS Bearing Test Report for FPT8836/14-12/10-7, QC600 B4

Test Date: 8/30/2016 ; Test Time: 11:40:50 ; Test Data File: ECU.Rio.chone.8836.14.QC600.B4.ASC
 Bearing Dim.: Rc = 88 Rsc = 12, IDc = 36, ODsc = 14, IDsc = 13, ODsi = 10, tsc = 1.1, hsi = 7 in; Targ. Frictions: $\mu_1 = 0.015$, $\mu_2 = 0.08$, $\mu_3 = 0.08$
 Target Test: 3 Cycles of Equal Displacement; Target Vertical Load: 600 kips; Target Cyclic Displacement: 14 in



Vert Load: 595.3 kips avg, 653.9 kips max, 540.4 kips min; Velocity: 18.7 in/sec max, 10.6 in/sec avg; Shear Load: 84.5 kips max, -98.6 kips min

Data Results						Analytical Matching Results							
Cycle	Disp	EDC	Avg Fric	(H/V)max	(H/V)min	Disp	EDC	μ_1	μ_2	μ_3	Keff at 14"	β_{eff} at 14"	Teff at 14"
1	15.0	3.96	0.0658	0.153	-0.151	15.0	3.97	0.016	0.076	0.076	0.010976	0.2718	3.05
2	14.8	3.45	0.0581	0.144	-0.146	14.8	3.46	0.014	0.066	0.066	0.010346	0.2558	3.14
3	14.7	3.24	0.0551	0.141	-0.144	14.7	3.22	0.014	0.062	0.062	0.010078	0.2468	3.18

Average Bearing Properties @ 14" Displacement: $\mu_1 = 0.015$, $\mu_2 = 0.068$, $\mu_3 = 0.068$, Keff = 0.010467, $\beta_{eff} = 0.2581$, Teff = 3.13

Figura 50 Diagrama obtenido para la Prueba de Carga de Ensayo No. 4
 Fuente: (EPS, 2016)

En la *Figura 51* se puede analizar el Diagrama de Histéresis del comportamiento de los Aisladores TPF luego de los ensayos realizados, determinando desplazamientos ante sismos de diseño (15 plg.) y el máximo considerado (23 plg.). Estos desplazamientos son similares a los aisladores que inicialmente se instalaron en el puente.

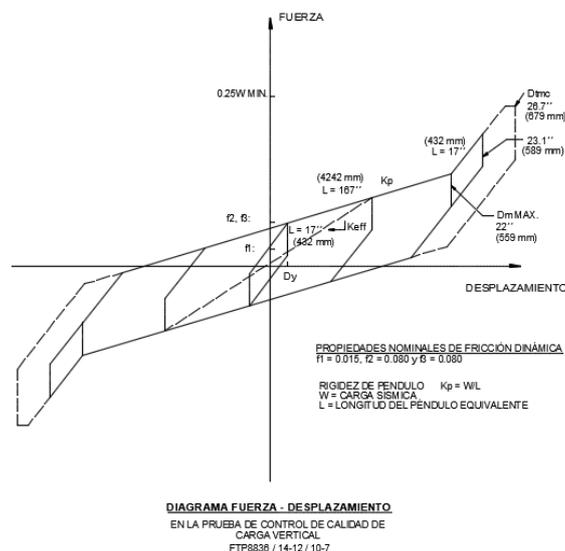


Figura 51 Diagrama de Histéresis (Fuerza – Desplazamiento) de ensayo

Fuente: (EPS, 2016)

5.9. Resumen

Las investigaciones analítica y experimental han permitido entender el comportamiento de los sistemas de aislamiento de base, en este caso friccionales. Su uso inicia con el de simple péndulo, posteriormente se utiliza el aislador sísmico de doble péndulo friccionante, hasta llegar al aislador de triple péndulo friccionante que es el que se analiza específicamente, en la presente tesis. El aislador triple péndulo friccionante, por ser un sistema con cuatro superficies deslizantes y bordes de restricción que limitan los desplazamientos, considera en su diseño propiedades como coeficientes de fricción y radios de curvatura que inciden en el deslizamiento de las superficies internas y externas, por lo cual en un aislador TPF típico, a medida que aumenta el desplazamiento del rodamiento, las superficies sobre las que se produce el deslizamiento cambian. Se representó brevemente las relaciones fuerza – desplazamiento en base a cada uno de los ciclos de ensayo realizados a los aisladores previstos para el reemplazo de los existentes en la pila No.12 del puente “Los Caras”. Esta información sumada al diagrama de histéresis permite conectar la teoría

presentada en el capítulo II, relacionada a las cinco fases de los aisladores del puente los “Los Caras”.

Se finaliza con la interpretación de figuras y tablas existentes en este capítulo, determinando, energía disipada, rigidez efectiva, amortiguamiento efectivo, fuerza máxima horizontal y máximo desplazamiento horizontal.

En el siguiente capítulo se procede a realizar el análisis numérico de cada una de las fases de comportamiento de los aisladores tipo FP, en función de los datos y parámetros obtenidos por parte de la empresa EPS.

Se pretende someter a validación estos resultados empleando el software 3pleANI a fin de entender el desempeño de los aisladores según la demanda existente y determinada en la fase de diseño.

CAPÍTULO VI

MODELO NUMÉRICO DE ANÁLISIS DE AISLADORES TRIPLE PÉNDULO FRICCIONANTES

6.1. Introducción

Las propiedades mecánicas que son predecibles en función de la demanda, específicamente, en términos de características de rigidez y amortiguación, son importantes para lograr el rendimiento de diseño sísmico deseado, por lo cual, en este capítulo se realiza un análisis numérico teórico, basado en las características del aislador tipo TPF 8836/14-12/10-7, utilizado en el Puente “Los Caras”. Se analizan cada uno de sus cinco regímenes de transición, en función de las propiedades geométricas y consideraciones empleadas en el diseño de los mismos. Los resultados obtenidos son verificados a través del software 3pleANI, a fin de obtener secuencias iterativas, a través del ingreso de variables propias del diseño, como principalmente coeficientes de fricción.

Mediante este análisis se determinan las siguientes características dinámicas de comportamiento: energía disipada, rigidez efectiva, amortiguamiento efectivo, fuerza máxima horizontal y máximo desplazamiento horizontal.

6.2. Análisis Numérico de Aisladores TPF por Regímenes de Comportamiento

El sistema de aislamiento sísmico que fue adoptado para el Puente “Los Caras” es de tipo TPF, caracterizado por un complejo comportamiento basado en regímenes de fuerza - desplazamiento. Posee 12 parámetros geométricos y 4 parámetros friccionales que lo definen, como se puede apreciar en la *Figura 52*.

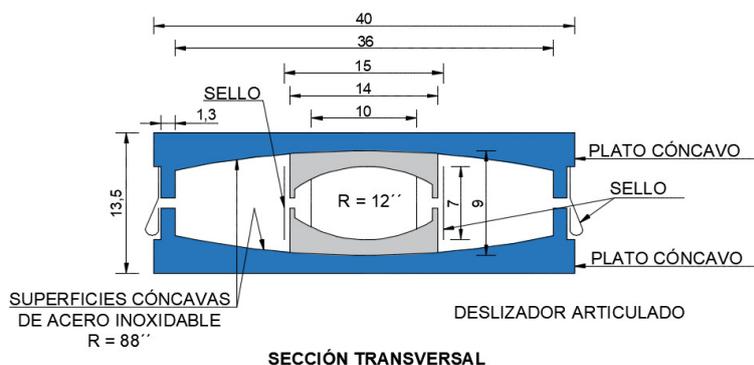


Figura 52 Corte de Sección de Aislador Sísmico empleado en el Puente “Los Caras”

En la Tabla 8 se presentan los parámetros geométricos de diseño para los aisladores sísmicos colocados en el puente “Los Caras”, proporcionados por parte de la fábrica EPS.

Tabla 8

Parámetros Geométricos del Aislador TPF 8836/14-12/10-7

Parámetros	Valores
$R_1 = R_4$	88
$R_2 = R_3$	12
h_1	4,5
h_2	3,5
$d_1 = d_4$	11
$d_2 = d_3$	1,5

La carga sísmica (CM + % CV) es igual a 600kips.

6.3. Comportamiento de Fases:

En el Capítulo II, se describió la nomenclatura para las fórmulas que se emplearán en el presente análisis numérico.

El radio efectivo está dado por la fórmula:

$$R_{i,eff} = R_i - h_i, \text{ para } i = 1,2,3,4$$

$$R_{eff1=4} = R_1 - h_1$$

$$R_{eff1=4} = 88 - 4,5$$

$$R_{eff1=4} = 83,5$$

$$R_{eff2=3} = R_2 - h_2$$

$$R_{eff2=3} = 12 - 3,5$$

$$R_{eff2=3} = 8,5$$

La capacidad de desplazamiento de cada cara deslizante está dada por:

$$d_i^* = \frac{R_{i,eff}}{R_i} * d_i, \text{ para } i = 1,2,3,4$$

$$d_{1=4}^* = \frac{R_{eff1}}{R_1} * d_1$$

$$d_{1=4}^* = \frac{83,5}{88} * 11$$

$$d_{1=4}^* = 10,438$$

$$d_{2=3}^* = \frac{R_{eff2}}{R_2} * d_2$$

$$d_{2=3}^* = \frac{8,5}{12} * 1,5$$

$$d_{2=3}^* = 1,0625$$

Se presentan los resultados obtenidos en la Tabla 9:

Tabla 9

Resumen de Parámetros Obtenidos

Parámetros	Valores
$R_{eff1}=R_{eff4}$	83,5
$R_{eff2}=R_{eff3}$	8,5
$d_1^*=d_4^*$	10,438
$d_2^*=d_3^*$	1,0625

6.3.1. Régimen de Análisis Fase I

Comienza desde el reposo, el deslizamiento inicia en la superficie cuando la fuerza horizontal transmitida a través del aislador, F , excede la superficie de la fuerza de fricción:

$$F_{fi} = \mu_i * W$$

Dónde:

F_f = Fuerza de Fricción, $i=1,2,3,4$

μ_i = Coeficiente de Fricción

W = Carga Vertical en el Aislador

Al respecto, se consideraron los coeficientes de fricción promedio, señalados en el Reporte de Ensayos Dinámicos realizados a los aisladores sísmicos por parte de EPS; sin embargo, el valor del coeficiente de fricción nominal μ_4 , se lo mayoró en un 10% del establecido para μ_1 , a fin de que se pueda cumplir con el análisis ideal de cada uno de los regímenes de comportamiento establecido en el modelo de la serie teórica de Fenz y Constantinou, en la que la condición que se busca aplicar con los coeficientes de fricción es: $\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 < \mu_4$. Esta condición permite modelar el comportamiento de los aisladores TPF, en todos los regímenes de operación, siempre que se apliquen los supuestos básicos de la teoría antes citada (Sarlis & Constantinou, 2013).

Hasta ahora, el comportamiento del aislador TPF se ha descrito para la configuración totalmente adaptable de propiedades en las que $\mu_2 = \mu_3 < \mu_1 < \mu_4$. En este caso, existen múltiples fases deslizantes y, en consecuencia, múltiples cambios en la rigidez. Las configuraciones más simples son las más probables de ser implementadas para contextualización y comprensión del funcionamiento. (Daniel M Fenz & Michalakis C Constantinou, 2006).

En la Tabla 10, se presentan los coeficientes de fricción a ser empleados en el análisis numérico del comportamiento de los aisladores tipo TPF del puente “Los Caras”.

Tabla 10

Datos de Coeficientes de Fricción empleados para el análisis

Carga	Numero de aisladores	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4
600	4	0.08	0.015	0.015	0.088

Una vez que se determinaron los coeficientes de fricción, se calculan las Fuerzas de Fricción correspondientes al sistema:

$$F_{f1} = \mu_1 * W$$

$$F_{f1} = 0,08 * 600$$

$$F_{f1} = 48Kips$$

$$F_{f2=3} = \mu_{2=3} * W$$

$$F_{f2=3} = 0,015 * 600$$

$$F_{f2=3} = 9Kips$$

$$F_{f4} = \mu_4 * W$$

$$F_{f4} = 0,088 * 600$$

$$F_{f4} = 52,8Kips$$

A continuación, se procede con el cálculo de la Fuerza en el instante que el deslizador comienza a apoyarse en el dispositivo de contención de desplazamiento:

$$F_{dr1} = \frac{W}{R_{eff1}} * d_1 + F_{f1}$$

$$F_{dr1} = \frac{600}{83,5} * 11 + 48$$

$$F_{dr1} = 127,042$$

$$F_{dr2=3} = \frac{W}{R_{eff2=3}} * d_2 + F_{f2}$$

$$F_{dr2=3} = \frac{600}{8,5} * 1,5 + 9$$

$$F_{dr2=3} = 114,882$$

$$F_{dr4} = \frac{W}{R_{eff4}} * d_4 + F_{f4}$$

$$F_{dr4} = \frac{600}{83,5} * 11 + 52,8$$

$$F_{dr4} = 131,842$$

Posteriormente, se procede a calcular la Fuerza Lateral equivalente de acuerdo con la primera fase de deslizamiento, analizando la superficie 1:

$$F = F_{f1}$$

$$F = 48Kips$$

Para comprobar este análisis se asume que el desplazamiento relativo u_2 , es suficientemente pequeño comparado con el radio efectivo R_{eff2} , por lo que, se obtiene el siguiente valor en la superficie 2:

$$u_2 = (\mu_1 - \mu_2)R_{eff2}$$

$$u_2 = (0,08 - 0,015) * 8,5$$

$$u_2 = 0,5525$$

Aplicando la Ecuación (11), se puede comprobar que la Fuerza entre los Regímenes I y II, está dada por:

$$F = \frac{W}{R_{eff2}} u_2 + F_{f2}$$

$$F = \frac{600}{8,5} * 0,5525 + 9$$

$$F = 48Kips$$

Para calcular el desplazamiento de Transición entre el Régimen I y el Régimen II, se debe considerar que:

$$u^* = (\mu_1 - \mu_2)R_{eff2} + (\mu_1 - \mu_3)R_{eff3}$$

$$u^* = (0,08 - 0,015) * 8,5 + (0,08 - 0,015) * 8,5$$

$$u^* = 1,105plg$$

La relación Fuerza - Desplazamiento Total para el aislador durante el Régimen de Deslizamiento I viene dado por:

$$F = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff3}}u + \frac{F_{f2}R_{eff2} + F_{f3}R_{eff3}}{R_{eff2} + R_{eff3}}$$

En donde, se emplea para el valor de $u = u^*$

$$F = \frac{600}{8,5 + 8,5} * 1,105 + \frac{9 * 8,5 + 9 * 8,5}{8,5 + 8,5}$$

$$F = 48Kips$$

En la *Figura 53*, se muestra la curva de histéresis del Régimen I, donde la Fuerza está dividida para la carga.

