



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación Estudios de Posgrado

**Propuesta de solución estructural del Viaducto
“El Salto”, dividido por una falla geológica.**

TESIS

Que para obtener el grado de
MAESTRO EN INGENIERÍA

Presenta:

ING. ALBERTO MEJÍA VÁZQUEZ

Asesor de tesis:

M.I. MARCO ANTONIO GONZÁLEZ Y GONZÁLEZ

M.I. SILVIA CONTRERAS BONILLA

Puebla, Pue.

junio 2020



BUAP

Oficio No. 1405/2019

C. Alberto Mejía Vázquez

Pasante de la Maestría en Ingeniería
con opción terminal en Estructuras
Facultad de Ingeniería, BUAP.
Presente

Por medio del presente, el suscrito M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de Tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema intitulado **Propuesta de solución estructural del Viaducto El Salto dividido por una falla geológica**, para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Estructuras. Asignándose como Director al M.I. Marco Antonio González y González y Co-director a la M.I. Silvia Contreras Bonilla.

Sin otro particular de momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Pensar bien, para vivir mejor"
H. Puebla de Zaragoza, Junio 6 de 2019.


M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández
Director

C.c.p. M.I. Marco Antonio González y González y M.I. Silvia Contreras Bonilla, Director y Co-director del tema de tesis.

C.c.p. Archivo

ABH/MCF/sco*



Facultad
de Ingeniería

Bvd. Valsequillo y Av. San Claudio
sn. edif. ING - 4 Col. San Manuel
Ciudad Universitaria
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7510

Dedicatoria,

Este trabajo lo dedico a mi hijo, sin que esto sea una línea de vida sino una muestra de lo que él puede ser capaz de inspirar.

Agradecimientos,

A mi familia y amigos por su tiempo, apoyo y esfuerzo, los cuales fueron y han sido parte importante para alcanzar esta meta, a todos y cada uno de ellos mi mas sincera gratitud,

A Alina por su paciencia y amor,

A Jorge por ese corazón tan noble.

Tabla de Contenidos

RESUMEN	11
ABSTRACT	11
INTRODUCCIÓN	12
CAPÍTULO I. GENERALIDADES DEL PROYECTO	14
I.1 Antecedentes	14
I.2 Descripción de la estructura.....	16
I.3 Descripción del sitio	20
I.4 La Falla Geológica.....	21
CAPÍTULO II. PROCEDIMIENTO Y ELECCIÓN DE MÉTODO	25
II.1 ESTUDIOS PREVIOS Y REFERENCIAS.....	25
II.2 Base Teórica.....	27
CAPÍTULO III. MOVIMIENTOS SÍSMICOS Y GENERACIÓN DE ESPECTROS SÍSMICOS	31
III.1 Aspectos a considerar	32
III.2 Manual de Obra Civil de CFE (Prodisis).....	33
III.3 Instituto Mexicano del Transporte (IMT).....	38
III.4 Acelerogramas	41

CAPÍTULO IV.	PROCESO Y ANÁLISIS	45
IV.1	Modelo	45
CAPÍTULO V.	EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	53
V.1	RESULTADOS.....	53
CONCLUSIONES		59
RECOMENDACIONES.....		60
	ANEXO 1. INFORMACIÓN GEOLÓGICA.....	66
	ANEXO 2. ACELEROGRAMAS Y ESPECTROS.....	77

Lista de Tablas

Tabla 1. Datos generales de la Autopista (SCT, octubre 2018).....	15
Tabla 2. Valores característicos del espectro sísmico de la exploración geotécnica inicial (FICSA, 2015).....	32
Tabla 3. Valores característicos del espectro sísmico a partir de estudios nuevos (FICSA, 2015) (FICSA, 2017)	33
Tabla 4. Datos del estudio geofísico (Mextypsa, 2017).....	34
Tabla 5. Parámetros de respuesta en roca (Prodisis v4.1, [software], 2017).	36
Tabla 6. Tabla resumen de parámetros (Prodisis v4.1, [software], 2017)	36
Tabla 7. Valores característicos del espectro sísmico para estructuras tipo B (SCT, 2001)	39
Tabla 8. Valores del factor de comportamiento sísmico Q. (SCT, 2001).....	40
Tabla 9. Aceleregramas utilizados y sus características (BDSF)	41
Tabla 10. Resumen de los factores de escalamiento.....	43
Tabla 11. Propiedades de los materiales.	46
Tabla 12. Propiedades de la sección en elementos barra.	46
Tabla 13. Propiedades de la sección en elementos placas.	46
Tabla 14. Propiedades de los resortes para apoyos.....	46
Tabla 15. Patrón de Cargas asignados.	47
Tabla 16. Caso de cargas historia-tiempo.	47
Tabla 17. Reacciones en la base.	54
Tabla 18. Periodos y frecuencias del análisis modal	55