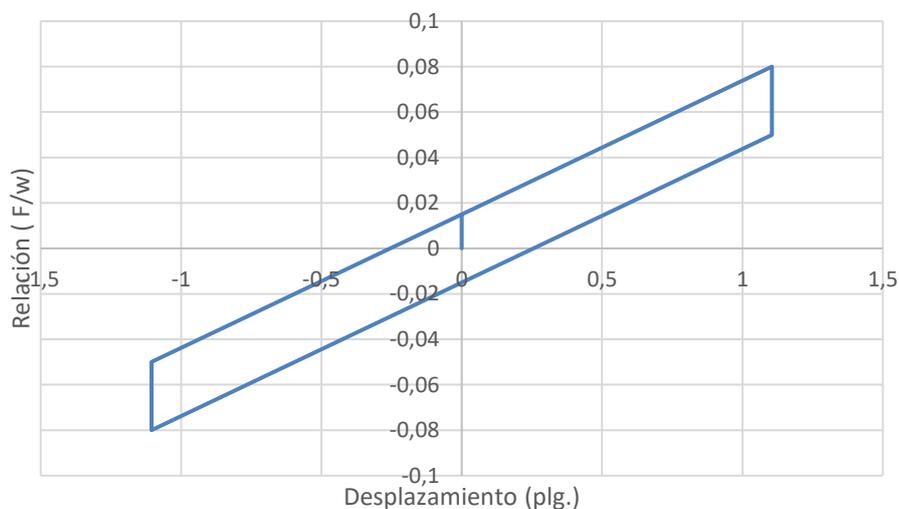


Figura 53 Diagrama de Histéresis del Régimen I para el aislador TPF8836/14-12/10-7

6.3.2. Régimen de Análisis Fase II

Cuando $F = F_1$, el movimiento comienza en la superficie 1 y se marca la transición para el inicio del Régimen de Desplazamiento II.

Para calcular el desplazamiento de Transición entre el Régimen II y el Régimen III se debe considerar que:

$$u^{**} = u^* + (\mu_4 - \mu_1)(R_{eff1} + R_{eff3})$$

$$u^{**} = 1,105 + (0,088 - 0,08)(83,5 + 8,5)$$

$$u^{**} = 1,841plg$$

A continuación, se procede a obtener el valor de la Fuerza Lateral Equivalente de acuerdo con el siguiente detalle:

$$F = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff3}} u + \frac{F_{f1}(R_{eff1} - R_{eff2}) + F_{f2}R_{eff2} + F_{f3}R_{eff3}}{R_{eff1} + R_{eff3}}$$

$$F = \frac{600}{83,5 + 8,5} * 1,841 + \frac{48(83,5 - 8,5) + 9 * 8,5 + 9 * 8,5}{83,5 + 8,5}$$

$$F = 52,8Kips$$

Para el análisis del desplazamiento relativo de la Superficie 3 se tiene

$$u_3 = (\mu_4 - \mu_3)R_{eff3}$$

$$u_3 = (0,088 - 0,015) * 8,5$$

$$u_3 = 0,6205$$

Aplicando la fórmula (12), se puede probar que la fuerza entre los Regímenes II y III está dada por:

$$F = \frac{W}{R_{eff3}} u_3 + F_{f3}$$

$$F = \frac{600}{8,5} * 0,625 + 9$$

$$F = 52,8Kips$$

En la *Figura 54*, se muestra la curva de histéresis fuerza deformación del régimen II.

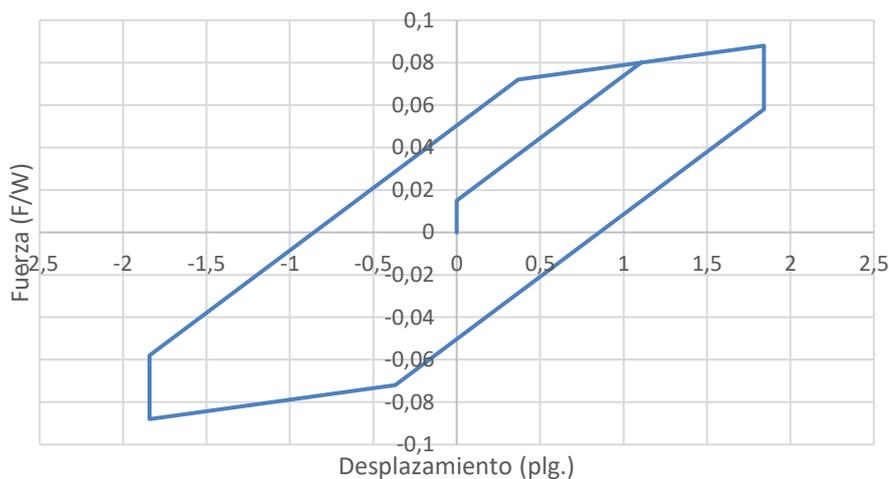


Figura 54 Diagrama de Histéresis del Régimen II para el aislador TPF 8836/14-12/10-7

6.3.3. Régimen de Análisis Fase III

El deslizamiento se inicia en la superficie 4 cuando $F = F_{f4}$, ocurriendo el desplazamiento u^{**} dado por la transición existente entre el Régimen II y el Régimen III, que se calculó anteriormente:

Como desplazamiento de transición entre el límite del Régimen III y IV se tiene que:

$$u_{dr1} = u^{**} + d_1 \left(1 + \frac{R_{eff4}}{R_{eff1}} \right) - (\mu_4 - \mu_1)(R_{eff1} + R_{eff4})$$

$$u_{dr1} = 1,841 + 11 \left(1 + \frac{83,5}{83,5} \right) - (0,088 - 0,08)(83,5 + 83,5)$$

$$u_{dr1} = 22,505$$

En este sentido, se procede a obtener la relación fuerza - desplazamiento con la fórmula expuesta a continuación; la que caracteriza la reducción de la rigidez y aumento de la fricción efectiva de acuerdo al siguiente detalle:

$$F = \frac{W}{R_{eff1} + R_{eff4}} u + \frac{F_{f1}(R_{eff1} - R_{eff2}) + F_{f2}R_{eff2} + F_{f3}R_{eff3} + F_{f4}(R_{eff4} - R_{eff3})}{R_{eff1} + R_{eff4}}$$

$$F = \frac{600}{83,5 + 83,5} * 22,505 + \frac{48(83,5 - 8,5) + 9 * 8,5 + 9 * 8,5 + 52,8 * (83,5 - 8,5)}{83,5 + 83,5}$$

$$F = 127,042Kips$$

En la *Figura 55* se muestra la curva de histéresis del régimen III.

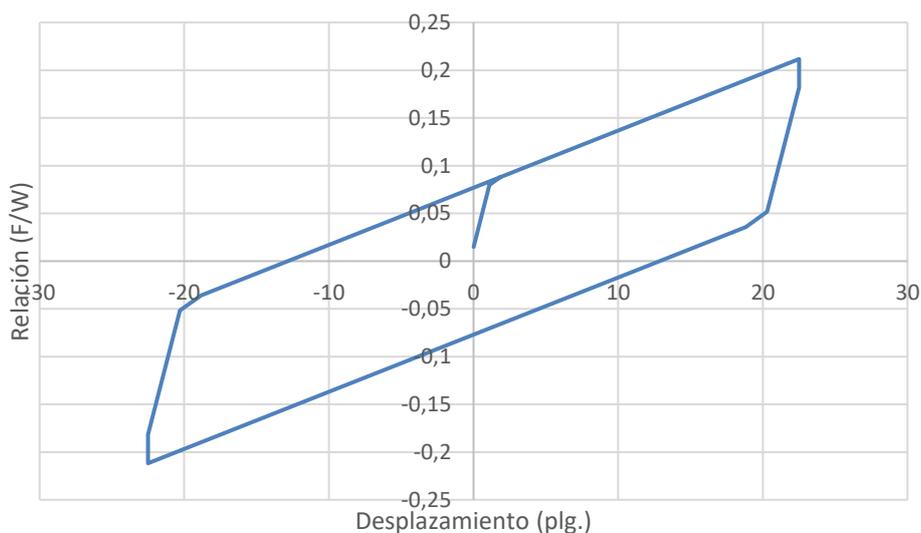


Figura 55 Diagrama de Histéresis del Régimen III para el aislador TPF 8836/14-12/10-7

6.3.4. Régimen de Análisis Fase IV

El movimiento continúa en las superficies 1 y 4, hasta que se consume la capacidad de desplazamiento en la superficie 1 y el deslizador móvil entra en contacto con el limitador de la superficie 1. El desplazamiento máximo de transición entre el Régimen IV y V, se presenta de acuerdo al siguiente detalle:

$$u_{dr4} = u_{dr1} + \left[\left(\frac{d_4}{R_{eff4}} + \mu_4 \right) - \left(\frac{d_1}{R_{eff1}} + \mu_1 \right) \right] (R_{eff2} + R_{eff4})$$

$$u_{dr4} = 22,505 + \left[\left(\frac{11}{83,5} + 0,088 \right) - \left(\frac{11}{83,5} + 0,08 \right) \right] (8,5 + 83,5)$$

$$u_{dr4} = 23,241 \text{ plg}$$

A continuación, se procede a obtener la relación fuerza - desplazamiento, de acuerdo al siguiente detalle:

$$F = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff4}} (u - u_{dr1}) + \frac{W}{R_{eff1}} d_1 + F_{f1}$$

$$F = \frac{600}{8,5 + 83,5} (23,241 - 22,505) + \frac{600}{83,5} * 11 + 48$$

$$F = 131,842 \text{ Kips}$$

En la *Figura 56*, se muestra la curva de histéresis del régimen IV donde la Fuerza está dividida para la carga.

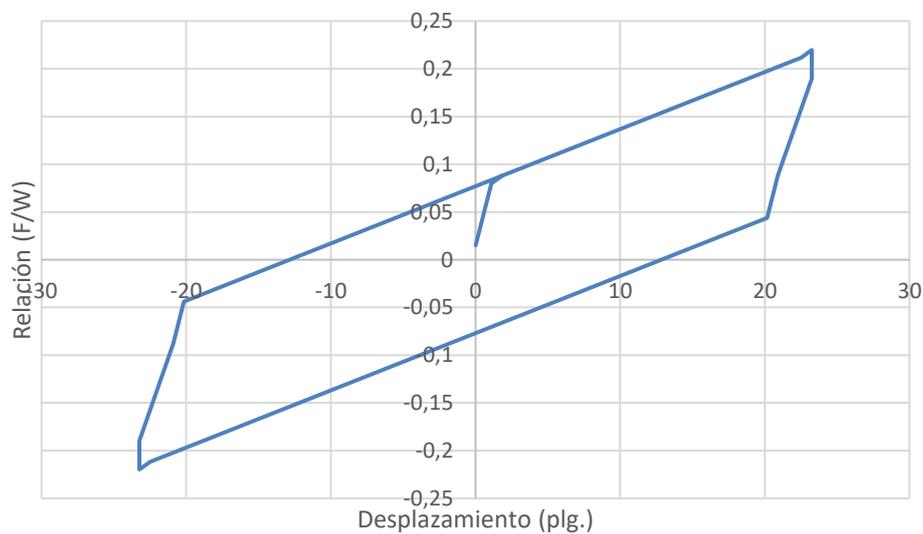


Figura 56 Diagrama de histéresis del Régimen IV para el aislador TPF 8836/14-12/10-7

6.3.5. Régimen de Análisis Fase V

$$u_{max} = 2 * d_1^* + 2 * d_2^*$$

$$u_{max} = 2 * 10,438 + 2 * 1,063$$

$$u_{max} = 23plg$$

En este caso, se considerará según los resultados de la prueba del fabricante una mayoración de +0,3plg., a fin de analizar el comportamiento histerético en este régimen en referencia al desplazamiento de transición del anterior régimen.

$$u_{max} = 23,3plg$$

$$F = \frac{W}{R_{eff2} + R_{eff3}} (u - u_{dr4}) + \frac{W}{R_{eff4}} d_4 + F_{f4}$$

$$F = \frac{600}{8,5 + 8,5} (23,3 - 23,241) + \frac{600}{83,5} * 11 + 52,8$$

$$F = 133,924Kips$$

En la *Figura 57* se muestra la curva de histéresis del Régimen V donde la Fuerza está dividida para la carga.

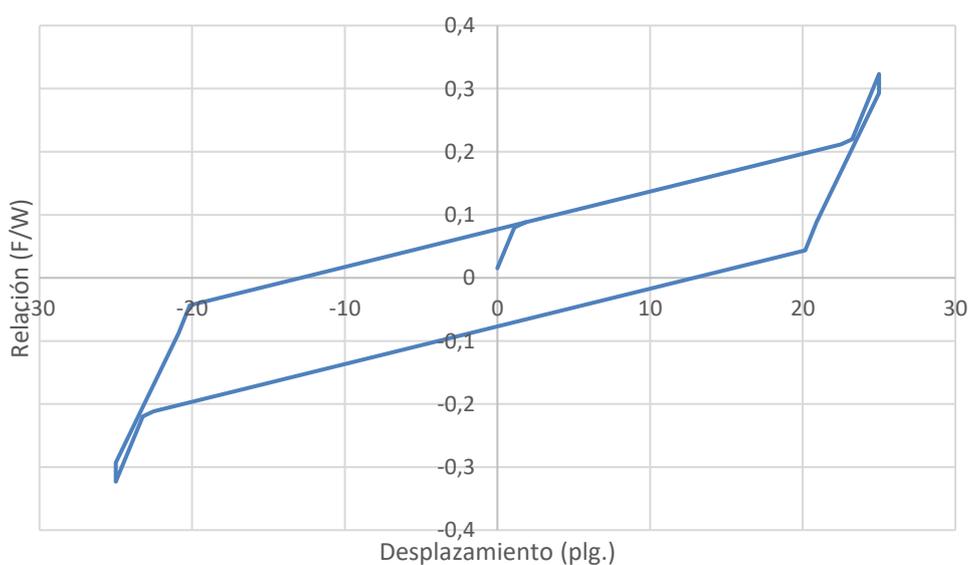


Figura 57 Diagrama de histéresis del Régimen V para el aislador TPF 8836/14-12/10-7

6.4. Resumen de Regímenes de Desplazamiento en los Aisladores Sísmicos de la Pila No. 12.

En la *Figura 58* se determinan las cinco fases del aislador tipo TPF 8836/14-12/10-7, instalados en el 2008; modelados en base a la teoría descrita en el capítulo II. En la Tabla 11 se determinan los parámetros de EDC = Energía disipada por ciclo ; k_{eff} = Rigidez Efectiva; β_{eff} = Amortiguamiento Efectivo; F_{maxh} = Fuerza Máxima Horizontal y u_{maxh} = Máximo Desplazamiento Horizontal.

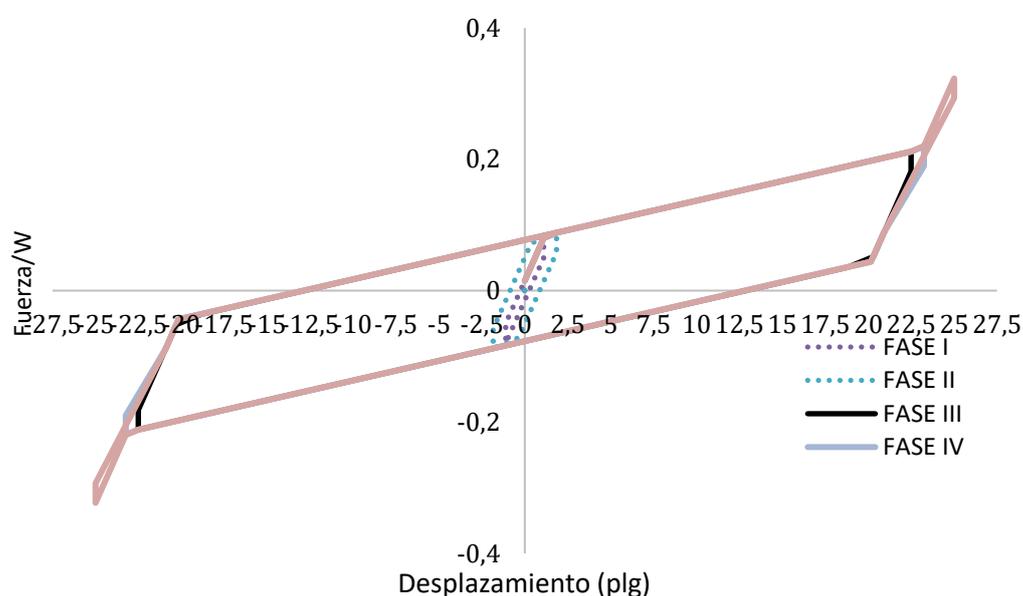


Figura 58 Diagrama de Histéresis con cinco fases del Aislador Sísmico Empleados en el Puente “Los Caras”

Tabla 11

Prueba de Control de Calidad

Aislador	Fase	F_{maxh} (%W)	u_{maxh}	EDC	k_{eff}	β_{eff}
		Kips	plg	(kips-plg)	(kips/plg)	(%)
Pila 12	1	0.08	1.11	0.07	0.07	23.87
	2	0.09	1.84	0.32	0.05	62.67
	3	0.21	22.51	6.74	0.01	45.05
	4	0.22	23.24	6.85	0.01	42.70
	5	0.32	25.00	6.89	0.01	27.15

Fuente: (EPS, 2007)

Analíticamente se puede observar en la *Figura 58*, que la curva Fuerza - Deformación tiene características histeréticas y de la Tabla 11 se puede indicar las siguientes observaciones:

- La rigidez efectiva en las dos primeras fases es mayor que en las fases III, IV y V;
- La rigidez efectiva de las fases III, IV y V es 0.01 (kips/plg.);
- La Energía disipada en los tres últimas fases es significativamente mayor a las dos primeras;
- El desplazamiento máximo horizontal está asociado a las fases III y IV(23 plg. \pm 0,3 plg.);
- La fuerza horizontal de diseño es 0.20 W.

6.5. Especificaciones de Diseño del Sistema de Aisladores TPF8836/14-12/10-7 para el puente “Los Caras”, en base al software 3pleANI.

En la Universidad de Buffalo, se desarrolló en el software MatLab, una interface denominada 3pleANI, que permite integrar todos los parámetros de diseño para un aislador friccional. En base a este software se presenta la verificación de lo descrito analíticamente en las secciones anteriores del aislador tipo TPF 8836/14-12/10-7, sustentada en la teoría descrita en el capítulo II. Esta interface de análisis estructural es capaz de realizar un sofisticado análisis y animación bidimensional de los aisladores de péndulo friccional, que no están disponibles en otros softwares comerciales.

Los parámetros utilizados en la interface propuesta, son los mismos que se utilizaron para el análisis sísmico del aislador TPF8836/14-12/10-7.

Los aisladores de TPF, se pueden modelar atendiendo dos teorías diferentes desarrolladas por Sarlis y Constantinou (2013), quienes en sus estudios consideran la teoría de momento y equilibrio para utilizar un total de 8 grados de libertad, a fin de monitorear el movimiento del aislador en una dirección simple.

Para explicar el funcionamiento del software se presenta las propiedades del aislador TPF8836/14-12/10-7 como se muestran en la Tabla 12 y los parámetros establecidos de acuerdo a la *Figura 59*.

Se debe considerar que el coeficiente de fricción especificado en el programa 3pleANI funciona como si las interfaces deslizantes fueran planas. Por otra parte, si se realiza una comparación con los aisladores TPF cuando son testeados, los valores de la fricción son afectados por: la geometría esférica de la superficie de deslizamiento del aislador, la ubicación y dirección de la suma resultante de la tracción en la superficie deslizante.

Tabla 12

Propiedades del aislador TPF8836/14-12/10-7 ubicado en el puente “Los Caras”.

Parámetros	Valores que serán usados en 3pleANI (Modelo de equilibrio de momentos)
$R_1 = R_4$ (pulgadas)	88
$R_2 = R_3$ (pulgadas)	12
Capacidad de desplazamiento en las superficies 1 y 4 (pulgadas)	$d_1 = d_4 = 11,45''$
Capacidad de desplazamiento en las superficies 2 y 3 (pulgadas)	$d_2 = d_3 = 2,25''$
Superficie de fricción 1	$\mu_1 = 0,08$
Superficie de fricción 2 y 3	$\mu_2 = \mu_3 = 0,015$
Superficies de fricción 4	$\mu_4 = 0,088$
$h_1 = h_4$ (pulgadas)	4,5''
$h_2 = h_3$ (pulgadas)	3,5''
$d_{*i} = d_i \left(\frac{R_{effi}}{R_i} \right), R_{effi} = R_i - h_i$	Los valores de fricción aplican para condiciones de alta velocidad = f_{max}

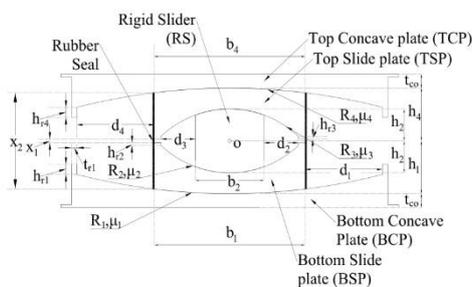


Figura 59 Parámetros a ingresar en 3pleANI de acuerdo a la nomenclatura en inglés para un aislador TPF

Fuente: (Sarlis & Constantinou, 2013)

6.5.1. Prueba controlada de desplazamiento mediante software 3pleANI

Con la finalidad de explicar el modelamiento de un aislador con sus propiedades como se muestra en la Tabla 12, se aplica un desplazamiento de 1 ciclo sinusoidal con un periodo de 6 segundos y amplitud de acuerdo con los regímenes especiales y con el análisis numérico. El peso vertical se especifica como 600 kips.

Para el análisis en el software 3pleANI se presenta la *Figura 60*, que indica la ventana donde se ingresa los parámetros de diseño del aislador sísmico. Nótese que para el ingreso de los coeficientes de fricción se considera un análisis independiente de la velocidad. Este software tiene la capacidad de mostrar las curvas de histéresis de Fuerza - Desplazamiento como se ve en la *Figura 61*.

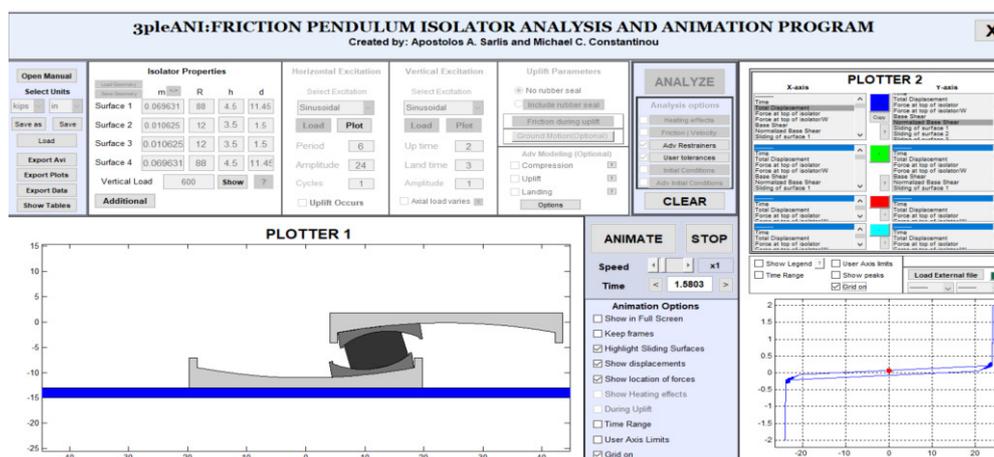


Figura 60 Imágenes del Puente “Los Caras” y su diseño estructural con aisladores sísmicos.

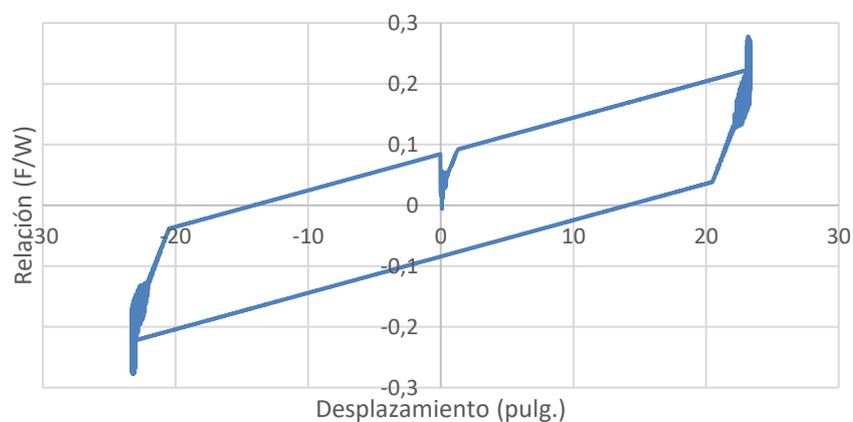


Figura 61 Ejemplo de la Curva de Histéresis del Aislador TPF8836/14-12/10-7 con una amplitud de 23 plg.

6.5.2. Análisis de los cinco regímenes del aislador TPF8836/14-12/10-7 que se encuentra en el puente “Los Caras”.

El aislador TPF tiene un comportamiento complejo con varios regímenes de comportamiento. Mientras el desplazamiento se incrementa, existen múltiples cambios en la rigidez y la fuerza. Generalmente, cuando los niveles de fuerza y desplazamiento son bajos el sistema es muy rígido, comparado con un nivel de diseño donde existe rigidez más baja, para luego tener un comportamiento diferente en el evento máximo considerado donde existe mayor rigidez para controlar el desplazamiento. Esto da lugar a un sistema adaptativo que puede ser optimizado para varios niveles de rendimiento (McVitty & Constantinou, 2015).

A continuación, se presentan los diagramas de histéresis arrojados por el software 3pleANI los que serán presentados en los diferentes regímenes para posteriormente comparar con los obtenidos analíticamente.

6.5.2.1. Régimen I

Este régimen consiste en el análisis del deslizamiento en las superficies 2 y 3, sin que el mismo avance a las superficies 1 y 4, para lo cual, el movimiento comienza desde el reposo, cuando la fuerza horizontal excede a la fuerza de fricción en la superficie de menor fricción. En la *Figura 62* se muestra los parámetros que se ingresó para el modelamiento.

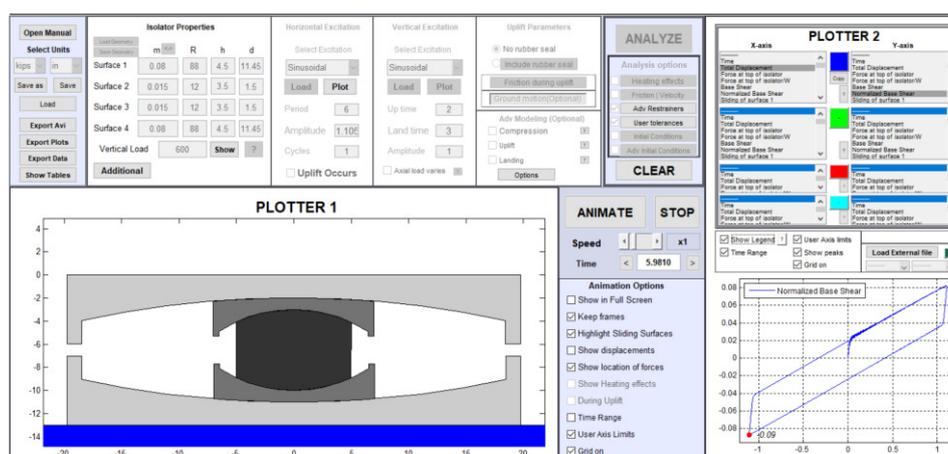


Figura 62 Interface 3pleANI (Visualización de Aislador). Parámetros de Diseño y Curva Régimen I.

Fuente: Cortesía Constantinou 2018

Para obtener los valores de la *Figura 63*, se tomaron los valores de desplazamiento y fuerza para ser exportados a una hoja de cálculo Excel y así obtener la curva de histéresis para el régimen I.

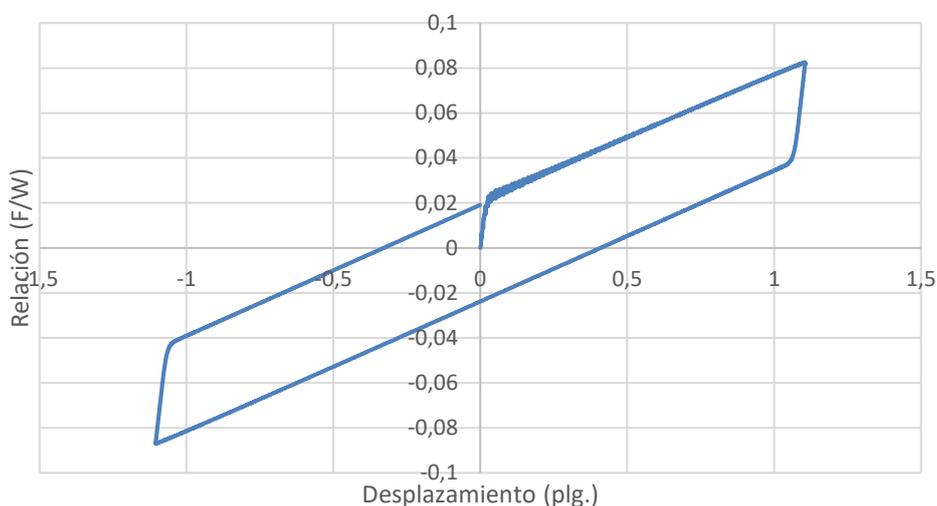


Figura 63 Curva de Histéresis Régimen I

6.5.2.2. Régimen II

Este régimen comienza con el deslizamiento en la superficie 1, marcando el inicio del Régimen II. En la *Figura 64* se muestra una visualización de la interface 3pleANI en esta fase.