Lista de Figuras

Figura 1. Ubicación geográfica (SCT, octubre 2018).....	15
Figura 2. Planta general (OHL, 2014).	16
Figura 3. Elevación por el eje de trazo (OHL, 2014).....	17
Figura 4. Sección transversal tipo (OHL, 2014).	17
Figura 5. Planta de ubicación de la cimentaciones del viaducto (OHL, 2014).....	18
Figura 6. Pila en el apoyo 5 (OHL, 2014).....	18
Figura 7. Cimentación y sección en columnas (OHL, 2014).....	19
Figura 8. Trazo general y ubicación de la estructura. (Google Earth, 2014).	20
Figura 9. a) Mapa sismotectónico del graben de Acambay. Localización del graben de Acambay en el contexto geodinámico del contacto de placas en México SMTTA (Sunye-Puchol, y otros, 2015). (Martínez-Reyes & Nieto-Samaniego, 1990).....	22
Figura 10. Geología Local (INEGI, 2017).....	22
Figura 11. Imágenes satelitales indicando los contactos litológico (FICSA, 2017).	23
Figura 12. Influencia efectiva en un puente de tres claros (a) para aceleraciones de falla paralela, (a) para aceleraciones de falla normal.....	30
Figura 13. Determinación de la zona sísmica (Prodisis v4.1, [software], 2017)	34
Figura 14. Regionalización sísmica de la república mexicana (SCT, 2001).	38
Figura 15. Proceso de obtención de los espectros con los diagramas de intensidad Arias.	43
Figura 16. Representación tridimensional.	45
Figura 17. Definición de los espectros de diseño.	48
Figura 18. Definición Tiempo-historia de los canales C1.	50

Figura 19. Definición Tiempo-historia de los canales C2.	52
Figura 20. Definición de la función tiempo-historia para el desplazamiento en la base ..	52
Figura 21. Desplazamientos en los nodos de ejes de los apoyos. TH7.....	53
Figura 22. Desplazamientos máximos en la dirección uy.....	54
Figura 23. Comparación de desplazamiento entre el nodo 249 y 254.	58

Lista de gráficos.

Gráfico 1. Espectro de respuesta de referencia (Prodisis v4.1, [software], 2017).	35
Gráfico 2. Espectro de diseño (Prodisis v4.1, [software], 2017)	37
Gráfico 3. Espectro sísmico para estructuras tipo B (SCT, 2001).	39
Gráfico 4. Comparativa de espectros de respuesta con la referencia (Canal 1).	44
Gráfico 5. Comparativa de espectros de respuesta con la referencia (Canal 2).	44
Gráfico 6. Comparativa de desplazamientos en el sentido longitudinal [nodo 249]	55
Gráfico 7. Comparativa de desplazamientos en el sentido transversal [nodo 249]	56
Gráfico 8. Comparativa final de desplazamientos en el sentido Longitudinal [nodo 249]	56
Gráfico 9. Comparativa final de desplazamientos en el sentido transversal [nodo 249] ..	57

RESUMEN

En la práctica actual existen métodos para evaluar la respuesta dinámica ante eventos sísmicos en las estructuras, sin embargo, los estudios de sitio y los criterios indicados en la normativa actual no contemplan la evaluación ante la cercanía de una falla geológica, las principales han sido consideradas para la realización de mapas de peligro sísmico pero gran cantidad de estas no han sido localizadas por lo que limita tomarlas en cuenta para un diseño particularizado.