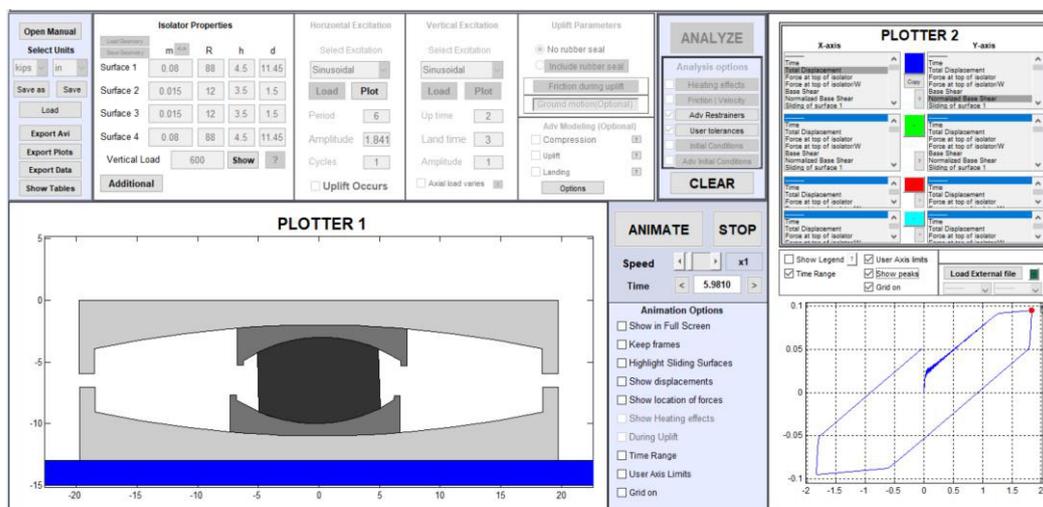


Figura 64 Interface 3pleANI (Visualización de Aislador). Parámetros de Diseño y Curva Régimen II.

Fuente: Cortesía Constantinou 2018

Para obtener los valores de la *Figura 65*, de igual manera los valores de desplazamiento y fuerza son exportados a una hoja de cálculo Excel, con el fin de graficar la curva de histéresis para el régimen II. Los valores pico de fuerza llegan a 0.1 en el modelamiento de la curva de histéresis.

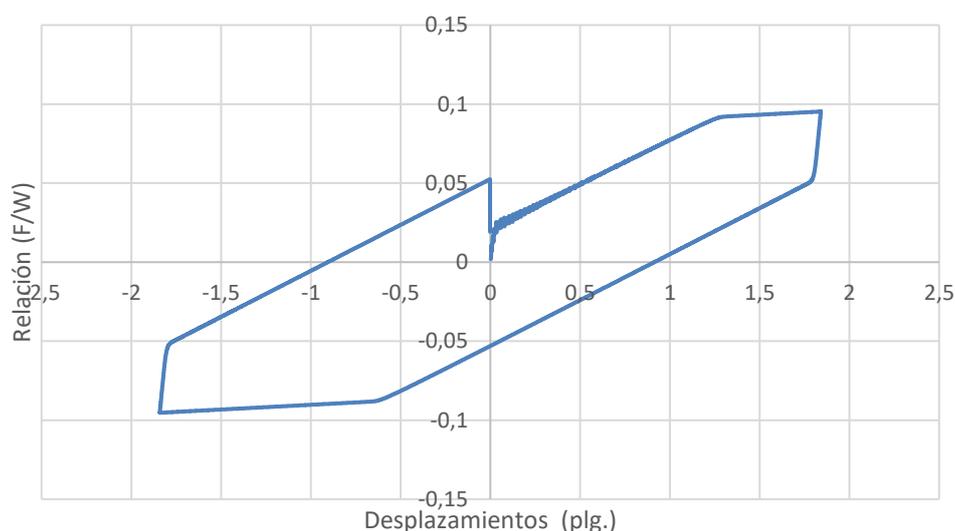


Figura 65 Curva de Histéresis Régimen II

6.5.2.3. Régimen III

Para este régimen el deslizamiento se inicia en la superficie 4. En la *Figura 66* se muestra una visualización de la interface 3pleANI en esta fase.

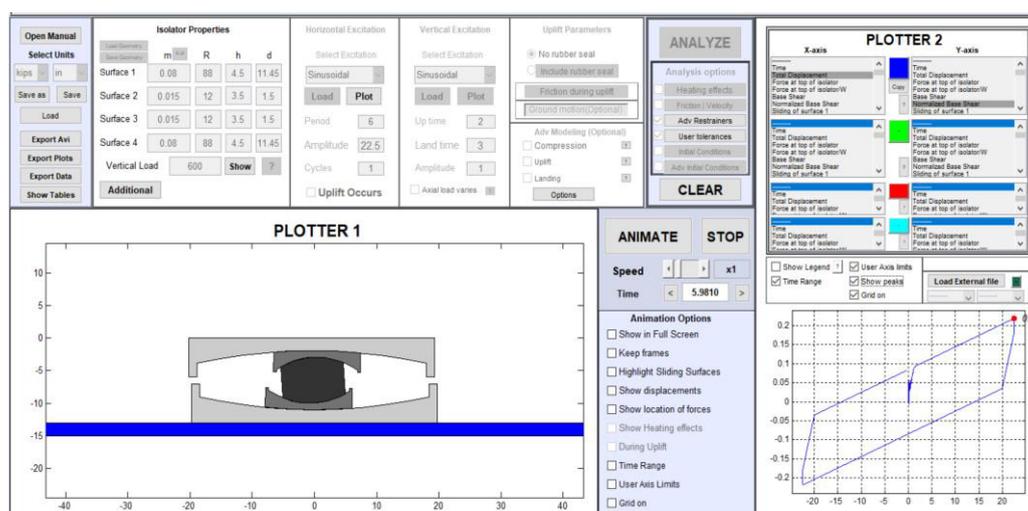


Figura 66 Interface 3pleANI (Visualización de Aislador). Parámetros de Diseño y Curva Régimen III.

Fuente: Cortesía Constantinou 2018

Para obtener los valores de la *Figura 67*, se tomaron los valores de desplazamiento y fuerza para ser exportados a una hoja de cálculo y así obtener la curva de histéresis para el régimen III.

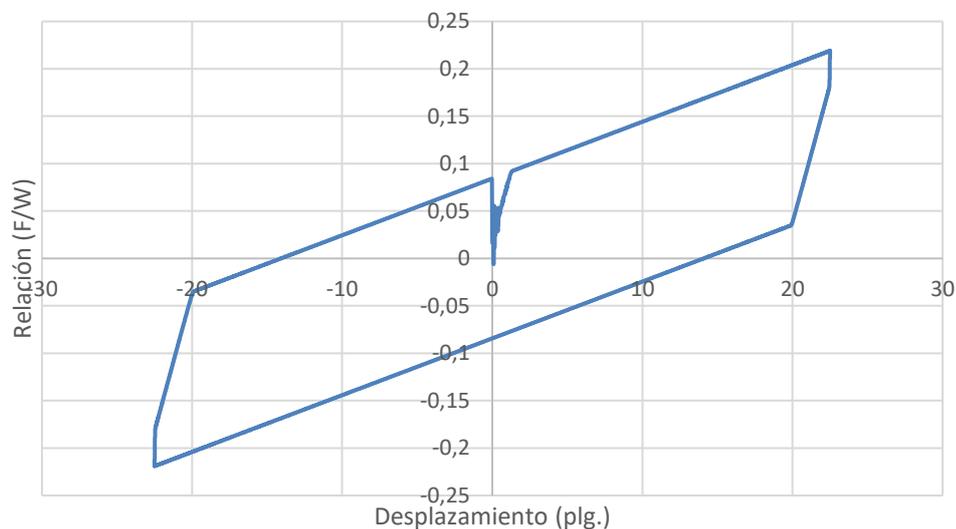


Figura 67 Curva de Histéresis Régimen III

6.5.2.4. Régimen IV

El régimen de deslizamiento IV comienza cuando el contacto se realiza con el limitador de desplazamiento en la superficie 1, cambiando los deslizamientos desde las superficies 1 y 4 a las superficies 2 y 4. De igual forma los parámetros son ingresados al software de diseño, como se puede ver en la *Figura 68*.

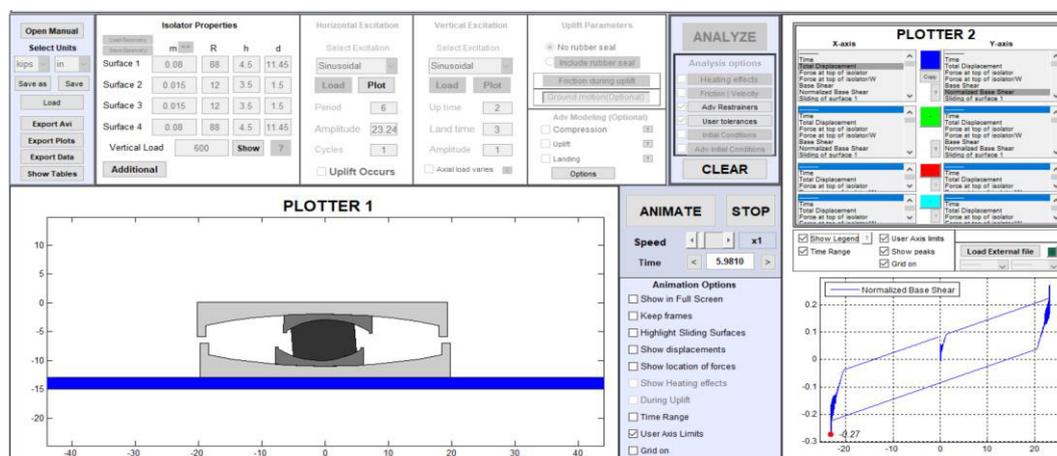


Figura 68 Interface 3pleANI (Visualización de Aislador). Parámetros de Diseño y Curva Régimen IV.

Fuente: Cortesía Constantinou 2018

Para obtener los valores de la *Figura 69*, se siguió el mismo procedimiento detallado anteriormente, obteniendo la curva de histéresis para el régimen IV. Los valores pico de fuerza llegan a 0.23 en el modelamiento de la curva de histéresis.

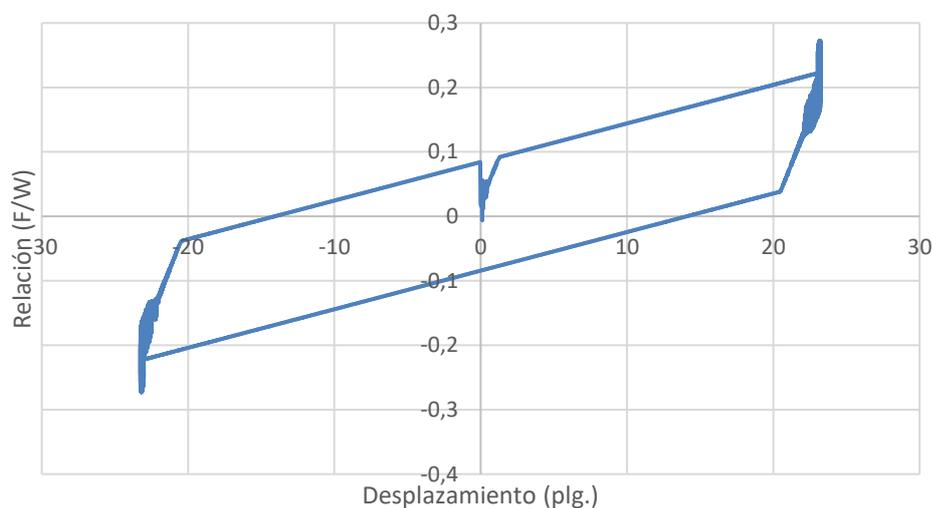


Figura 69 Curva de Histéresis Régimen IV

6.5.2.5. Régimen V

El régimen de deslizamiento V comienza cuando se hace contacto con el limitador de desplazamiento en la superficie 4. Los cambios de movimiento desde el deslizamiento en las superficies 2 y 4 hasta el deslizamiento en las superficies 2 y 3, están acompañados por una mayor rigidez.

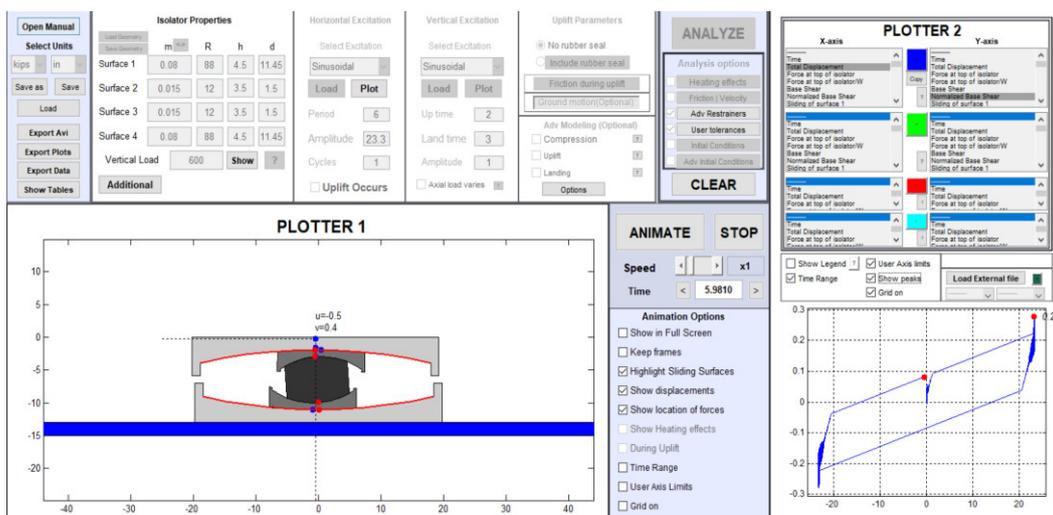


Figura 70 Interface 3pleANI (Visualización de Aislador). Parámetros de Diseño y Curva Régimen V.

Fuente: Cortesía Constantinou 2018

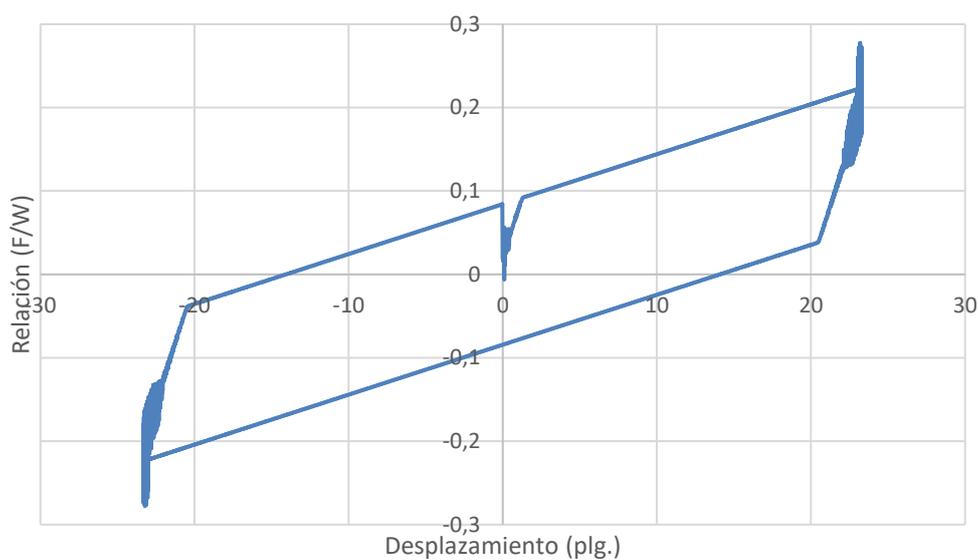


Figura 71 Curva de Histéresis Régimen V

En la *Figura 72* se muestra el último régimen con el desplazamiento máximo.

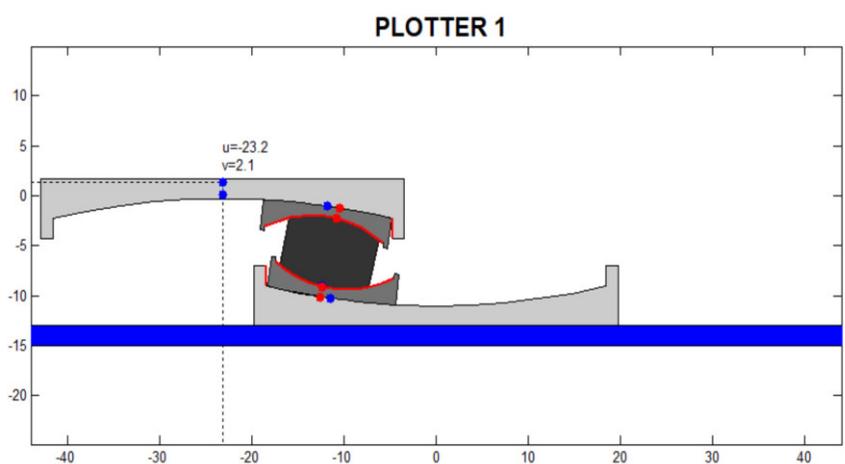


Figura 72 Modelamiento del régimen V, en donde se aprecia el contacto del núcleo interior con los limitadores de movimiento, debido al máximo desplazamiento del aislador TPF8836/14-12/10-7

Se calculó y comparó los diagramas de histéresis con los modelos numéricos y el modelamiento con el software 3pleANI, de esta manera se comparó los diferentes parámetros en cada régimen de las *Figuras 73* y *74*.

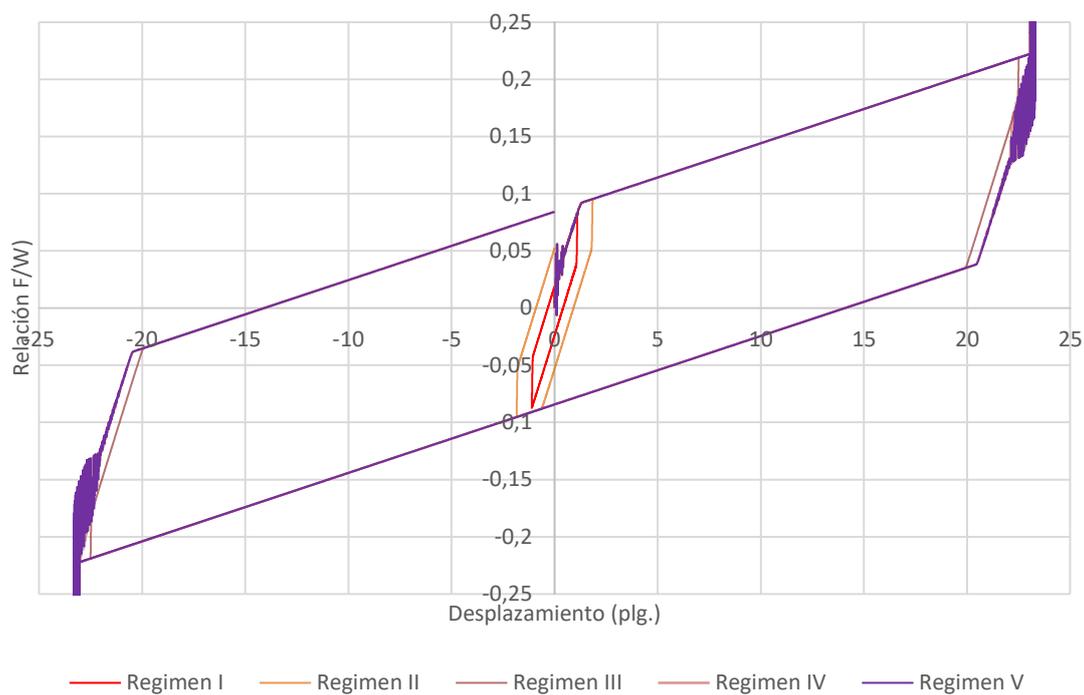


Figura 73 Curva de histéresis para los cinco regímenes de desplazamiento de acuerdo al software 3pleANI.

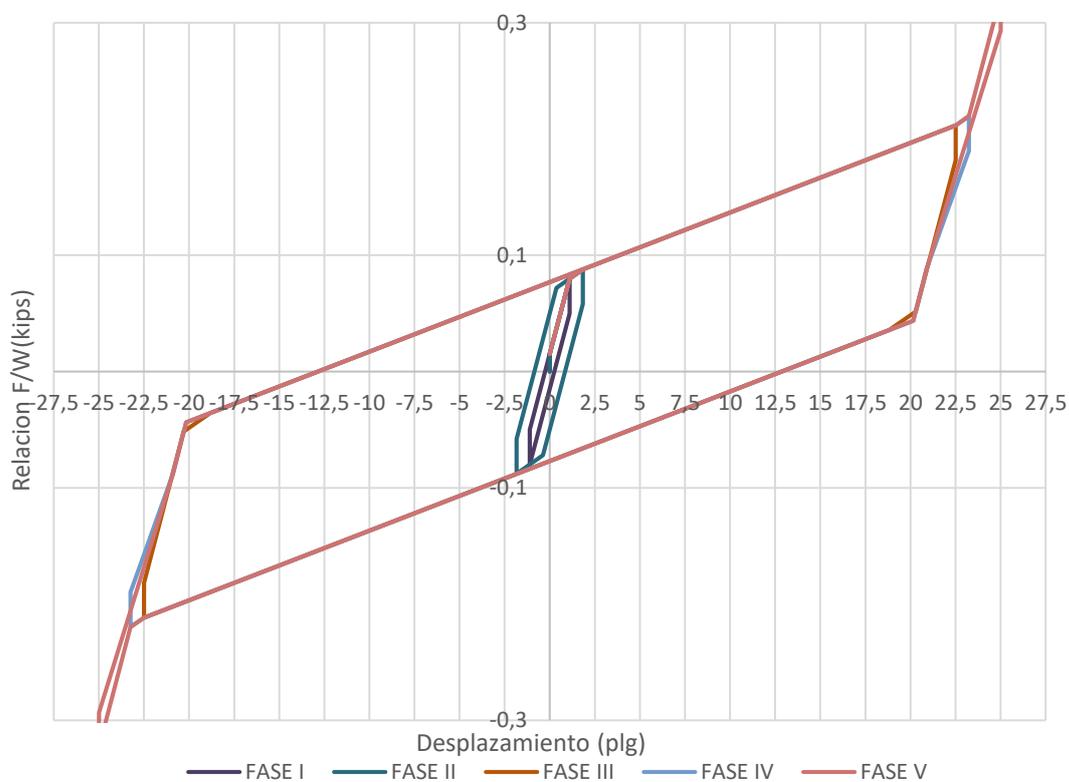
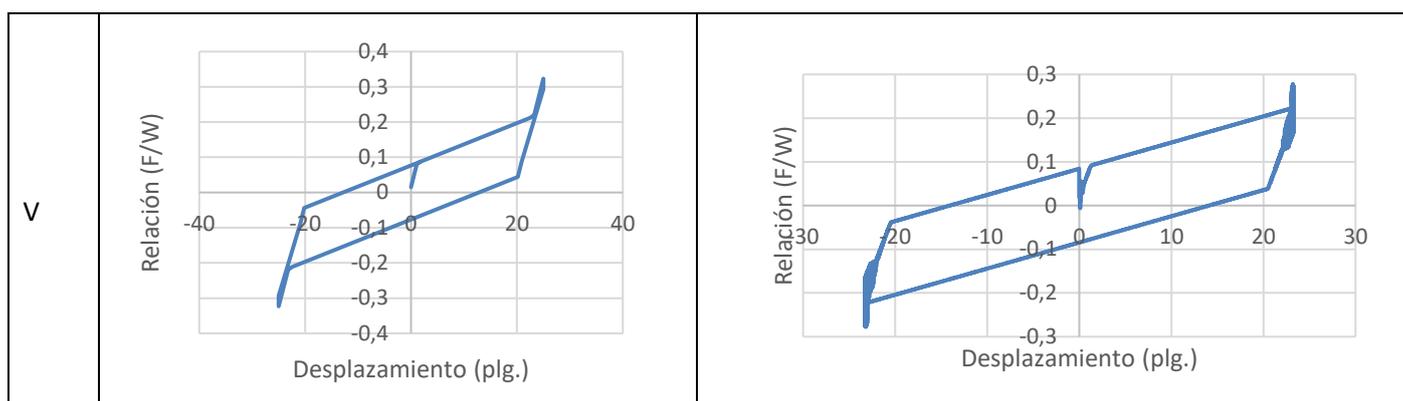


Figura 74 Curva de histéresis para los cinco regímenes de desplazamiento de acuerdo con el modelamiento numérico.

Tabla 13

Resumen de las curvas de histéresis del modelo matemático y modelo en 3pleANI

FASE	MODELO MATEMATICO	3pleANI
I		
II		
III		
IV		



En las Tablas 14 y 15 se describe los siguientes parámetros: EDC = Energía disipada por ciclo ; k_{eff} = Rigidez Efectiva; β_{eff} = Amortiguamiento Efectivo; F_{maxh} = Fuerza Máxima Horizontal y u_{maxh} = Máximo Desplazamiento Horizontal.

Tabla 14

Parámetros Obtenidos Mediante el Análisis Numérico.

Aislador	Fase	F_{maxh}	u_{maxh}	EDC	k_{eff}	β_{eff}
		Kips	plg.	(kips-plg)	(kips/plg)	(%)
Pila 12	1	0.08	1.11	0.07	0.07	23.87
	2	0.09	1.84	0.32	0.05	62.67
	3	0.21	22.51	6.74	0.01	45.05
	4	0.22	23.24	6.85	0.01	42.70
	5	0.32	25.00	6.89	0.01	27.15

Tabla 15

Parámetros Obtenidos Mediante la Interface 3pleANI.

Aislador	Fase	F_{maxh}	u_{maxh}	EDC	k_{eff}	β_{eff}
		Kips	plg	(kips-plg)	(kips/plg)	(%)
Pila 12	1	0.08	1.10	0.09	0.08	31.82
	2	0.10	1.84	0.28	0.05	50.22
	3	0.22	22.50	7.21	0.01	46.57
	4	0.27	23.24	7.41	0.01	37.21
	5	0.28	23.30	7.41	0.01	36.49

Se puede observar en las *Figuras 73 y 74* que la curva fuerza - deformación tiene características histeréticas, es decir, que el máximo valor de la fuerza coincide con el máximo desplazamiento. En base a las Tablas 14 y 15, se puede indicar las siguientes observaciones, que corresponden a las propiedades mecánicas de los aisladores:

- Las dos tablas muestran propiedades mecánicas consistentes, es decir, se realizó una validación con la interfase del proceso analítico;
- La rigidez efectiva de las fases III, IV y V es 0.01 (kips/plg);
- Se puede observar que en la columna de amortiguamiento efectivo β_{eff} , existe alguna variación.
- A partir del régimen III, la EDC alcanza los mayores valores.

6.6. Resumen

El análisis analítico conjugado al realizado mediante la interface 3pleANI, permitió validar los diagramas de histéresis, interpretando las propiedades mecánicas del desempeño de los aisladores analizados analítica y experimentalmente.

En el siguiente capítulo se detalla el análisis dinámico de los aisladores TPF en conjunto con la pila No. 12, utilizando el programa 3pleANI: “FRICTION PENDULUM ISOLATOR ANALYSIS AND ANIMATION PROGRAM” y la teoría descrita en el capítulo II, sometiendo este modelo a un registro sísmico de la ciudad de Manta, variando los factores de escalamiento y comparando los resultados con los de la pila No. 6, con la finalidad de determinar cuál será la variación de los desplazamientos en el sistema.

CAPÍTULO VII

ANÁLISIS DINÁMICO DEL AISLADOR TPF8836/14-12/10-7 DE LA PILA No. 12

Introducción

La importancia de conocer el comportamiento de los aisladores sísmicos integrados a la pila No. 12, genera la necesidad de realizar un análisis dinámico no lineal de respuesta en el tiempo, en el que se pretende integrar las condiciones de diseño del puente de Bahía. Para determinar la amenaza sísmica en base a un objetivo de la norma (Espectro de aceleraciones de una intensidad MCE), se realiza un escalamiento de estos registros, con la finalidad de normalizar los acelerogramas de los registros, frente al evento producido el 16 de Abril de 2016.