Este trabajo propone una metodología basado en los estudios realizados por Chopra (2008), donde incorpora los efectos de una falla geológica a la respuesta dinámica en puentes de un claro. Se ha aplicado esta metodología a un puente con un ángulo de esviaje y una estructuración de 7 claros en el cual se ha detectado la presencia de una falla geológica que se encuentra y está ubicada en la zona central del país, se comparan los resultados de la respuesta con los métodos indicados en la normativa. Como resultado, ésta evaluación reporto incrementos importantes en los desplazamientos en la superestructura que, sin embargo, presentan magnitudes que permiten su construcción,

ABSTRACT

In the actual practice exist many methods to evaluate the dynamic response due seismic events on the structures, however, the site reports and codes criteria's in Mexico do not include the investigation of the dynamic effects of the structures near or over geological failure. Some efforts contain the effects of this failures have been taken into to realize seismic hazard maps but site work are neglect so cant detect and be use to consider in the specific design.

This work propose a method based in research made by Chopra (2008), where add the effects of geological failure to dynamic response in single clearance bridges. Have been applied this method to a seven clearance skewed bridge in witch was detected a failure, this bridge is in the center of country zone; the results were compare with the response spectrum made with the local codes. The final results report an increase in the displacement at the top, however, can be handle for allow the construction.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se enfoca en el estudio de una estructura la cual forma parte de un ambicioso proyecto carretero que se encontraba en la fase constructiva. La detección una falla geológica implicaba no solamente el retraso en la construcción sino el planteamiento de un posible cambio en el trazo lo que impactaba directamente en el presupuesto y funcionalidad al modificar sustancialmente la longitud. Por lo tanto, consideraron distintas formas de reestructurar el viaducto, por ejemplo evaluar con la normativa, que por un lado limita el comportamiento dúctil con un factor de comportamiento Q de 4 como más y por otro lado se buscaba además impactar lo menos posible en el costo por lo que se buscaría usar la cimentación ya construida.

Los retos que implica la solución de este problema motivaron este trabajo en el cual se buscara una alternativa para cruzar por el trazo actual evaluando el comportamiento de la estructura aplicando algunos métodos que se ha estudiado en otras partes del mundo y que se propone como un método a incorporar en la normativa en la evaluación de puentes vehiculares y ferroviarios de mayor importancia.

Existen algunos lineamientos que en la práctica profesional se han seguido en un afán de actualizar y tomar en cuenta los factores regionales y locales en el diseño estructural de puentes, tal es el caso de las normas de SCT emitidas por el Instituto Mexicano del Transporte y de manera no oficial pero de uso común, el Manual de diseño publicado por CFE, el cual brinda consideraciones más amplias para afrontar el problema del diseño sísmico de puentes sin embargo no lo aborda con la suficiente profundidad y mucho menos antes situaciones particulares como lo es la presencia de una falla geológica.

Al no tener una normativa específica de puentes en México, la manera de evaluar este tipo de estructuras y, sobre todo, las consideraciones *a priori* de las consecuencias de tener una falla geológica interactuando con el sistema estructural de Puentes ante eventos sísmicos, queda definida por las normativas externas, manuales de diseño y experiencia de aquellos profesionales

que han tenido este acercamiento. En el CAPÍTULO III se describen los espectros de diseño que señala la normativa actual y los cuales tomaremos como referencia, así mismo, se incluyen los acelerogramas para evaluar la respuesta y a la que se integrara los efectos de la falla geológica.

Se expone en la parte final una solución a partir de la evaluación del comportamiento estructural el cual concluirá a partir de los desplazamientos en la superestructura descritos en el CAPÍTULO V al advertir que los eventos sísmicos son lo que rigen el diseño y que son en los que se enfoca este estudio. Esta investigación evalúa la demanda sísmica de un puente de concreto pretensado de 7 claros que cruza una zona de falla geológica. Dos procedimientos de análisis se muestran para la evaluación de puentes en esta investigación, el análisis con espectro de respuesta y el análisis dinámico no lineal descritos en el CAPÍTULO IV. Estos dos procedimientos estiman las demandas sísmicas por superposición de los valores máximos entre el cuasi-dinámico modal espectral y un análisis tiempo historia de las respuestas dinámicas del puente.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES DEL PROYECTO

En recientes fechas el proyecto de la autopista Atlacomulco-Atizapán comenzó su construcción. En el año 2014 se inician los trabajos de excavación para los apoyos del viaducto “El Salto” con un diseño inicial que contemplaba los retos habituales en el suelo como lo es una variabilidad de las capacidades del suelo en los distintos apoyos. Durante la excavación del desplante de cimentación se detecto un cambio abrupto en la configuración del terreno respecto de los que se habían obtenido en la exploración previa el cual promovió la realización de algunos estudios geotécnicos adicionales para evaluar las condiciones del suelo lo que posteriormente concluyo en la detección de una falla geológica que modificaba las consideraciones iniciales del proyecto y lo que motiva esta tesis.