En este trabajo, se asume el registro del sismo del 16 de Abril de 2016 de la ciudad de Manta, debido a que no existe información del sismo producido en Bahía de Caráquez. Este registro cuenta con similares condiciones geotécnicas que la ciudad de Bahía de Caráquez; por lo que con este análisis se busca determinar específicamente el comportamiento de los aisladores integrados en la pila No. 12 en relación a los desplazamientos producidos. Se emplea un factor de escalamiento de 1,84 al sismo seleccionado para analizar el comportamiento de los aisladores mediante el software 3pleANI.

7.2. Análisis Dinámico del aislador TPF8836/14-12/10-7 mediante la interface 3pleANI.

Esta sección presenta un análisis dinámico del desempeño sísmico de los aisladores de la pila No. 12 y se compara con los valores obtenidos en la medición visual del aislador TPF colocado en el puente “Los Caras”, después del sismo de Abril de 2016. Se emplea el programa 3pleANI con la finalidad de explicar el modelamiento del aislador como se muestra en la *Figura 75*.

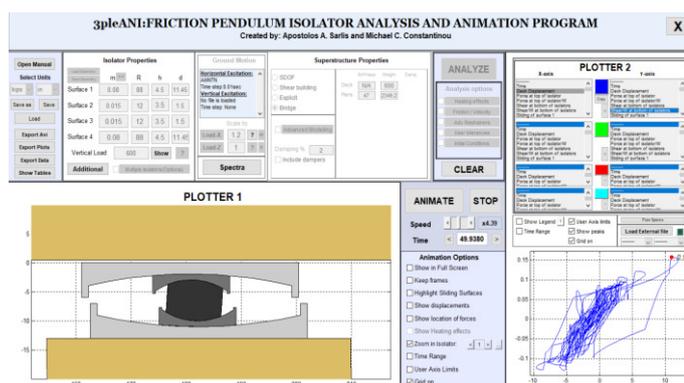


Figura 75 Análisis Dinámico del Aislador TPF8836/14-12/10-7 de la Pila No. 12 del puente “Los Caras”.

Con el programa 3pleANI se generó un modelo del tablero del puente sobre el aislador; este modelo es apropiado cuando el puente esta soportado por algunas pilas con las mismas propiedades geométricas, como es el caso de las pilas adyacentes a la pila No. 12 del puente “Los Caras” (Ver *Figura 76*). Se consideró los valores de los coeficientes de fricción nominales detallados en el capítulo VI.

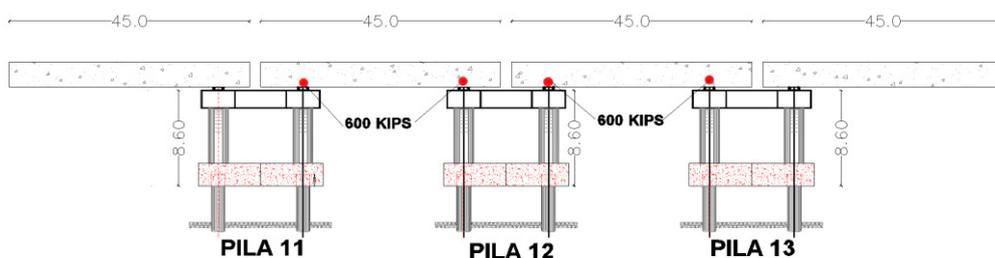


Figura 76 Esquema del Puente “Los Caras” y su diseño estructural con aisladores sísmicos.

El modelo generado se fundamenta en un aislador FPT8836/14-12/10-7, sobre el cual actúa el peso del tablero de 600kips. Para obtener el dato de la rigidez de la pila No. 12 se recurrió al modelo matemático realizado en el software SAP-2000 por parte del Ing. Marcelo Romo y que se encuentra detallado en la memoria de cálculo del puente “Los Caras”, como se muestra en la *Figura 77*.

Es importante recalcar que por definición la rigidez lateral, es la fuerza horizontal que se requiere para producir un desplazamiento horizontal unitario, por lo cual, en este modelo se aplica una fuerza lateral de 100T para obtener los desplazamientos en metros.

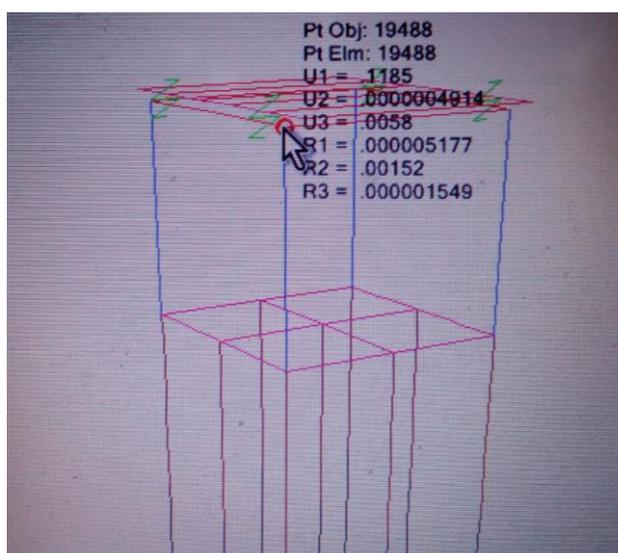


Figura 77 Modelo de SAP-2000, para la obtención de datos necesarios en el análisis de la rigidez de la pila No.12 del puente “Los Caras

En este contexto, se realiza la siguiente operación:

$$K = \frac{100T}{0,1185m}$$

$$K = \frac{100T}{0,1185m}$$

$$K = 844 \frac{T}{m} \approx 47,376 \frac{Kips}{plg}$$

Para el análisis en el software 3pleANI, se ingresa el peso de la pila en función de los niveles de profundidad de los pilotes como se puede observar en la Tabla 16.

Tabla 16

Pesos de la pila No.12 de acuerdo a los diferentes niveles de profundidad en el puente “Los Caras”.

Profundidad	Peso (Kips)
Hasta el nivel del agua	1768
Hasta el nivel de la profundidad del estuario del Rio Chone	1871.87
Pilotes con una licuefacción de suelos con capa de 10mts	2225.47
Pilotes enterrados en el suelo y licuefacción de suelos.	2349.23

Con estos datos, se realizaron las diferentes iteraciones a fin de considerar el resultado más crítico, que en este caso sería el del peso total que incluye el tipo de suelo que existe en la pila No. 12.

Como se expuso anteriormente, se ingresa como dato los registros del acelerograma de Manta, como se muestra en la *Figura 78*, debido a las condiciones similares de tipo de suelo que esta ciudad tiene sobre el nivel del mar; sin embargo, es importante considerar que los estudios de suelos son los que realmente determinan el nivel de intensidad con el que se determina la afectación a las estructuras.

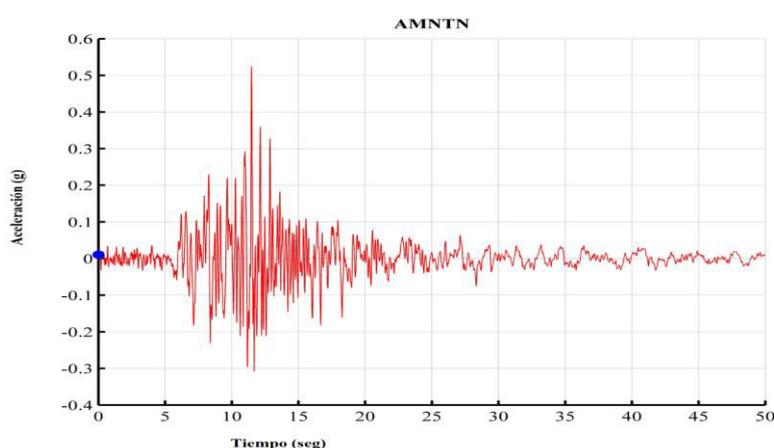


Figura 78 Acelerograma del Sismo del 16 de Abril de 2016, registrado en Manta (N-S)

Con estos valores se concluye que los aisladores alcanzan los mayores desplazamientos del sismo DBE que es 20,46 pulg. (51,97 cm) como se muestra en la *Figura 79*.

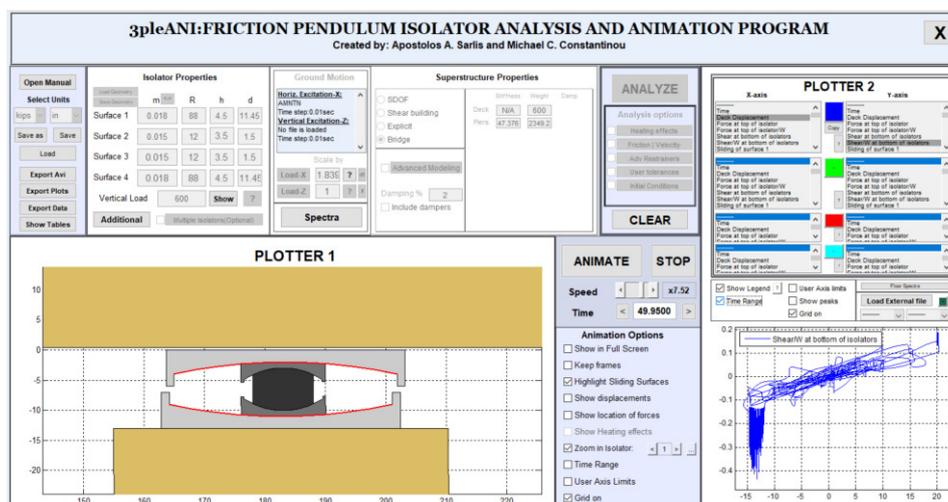


Figura 79 Análisis Dinámico del Aislador TPF8836/14-12/10-7 de la Pila No. 12, con el Registro de la Ciudad de Manta escalado.

A continuación, se presentan los resultados del análisis dinámico para un sismo escalado ante una intensidad MCE para la ciudad de Bahía de Caráquez, con la finalidad de contrastarlos con los desplazamientos medidos en campo, que tuvieron las pilas del puente “Los Caras”.

El nivel de intensidad del sismo en Bahía de Caráquez es una incertidumbre, sin embargo, con los sismos que se registraron, se analizó que condiciones pudieron afectar a la pila No.12 para que sus aisladores hayan alcanzado el sismo MCE y así poder obtener resultados que permitan validar esta investigación.

Los valores que se observan en la *Figura 79*, nos inducen a concluir que este análisis permite conocer de mejor manera la intensidad del sismo que ocurrió en la ciudad de Bahía de Caráquez, por lo que se realizó una comparación con los datos de la pila No. 7, empleando el sismo mencionado anteriormente y el mismo factor de escalamiento.

En la Tabla 17, se presenta un cuadro resumen del desplazamiento obtenido con el factor de escalamiento propuesto entre la pila No. 7 y la pila No. 12, en función del registro de la ciudad de Manta en el evento del 16 de Abril de 2016.

Tabla 17

Cuadro Comparativo de Resultados obtenidos del Análisis Dinámico del Aislador TPF8836/14-12/10-7 entre la pila No. 7 y la pila No. 12.

Pila	Carga del tablero sobre el aislador	Factor de escalamiento	Rigidez (Kips/plg)	Peso de Pila (Kips)	Desplazamiento (plg)
12	600	1.84	47.376	2349.2	20.46
7	600	1.84	4737.6	2200	10.91

En las *Figuras 80 y 81*, se presenta el espectro de diseño del sismo de Manta escalado con 1,84 y sin escalar para analizar el comportamiento y desplazamiento de los aisladores sísmicos.

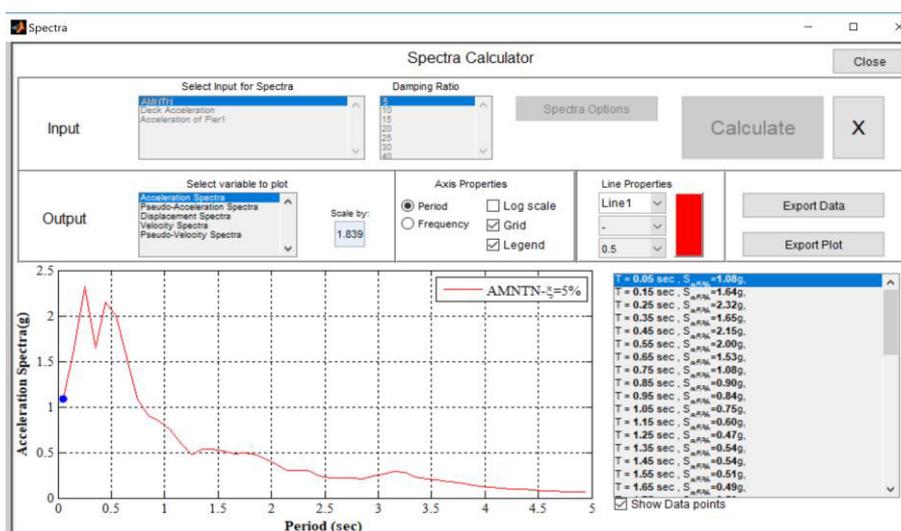


Figura 80 Espectro de diseño del sismo de Manta escalado a 1.84

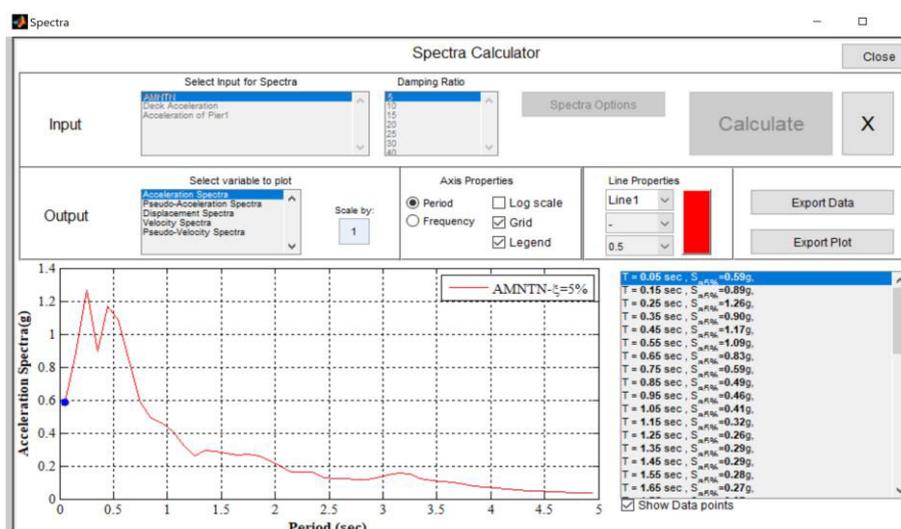


Figura 81 Espectro de diseño del sismo de Manta sin escalar

7.3. Resumen

Se realiza el análisis dinámico del aislador TPF, partiendo de la consideración que al no existir registros sísmicos del evento de abril del 2016, de la ciudad de Bahía de Caráquez, donde está ubicado el puente “Los Caras”; se perdió la oportunidad de entender la real amenaza de esta ciudad, que históricamente ha sido afectada por eventos telúricos. Después del sismo se realizaron mediciones a los diferentes aisladores sísmicos, encontrando que los desplazamientos tienen un promedio de 28cm. Este dato sirvió como punto de inicio para realizar los pasos inversos y determinar la intensidad del sismo.