I.1 ANTECEDENTES

La autopista Atlacomulco-Atizapán es la obra mas ambiciosa que se desarrollo en el estado de México y que forma parte Plan Nacional de Infraestructura que busca interconectar uno de los 15 ejes troncales y que conecta precisamente a estos dos municipios promoviendo así la movilidad, turismo, tiempos de traslado en transporte de carga, que tengan un impacto directo en la economía local y regional. Para ello la Secretaria de Comunicaciones y Transporte (SCT) por medio de la Dirección General de Desarrollo Carretero contempla una autopista de altas especificaciones proyectada para una velocidad de 110km/hr con capacidad para alojar 4 carriles de circulación, los cuales incluyen acotamientos, 5 entronques (Chiluca, Villa del Carbón, Ixtlahuaca, La Luna y Atlacomulco), 2 túneles, 12 viaductos, una autopista tipo A4.

La autopista tiene una longitud de 74 km, iniciando en el km. 19+620 de entronque Chiluca, ubicado en el km. 14+500 de la autopista Chamapa-Lechería y termina en el km. 100+046 del entronque Atlacomulco, ubicado en la confluencia de las autopistas Atlacomulco Maravatío, libramiento norte de la Ciudad de México y de la carretera federal Atlacomulco-Palmillas, en el Estado de México como se muestra en la Figura 1 (SCT, octubre 2018).



Figura 1. Ubicación geográfica (SCT, octubre 2018).

Como parte de la autopista se tienen estructuras mayores las cuales contemplan 12 viaductos y dos túneles distribuidos en tres tramos, El viaducto “Rio El Salto” se ubica a la altura del km 91+874.00 correspondiente al tramo 3 de la autopista. En su concepción se tomaron en cuenta los requerimientos geométricos de proyecto propios de la necesidad de la autopista, así como las recomendaciones y normativas que actualmente rigen.

Tabla 1. Datos generales de la Autopista (SCT, octubre 2018)

Información general del proyecto			
Tipo	A-4	Longitud	74km
Ancho de corona	21.0m	Tramo	20+931 AL 90+601
Ancho de calzada	14.0m	Tipo de terreno	montañoso
Velocidad de proyecto	110km/hr	Tipo de pavimento	Carpeta asfáltica

En fechas recientes y como parte de la construcción durante la excavación en el apoyo 5 se detectó un cambio en la configuración del suelo, para confirmar esto se realizaron dos sondeos exploratorios en la pila del eje 5. A partir de los resultados se detectó una falla geológica la cual el primer objetivo fue determinar si es activa o no. Los resultados se corroboraron dando paso a la revisión del proyecto con el fin de determinar las implicaciones que traería esta sobre la estructura.

I.2 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

El viaducto “El Salto” km 91+874.00 tiene una longitud de 304 metros cruzando el río del mismo nombre, se compone de 7 tableros (4 de 46 metros en los tableros de los ejes 1 a 5 y 3 de 40 metros en los tableros de los ejes 5 al 8) cada tablero descarga a 9 traveses tipo Nebraska de 2.4 metros de peralte, con separación de 2.46 metros y voladizos de 1.19 metros, teniendo una sección transversal de 22.06 metros que da alojamiento a 4 carriles de tránsito y 2 acotamientos contenidos en sus 21 metros de ancho de calzada por el que circularán camiones de diseño T3-S2-R4 tipo 1 de 72.5 toneladas siendo sus guarniciones de 53 cm en ambos lados.

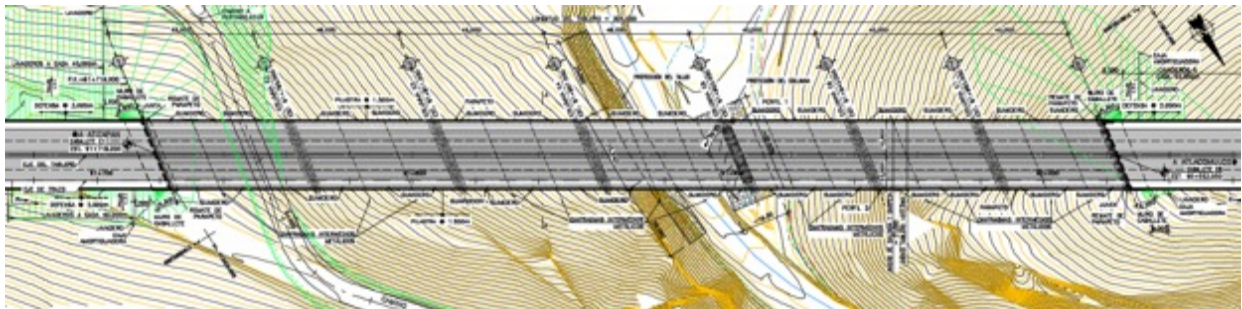


Figura 2. Planta general (OHL, 2014).

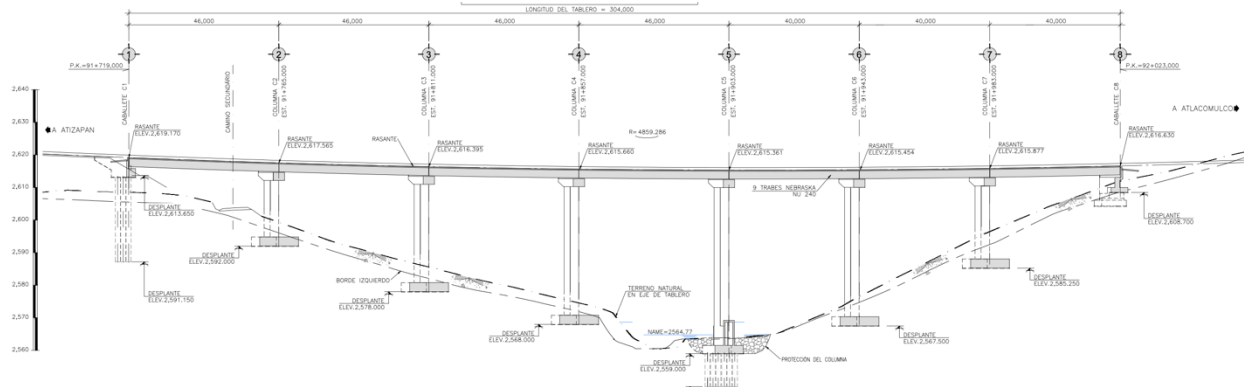


Figura 3. Elevación por el eje de trazo (OHL, 2014).

La superestructura se compone por dos tableros tipo, de los tramos entre los ejes 1 a 4 se tiene un claro de 46.00 m y de los tramos de los ejes 5 a 7 un claro de 40.00 m. La estructuración de los tableros es con 9 traves prefabricadas pretensadas tipo NEBRASKA NU/240 de peralte constante, sobre las cuales se apoya una losa en concreto reforzado de 25 cm de espesor. (Figura 4)

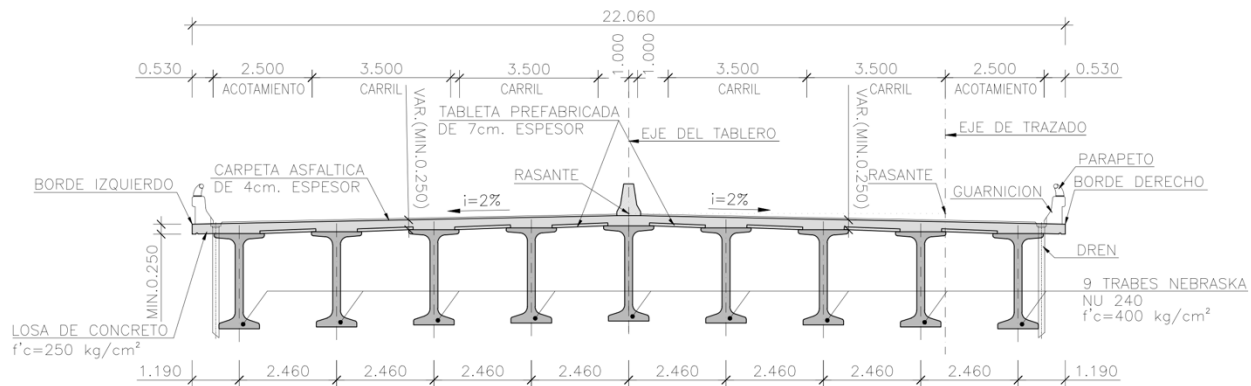


Figura 4. Sección transversal tipo (OHL, 2014).