Teniendo como datos de la pila a la rigidez y el peso, así como también el peso del tablero que soporta el aislador; se pudo considerar el registro del sismo de Manta para proceder con el análisis dinámico a través de iteraciones en el software 3pleANI para llegar a obtener el nivel de intensidad del sismo en el sitio del puente y los desplazamientos del aislador modelado.

En el siguiente capítulo se hace referencia a los Factores de Modificación Lambda (λ), establecidos en el ASCE 7-16, norma en la cual se definen parámetros técnicos producidos por efectos externos como envejecimiento, contaminación, ciclos de carga, efectos del calentamiento por el movimiento dinámico cíclico, la velocidad de carga y uso, que influyen en estos factores para consideraciones especiales dentro de los coeficientes de fricción y que se relacionan en el análisis del comportamiento de aisladores de tipo FP.

CAPÍTULO VIII

FACTORES DE MODIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS COEFICIENTES DE AISLADORES FRICCIONALES

8.1. Introducción

En un aislador existe una condición de comportamiento denominada “Upper Bound Condition” en la que los valores nominales son multiplicados por factores de modificación de propiedades, por efectos externos como envejecimiento, contaminación, ciclos de carga, efectos del calentamiento debido al movimiento dinámico cíclico, la velocidad de carga y uso. Con esta condición se producen mayores fuerzas sísmicas que serán transmitidas a la estructura aislada. De manera similar, existe otra condición de comportamiento llamada “Lower Bound Condition”, que ocurre en condiciones normales, con coeficientes de fricción relativamente bajos que producen los mayores desplazamientos en el aislador y las menores fuerzas en la estructura aislada. (Este análisis no se presenta en las memorias de cálculo).

El análisis de fuerzas y de la capacidad de desplazamiento de las estructuras sísmicamente aisladas, deben ser analizadas mediante el procedimiento denominado “Fuerza lateral equivalente” y “Análisis dinámico no lineal en el tiempo”. Estos análisis deben tomar en consideración las variaciones de los coeficientes de fricción, por factores de contaminación, envejecimiento, pruebas de carga, fabricación, etc. Existen muchas incertidumbres en este caso, siendo importante indicar que los factores de modificación fueron incorporados por primera vez en una norma de edificios.

Se presentan, de manera teórica, los factores de modificación con ciertos detalles, tomando como base lo establecido en el código ASCE 7-16 (Especificaciones y Comentarios).

8.2. Factores (λ) de Modificación de la Propiedad de los Aisladores Friccionales

Los factores de modificación de propiedades se utilizan para modificar los parámetros nominales, debido a agentes relacionados con el movimiento del ciclo dinámico. Estos

agentes son la capacidad de carga, envejecimiento, exposición al medio ambiente y contaminación.

Los factores lambda (λ) se utilizan para establecer matemáticamente los modelos de análisis que permitan determinar coeficientes de fricción máximos y mínimos para obtener fuerzas máximas que se transmiten a la superestructura. Este análisis se debe evaluar con métodos como el “Procedimiento estático lineal y dinámico” (Análisis no lineal en el tiempo). (Sarlis & Constantinou, 2013)

La selección de los factores λ establecidos en el ASCE 7-16 para sistemas friccionales, tiene la consideración de la procedencia del aislador, es decir si fue elaborado por fabricantes desconocidos que no tienen calificación o datos de prueba o por otro lado, si fueron fabricados por empresas con estándares de calidad.

Las Tablas 18 y 19 proporcionan los factores de multiplicación para los límites superior e inferior para fabricantes desconocidos y conocidos respectivamente, estos valores tienen que ser multiplicados por los coeficientes de fricción.

Tabla 18

Factores de Multiplicación para Límite Superior y Límite Inferior Fabricantes Desconocidos.

VARIABLE	Superficie no lubricada μ ó Q_d	Superficie lubricada μ ó Q_d
Ejemplo: Factores de envejecimiento y medio ambiente	-	-
Envejecimiento, λ_a	1.3	1.8
Contaminación, λ_c	1.2	1.4
Ejemplo límite máximo, $\lambda_{(ae,max)}$	1.56	2.52
Ejemplo límite mínimo, $\lambda_{(ae,min)}$	1	1
Ejemplo: Factores de test	-	-
Efectos para todos los ciclos, máximo	1.3	1.3
Efectos para todos los ciclos mínimo	0.7	0.7
Ejemplo límite máximo, $\lambda_{(test,max)}$	1.3	1.3

Ejemplo límite mínimo, $\lambda_{(test,min)}$	0.7	0.7
$\lambda_{(PM,max)} = (1 + (0.75 * (\lambda_{(ae,max)} - 1))) * \lambda_{(test,max)}$	1.85	2.78
$\lambda_{(PM,min)} = (1 - (0.75 * (1 - \lambda_{(ae,max)}))) * \lambda_{(test,min)}$	0.7	0.7
Factor Lambda para espectro de tolerancia, $\lambda_{(spec,max)}$	1.15	1.15
Factor Lambda para espectro de tolerancia, $\lambda_{(spec,min)}$	0.85	0.85
Factor Multiplicador de propiedades de diseño Upper Bound.	2.12	3.2
Factor Multiplicador de propiedades de diseño Lower Bound.	0.6	0.6
Factor Multiplicador de propiedades de diseño Upper Bound (Default)	2.1	3.2
Factor Multiplicador de propiedades de diseño Lower Bound (Default)	0.6	0.6

Fuente: (ASCE, 2017)

Tabla 19

Factores de Multiplicación para Límite Superior y Límite Inferior Fabricantes Conocidos.

VARIABLE	Superficie no lubricada PTFE, μ	Superficie lubricada PTE, μ
Ejemplo: Factores de envejecimiento y medio ambiente	-	-
Envejecimiento, λ_a	1.10	1.50
Contaminación, $\lambda_c +$	1.10	1.10
Ejemplo límite máximo, $\lambda_{(ae,max)}$	1.21	1.65
Ejemplo límite inferior, $\lambda_{(ae,min)}$	1.00	1.00
Ejemplo: Factores de prueba	-	-
Efectos para todos los ciclos, máximo	1.20	1.30
Efectos para todos los ciclos, mínimo	0.95	0.95
Ejemplo límite máximo, $\lambda_{(test,max)}$	1.20	1.30
Ejemplo límite mínimo, $\lambda_{(test,min)}$	0.95	0.95

$\lambda_{(PM,max)} = (1 + (0.75 * (\lambda_{(ae,max)} - 1))) * \lambda_{(test,max)}$	1.39	1.93
$\lambda_{(PM,min)} = (1 - (0.75 * (1 - \lambda_{(ae,max)}))) * \lambda_{(test,min)}$	0.95	0.95
Factor Lambda para espectro de tolerancia, $\lambda_{(spec,max)}$	1.15	1.15
Factor Lambda para espectro de tolerancia, $\lambda_{(spec,min)}$	0.85	0.85
Factor Multiplicador de propiedades de diseño Upper Bound.	1.60	2.22
Factor Multiplicador de propiedades de diseño Lower Bound.	0.81	0.81
Factor Multiplicador de propiedades de diseño Upper Bound (Default)	1.60	2.25
Factor Multiplicador de propiedades de diseño Lower Bound (Default)	0.8	0.8

Fuente: (ASCE, 2017)

Para el caso de aisladores deslizantes, los factores λ pueden requerir la consideración de la presión de contacto, la velocidad de carga, deformación bilateral, temperatura ambiente, contaminación, otras cargas ambientales y efectos de envejecimiento del aislador. El envejecimiento para los aisladores deslizantes depende de la composición de las superficies deslizantes. Por otra parte, las superficies lubricadas garantizan un menor envejecimiento y mejores factores contra la contaminación. (Michalakis C Constantinou, Whittaker, Kalpakidis, Fenz, & Warn, 2006)

Se asume que los aisladores deslizantes, sean estos planos o esféricos, son producidos con altos estándares de precisión de tal manera que sus características de rigidez son conocidas. Los valores que se muestran en la Tabla 18, son establecidos por el ASCE 7-16 en base a análisis estadísticos ajustados a condiciones de prueba, o en su defecto a datos generales por ser de fabricantes desconocidos.

8.2.1. Factores de modificación de propiedad.

Los factores de modificación de propiedad λ máximos y mínimos, se deben usar para considerar la variación de los parámetros de diseño nominales de cada aislador bajo varios efectos causados por el movimiento dinámico cíclico y condiciones externas.

Para cada aislador, el factor máximo de modificación de propiedad (λ_{max}) y el factor mínimo de modificación de propiedad (λ_{min}), se establecen de acuerdo con las ecuaciones. (17.2-1) y (17.2-2) del ASCE 7-16; las cuales son:

$$\lambda_{max} = \left(1 + \left(0.75 * (\lambda_{(ae,max)} - 1) \right) \right) * \lambda_{(test,max)} * \lambda_{(spec,max)} \geq 1.8 \quad (42)$$

$$\lambda_{min} = \left(1 - \left(0.75 * (1 - \lambda_{(ae,min)}) \right) \right) * \lambda_{(test,min)} * \lambda_{(spec,min)} \leq 0.6 \quad (43)$$

Donde:

- $\lambda_{(ae,max)}$ = Factor de modificación para calcular el valor máximo de la propiedad del aislador, usado para contar con los efectos de envejecimiento y condiciones de medio ambiente.
- $\lambda_{(ae,min)}$ = Factor de modificación para calcular el valor mínimo de la propiedad del aislador, usado para contar con los efectos de envejecimiento y condiciones de medio ambiente.
- $\lambda_{(test,max)}$ = Factor de modificación para calcular el valor máximo de la propiedad del aislador, usado para contar con calentamiento, valor de carga, y torsión.

8.2.2. Condiciones para fabricante desconocido y conocido

Las propiedades de los aisladores sísmicos pueden variar debido a múltiples factores como calentamiento, historial de carga, efectos del medio ambiente, contaminación y otros parámetros propios de acuerdo al fabricante. En este caso, se aplica los coeficientes para el límite superior e inferior de acuerdo a la condición del fabricante (conocido o desconocido), empleando las ecuaciones detalladas anteriormente.

8.2.2.1. Fabricante Desconocido

$$\lambda_{max} = \left(1 + \left(0,75 * (\lambda_{(ae,max)} - 1) \right) \right) * \lambda_{(test,max)} * \lambda_{(spec,max)} \geq 1,8$$

$$\lambda_{max} = \left(1 + \left(0,75 * (1,56 - 1) \right) \right) * 1,3 * 1,15 \geq 1,8$$

$$2,12 \geq 1,8$$

$$\lambda_{\min} = \left(1 - \left(0,75 * (1 - \lambda_{(ae,\min)})\right)\right) * \lambda_{(test,\min)} * \lambda_{(spec,\min)} \leq 0,6$$

$$\lambda_{\min} = \left(1 - (0,75 * (1 - 1))\right) * 0,7 * 0,85 \leq 0,6$$

$$0,595 \leq 0,6$$

En este caso se tomaría valores:

$$\lambda_{\max} = 2,12 \text{ y } \lambda_{\min} = 0,595$$

8.2.2.2. Fabricante Conocido

$$\lambda_{\max} = \left(1 + \left(0,75 * (\lambda_{(ae,\max)} - 1)\right)\right) * \lambda_{(test,\max)} * \lambda_{(spec,\max)} \geq 1,8$$

$$\lambda_{\max} = \left(1 + (0,75 * (1,21 - 1))\right) * 1,20 * 1,15 \geq 1,8$$

$$1,59 \geq 1,8$$

$$\lambda_{\min} = \left(1 - \left(0,75 * (1 - \lambda_{(ae,\min)})\right)\right) * \lambda_{(test,\min)} * \lambda_{(spec,\min)} \leq 0,6$$

$$\lambda_{\min} = \left(1 - (0,75 * (1 - 1))\right) * 0,95 * 0,95 \leq 0,6$$

$$0,902 \leq 0,6$$

En este caso se tomaría valores

$$\lambda_{\max} = 1,8 \text{ y } \lambda_{\min} = 0,6$$

En la Tabla 20 se describen los valores de los coeficientes de fricción para los dos tipos de fabricantes en los Límite Superior e Inferior.

Tabla 20

Factores de Multiplicación para Límite Superior y Límite Inferior, Fabricantes Conocidos.

Coefficiente	Límite superior conocido	Límite superior desconocido	Límite inferior conocido	Límite inferior desconocido
$\mu_1=0.08$	0.1272	0.1696	0.0722	0.0476
$\mu_2=0.015$	0.02385	0.0318	0.0135	0.0089
$\mu_3=0.015$	0.0238	0.0318	0.0135	0.0089
$\mu_4=0.088$	0.1399	0.1865	0.0794	0.0523

8.2.3. Comportamiento de Fuerza y Deflexión para componentes de sistemas de aislamiento (Upper-Bound y Lower -Bound)

Para la representación de un límite superior (Upper Bound) y un límite inferior (Lower Bound), de cada sistema de aislamiento, se debe utilizar los factores lambda. Sobre la base de las condiciones límites (Upper Bound y Lower Bound) se construyen diagramas Fuerza-Desplazamiento, para determinar parámetros como rigidez y valores de amortiguamiento sustanciales en el análisis y diseño. En este contexto, es necesario desarrollar un modelo matemático del comportamiento fuerza-desplazamiento en estas dos condiciones, con la finalidad de determinar máximas respuestas dinámicas. La *Figura 84* muestra los diagramas desplazamiento-fuerza de sistemas bilineales de aislamiento sísmico para las condiciones mencionadas anteriormente.