En la subestructura, los tableros se apoyan sobre caballetes y 12 columnas, ambos de concreto reforzado. Las columnas son cimentadas sobre zapatas (cada 2 columnas para una zapata) a excepción de las columnas C5 (cimentadas sobre una zapata con 12 pilas de longitud 24.00 metros) mostrada en la Figura 3. Para el caballete C1 se recurre a cimentaciones profundas (6 pilas de longitud 22.50 metros), mientras el caballete C8 es cimentado superficialmente sobre un terraplén de suelo mecánicamente estabilizado. Estas columnas tienen una sección transversal hueca constante en todo el fuste.

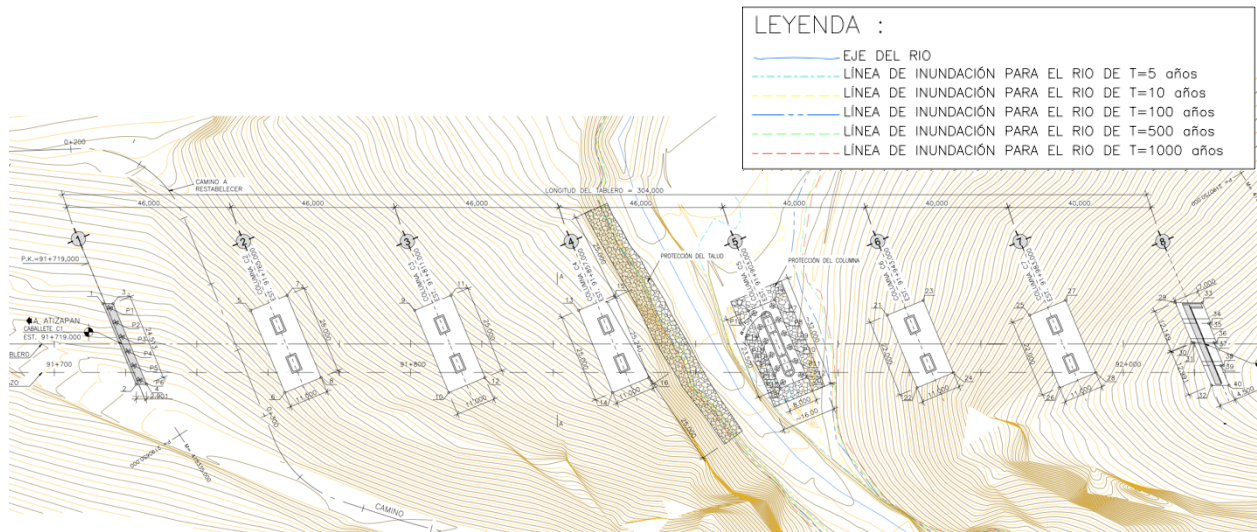


Figura 5. Planta de ubicación de la cimentaciones del viaducto (OHL, 2014).

Cada una de las travesas descansa sobre apoyos de neopreno dispuestos sobre los bancos de los caballetes y de los cabezales de las columnas. (Figura 6)