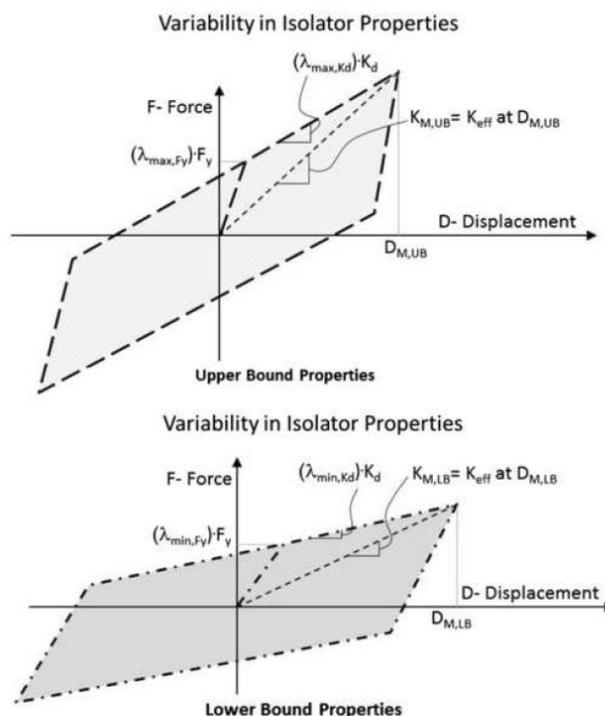


FIGURE C17.2-3 Example of the Upper and Lower Bound Properties of a Bilinear Force Deflection System

Figura 82 Diagrama Fuerza – Desplazamiento, Límite Superior y Límite Inferior.

Fuente: (ASCE, 2017)

8.3. Resumen:

En un aislador existe una condición de comportamiento denominada Límite Superior (“Upper Bound Condition”), en la que los coeficientes de fricción son relativamente altos por efectos externos como envejecimiento, contaminación, ciclos de carga, temperatura, efectos de velocidad y uso. Lo expuesto ocasiona que mayores fuerzas sísmicas sean transmitidas a la estructura aislada. De manera similar, existe otra condición de comportamiento denominada Límite Inferior (“Lower Bound Condition”), ocurre en condiciones normales, con coeficientes de fricción relativamente bajos, y que produce los mayores desplazamientos en el aislador, y las menores fuerzas en la estructura aislada.

En el siguiente capítulo se exponen las conclusiones y recomendaciones de este trabajo de titulación.

CAPÍTULO IX

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

9.1. Conclusiones y Recomendaciones

1. Una correcta filosofía de diseño que observa la norma, y el uso de aislamiento de base como en el puente Los Caras, construido en Bahía de Caráquez, limita el daño en estructuras esenciales ante eventos sísmicos. Cabe destacar que, un inadecuado desempeño sísmico de una estructura especial tendría consecuencias devastadoras para el país. Los puentes no pueden perder su operatividad pues constituyen nexos de comunicación entre varias poblaciones.
2. El cumplimiento de una apropiada filosofía de diseño sísmico, los criterios, estándares y metodologías de construcción permitieron asegurar el comportamiento adecuado del puente, ante el terremoto del 16 de abril de 2016. Esta obra emblemática alcanzó niveles de protección que permitieron mantener una funcionalidad continua y total operatividad, durante y después del terremoto mencionado anteriormente, a pesar de que en Bahía se tuvieron aceleraciones pico estimadas, del orden del 90% de la gravedad en suelos horizontales (PGA).
3. Después de décadas de pruebas de estructuras sísmicamente aisladas, sometidas a terremotos reales, se tiene como evidencia que las demandas son mayores a las que se emplean en la fase de diseño, que se basa en lo que estipulan los códigos y normas vigentes. En el caso del puente “Los Caras”, el desplazamiento de los aisladores en la pila No. 12, fue de aproximadamente 600 mm; constituyéndose en la respuesta o mayor movimiento jamás registrado de una estructura aislada sísmicamente.
4. En este proyecto se realiza una investigación de los sistemas de aislamiento sísmico tipo friccional TPF utilizados en el puente “Los Caras”, para conocer su funcionamiento y aplicación en nuestro medio; estudios como el presente, están orientados a brindar información que permita mejorar los desempeños sísmicos, y garantizar la funcionalidad de estructuras estratégicas, con el fin de precautelar la vida humana, principal bien en toda sociedad.
5. Se analiza el sistema de funcionamiento de los aisladores de base tipo TPF para conocer las fases y parámetros de comportamiento de acuerdo con sus principios

físicos, estáticos y dinámicos; presentando las ecuaciones que permiten llegar al análisis de histéresis fuerza - desplazamiento, en cada una de las fases. Para este análisis se consideran tres principios fundamentales de diseño de aislamiento sísmico: disipación de energía, rigidez bajo niveles de carga de servicio y estabilidad del sistema.

6. Se presenta los resultados obtenidos, después de una investigación y análisis de: suelo de cimentación, capas superiores del suelo, cimentación de las pilas de la sección central del puente de “Los Caras”, las que son particularmente sensibles ante un evento sísmico, debido a la existencia de suelos granulares licuables o arcillas blandas.
7. Se hace referencia a la investigación realizada a las 38 pilas de la sección central, de las cuales la pila No. 12 presentó desplazamientos laterales superiores a los previstos en la fase de diseño (Se observó daño en el anillo perimetral de estos aisladores, por lo que se reemplazará con aisladores nuevos); el resto de las pilas mostraron desplazamientos similares o menores a los previstos en el modelo de diseño.
8. Se considera la importancia que tiene la inspección de los puentes, el mantenimiento preventivo y mantenimiento correctivo, ya que la preservación es una estrategia que previene o reduce el deterioro de estas estructuras y de sus elementos, para así recuperar la funcionalidad continua del puente.
9. Se especifica la metodología, para reemplazar los aisladores de la pila 12.
10. Se detallan geometrías y características del aislador tipo, tanto de diseño inicial como de aquellas previstas para el reemplazo, facilitadas por parte de la empresa EPS. Estos parámetros son utilizados para presentar las curvas fuerza - deformación de los aisladores instalados en el puente y compararlos con los ensayos realizados por el fabricante.
11. Se presenta un análisis mediante modelamiento analítico y empleando la interface 3pleANI, que permite validar e interpretar, sobre la base de los coeficientes de fricción, parámetros de diseño y diagramas de histéresis, las propiedades mecánicas del desempeño del aislador TPF8836/14-12/10-7.
12. Se analizó los factores de modificación de propiedades máximos y mínimos (λ), que son importantes dentro del análisis de diseño, ya que permiten tener en cuenta

la variación de los parámetros nominales de los coeficientes de fricción; parámetro fundamental en el desempeño de los aisladores investigados en esta tesis.

13. Los factores λ modifican los coeficientes de fricción de los aisladores. Se presenta una investigación analítica de los efectos que se generan al cambiar los coeficientes de fricción. Es importante indicar que el sismo del 2016 fue un evento que sucedió después de 8 años de la instalación de estos aisladores, en consecuencia, se estima que existieron efectos de envejecimiento, contaminación y condiciones de carga, que afectaron las propiedades mecánicas de estos dispositivos; estos efectos se originaron por la existencia de grandes fuerzas y grandes desplazamientos.
14. No existen registros sísmicos del evento del 2016, de la ciudad de Bahía de Caráquez, donde está ubicado el proyecto. Se perdió una gran oportunidad de entender la real amenaza de esta ciudad, que históricamente ha sido afectada por eventos telúricos. Se realizó una medición de los desplazamientos en los aisladores ante el evento sísmico del 2016 que permite contar con datos reales para comprender cuál fue la demanda existente.

9.2. Trabajo Futuro

1. Se recomienda realizar ensayos dinámicos de los aisladores que se remplazarán en la pila No. 12, en coordinación con la empresa EPS. Estos ensayos podrán ayudar a validar los resultados presentados en el capítulo VI y entender el tipo de falla o daño en los rines perimetrales.
2. Las características de las excitaciones juegan un papel predominante en el diseño, ya que éstas determinarán la efectividad de los sistemas de aislamiento de base. Se debe realizar estudios para poder comprender la amenaza sísmica de la Ciudad de Bahía de Caráquez, asociada al evento del 16 de abril de 2016.
3. Se debe analizar el efecto de los nuevos coeficientes de fricción obtenidos en función de los factores lambda, a fin de analizar el comportamiento por regímenes de los aisladores sísmicos TPF bajo niveles Upper Bound y Lower Bound, contrastando estas incertidumbres con los resultados obtenidos del ensayo a realizarse después del retiro de los aisladores.

4. Es importante realizar un ensayo mecánico de los daños presentados en los aisladores a través de diagramas termodinámicos que sinteticen el tipo de falla y el comportamiento mecánico de los aisladores después del terremoto del 16 de abril de 2016.

REFERENCIAS

- ASCE. (2017). Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures* (pp. 889). United States of América: Structural Engineering Institute.
- Becker, T. C. (2011). *Advanced modeling of the performance of structures supported on triple friction pendulum bearings*: University of California, Berkeley.
- Buckle, I. G., Constantinou, M. C., Diceli, M., & Ghasemi, H. (2006). *Seismic isolation of highway bridges*. Retrieved from
- C.E.E. (2008). Implantación de Cimentación - Tramo Central. In 392TC-01A (Ed.). Julio 2008: Cuerpo de Ingenieros del Ejército.
- CEE. (2010). *Puente "Los Caras" - Comportamiento Sismoresistente, Diseño Conceptual y Constructivo*. Retrieved from Quito:
- Constantinou, M., Aguiar, R., Morales, E., & Caiza, P. (2016). Desempeño de aislador FPT8833/12-12/8-5 en el análisis sísmico del Centro de Investigaciones y de Post Grado. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 21(1), 1-25.
- Constantinou, M. C. (2004). Friction Pendulum double concave bearing.
- Constantinou, M. C., Kalpakidis, I. V., Filiatrault, A., & Lay, R. E. (2011). *LRFD-based analysis and design procedures for bridge bearings and seismic isolators*: MCEER.
- Constantinou, M. C., Whittaker, A., Kalpakidis, Y., Fenz, D., & Warn, G. P. (2006). Performance of seismic isolation hardware under service and seismic loading.
- E.P.N. (2016). *Informe Sísmico Especial No. 7 - 2016* (7). Retrieved from Quito: <http://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/1311-informe-sismico-especial-n-7-2016>
- Purchase Agreement for the Supply of Friction Pendulum Bearings for Rio Chone Bridge, Ecuador, (2007).
- EPS. (2009). Product Brochure Page Version. In I. Earthquake Protection Systems (Ed.). California.
- EPS. (2016). *Production Bearing Quality Control Test Report for Rio Chone Bridge Replacement Bearings, Ecuador*. Retrieved from California - USA:
- Fadi, F., & Constantinou, M. C. (2010). Evaluation of simplified methods of analysis for structures with triple friction pendulum isolators. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 39(1), 5-22.
- Fenz, D. M. (2008). *Development, implementation and verification of dynamic analysis models for multi-spherical sliding bearings*: State University of New York at Buffalo.
- Fenz, D. M., & Constantinou, M. C. (2006). Behaviour of the double concave Friction Pendulum bearing. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 35(11), 1403-1424. doi:10.1002/eqe.589
- Fenz, D. M., & Constantinou, M. C. (2006). Mechanical behavior of multi-spherical sliding bearings.
- Fenz, D. M., & Constantinou, M. C. (2008a). Modeling triple friction pendulum bearings for response-history analysis. *Earthquake Spectra*, 24(4), 1011-1028.
- Fenz, D. M., & Constantinou, M. C. (2008b). Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: Theory. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 37(2), 163-183.
- Fernández, V. (2014). *Aisladores Sísmicos - Péndulo de Fricción*.
- Frangopol, D. M. (1999). *Case studies in optimal design and maintenance planning of civil infrastructure systems*: ASCE Publications.

- Guide, B. P. (2011). *Maintaining a State of Good Repair Using Cost Effective Investment Strategies*. Retrieved from
- Hart, J., Asl, A., & Fletcher, J. (2017). *Bridge bearing replacement using flat jacks*. Paper presented at the Austroads Bridge Conference, 10th, 2017, Melbourne, Victoria, Australia.
- McVitty, W., & Constantinou, M. (2015). Property modification factors for seismic isolators: Design guidance for buildings. *MCEER Report*, 15-0005.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción, § 1 (2015).
- Morales, E., Filiatrault, A., & Aref, A. (2017). *Sustainable and low cost room seismic isolation for essential care units in developing countries*. Paper presented at the 16th world conference on earthquake engineering, Santiago, Chile Google Scholar.
- Naeim, F., & Kelly, J. M. (1999). *Design of seismic isolated structures: from theory to practice*: John Wiley & Sons.
- Nikolaou, S., Vera-Grunauer, X., Gilsanz, R., Luque, R., Kishida, T., Diaz-Fanas, G., & Lopez, S. (2017). *GEER-ATC Mw7. 8 Ecuador4/16/16 Earthquake Reconnaissanc Part I: Seismological & Ground Motion Aspects*. Paper presented at the Santiago: 16th World Conference on Earthquake Engineering.
- Phares, B. M., Rolander, D. D., Graybeal, B. A., & Washer, G. A. (2001). Reliability of visual bridge inspection. *Public Roads*, 64(5).
- Rojo, A. N. (2012). Conservación de aparatos de apoyo, juntas y drenaje. *RUTAS*, 148, 47.
- Romo, L. M. (2008). <Informe de Rediseño Estructural del Puente Bahía - San Vicente.pdf> *Memoria de Cálculo del Puente de Bahía de Caráquez* (Vol. 1, pp. 118).
- Romo, M. (2016a). *Los Caras Isolated Bridge in the 2016 Muisne Ecuador Earthquake: Behavior of Piers and Deep Pile Foundations*. (paper 6). Quito Ecuador.
- Romo, M. (2016b). *Manual de monitoreo y mantenimiento estructural para el puente "Los Caras", con especial énfasis en aisladores sísmicos, sincronizadores de movimiento, juntas de gran desplazamiento, pilotes estructurales, estructura de hormigón pretensado, estructura de hormigón postensado y sistemas de apoyo convencionales*. Retrieved from
- Romo, M. (2016c). *Manual de Monitoreo y Mantenimiento Estructural para el Punte "Los Caras"*. Manual. Quito - Pichincha.
- Romo, M. (2017). *Apuntes sobre Comportamiento y Cimentaciones Profundas de Pilas del Puente "Los Caras"*. Quito.
- Sarlis, A. A., & Constantinou, M. C. (2013). *Model of triple friction pendulum bearing for general geometric and frictional parameters and for uplift conditions*: MCEER.
- Tsopelas, P., Constantinou, M., Kim, Y., & Okamoto, S. (1996). Experimental study of FPS system in bridge seismic isolation. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 25(1), 65-78.
- Van Lund, J. A. (1995). *Bridge bearing replacement*. Paper presented at the Fourth International Bridge Engineering Conference, Transportation Research Board, National Academy Press, Washington, DC.
- Villaverde, R. (2009). *Fundamental concepts of earthquake engineering*: CRC Press.
- Zayas, V. A., Low, S. A., & Mahin, S. A. (1987). *The FPS earthquake resisting system experimental report*: Earthquake Engineering Research Center.
- Zealand, T. N. (2001). *Bridge inspection and maintenance manual, rev. ed*: Transit New Zealand.