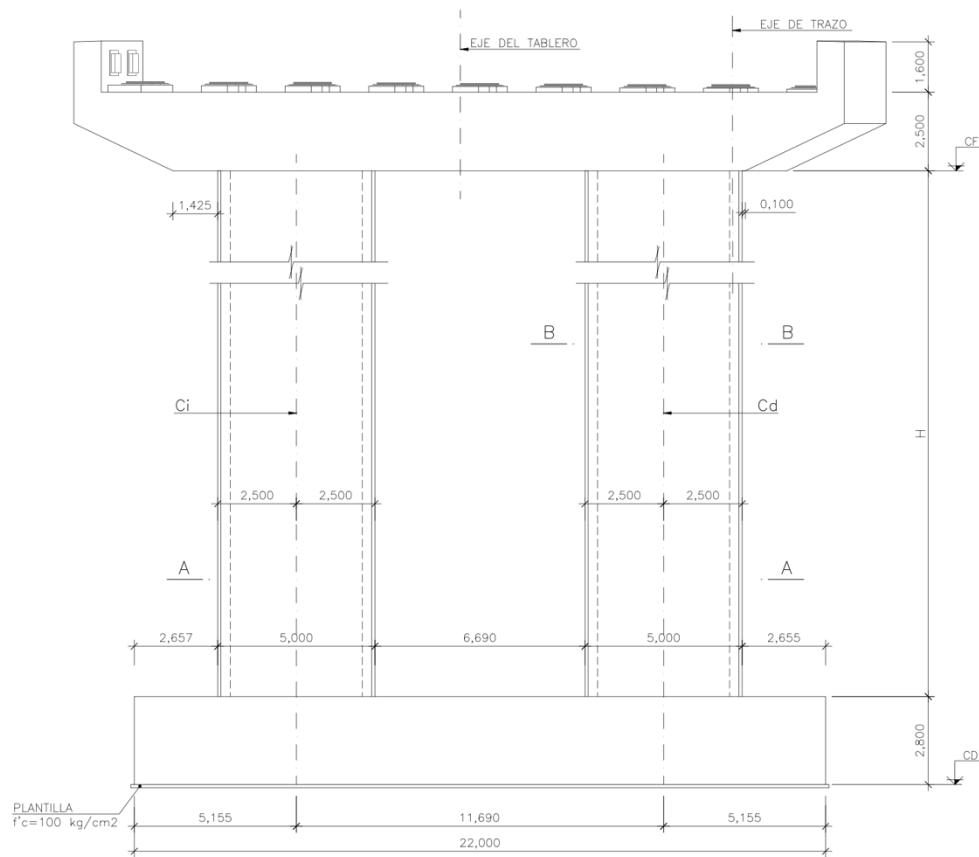


Figura 6. Pila en el apoyo 5 (OHL, 2014).

I.3 DESCRIPCIÓN DEL SITIO

El municipio de Atlacomulco se ubica en la zona noreste del estado del estado de México, la zona de estudio se localiza en el extremo norponiente de la sierra de Las Cruces en los limites de lo que de acuerdo al reporte de FICSA se conoce como la Fosa de Acambay, así mismo, este se hace necesario debido a la presencia del arroyo “Los Corrales” que fluye en dirección de norte a sur. La zona del viaducto se ubica entre las elevaciones 2,560 msnm, correspondiente al cauce del arroyo y la 2,620 msnm en la parte alta.

En el mismo documento se indica que orográficamente se localiza en la sierra de San Andrés Timilpa, la cual se ubica al noreste del estado como se muestra en la Figura 8, abarca las formaciones montañosas de Jilotepec, Chapa de Mota, Jocotitlan, Acambay y Peña de Ñado. El suelo, esta compuesto por rocas de origen ígneo fundamentalmente andesitas y basaltos.



Figura 8. Trazo general y ubicación de la estructura. (Google Earth, 2014).

I.4 LA FALLA GEOLÓGICA

La detección de la falla geológica se realizó durante la ejecución de la excavación del apoyo 5 del viaducto como parte de la supervisión. Inicialmente se encontró una discrepancia con lo reportado en los estudios de la mecánica de suelo, se identificaron las discontinuidades de las capas del terreno lo que inmediatamente despertó el interés de los especialistas y propiciando la realización de pruebas adicionales para comprobar y corroborar la existencia de la falla y sus características.¹

Como parte de los estudios que se realizaron se obtuvo una descripción de la zona desde el punto de vista geológico y se pudo asociar a un conjunto de fallas mayores como la Pastores, mismas que pertenecen al graben de Acambay. Sunye-Puchol, et al., identifican la actividad de las fallas en el denominado graben² de Acabay (Figura 9). El graben de Acabay está delimitado por cuatro fallas normales mayores de orientación E-O: las fallas Acambay-Tixmadejé y EpitacioHuerta por el norte, y las fallas Venta de Bravo y Pastores por el sur. En el centro del graben, el sistema de fallas Temascalcingo-Tepuxtepec Acámbaro (SFTTA), atraviesa toda la cuenca de Este a Oeste (Martínez-Reyes & Nieto-Samaniego, 1990)

¹ En el anexo 1, hace un pertinente repaso de las fallas y del tipo de fallas.

² Los graben y horst son estructuras que suelen localizarse en el contexto de la tectónica de placas y se caracterizan por tratarse de zonas hundidas o valles alargados, limitados por fallas con desplazamiento vertical. En el anexo 1 se describe este tipo de estructuras geológicas

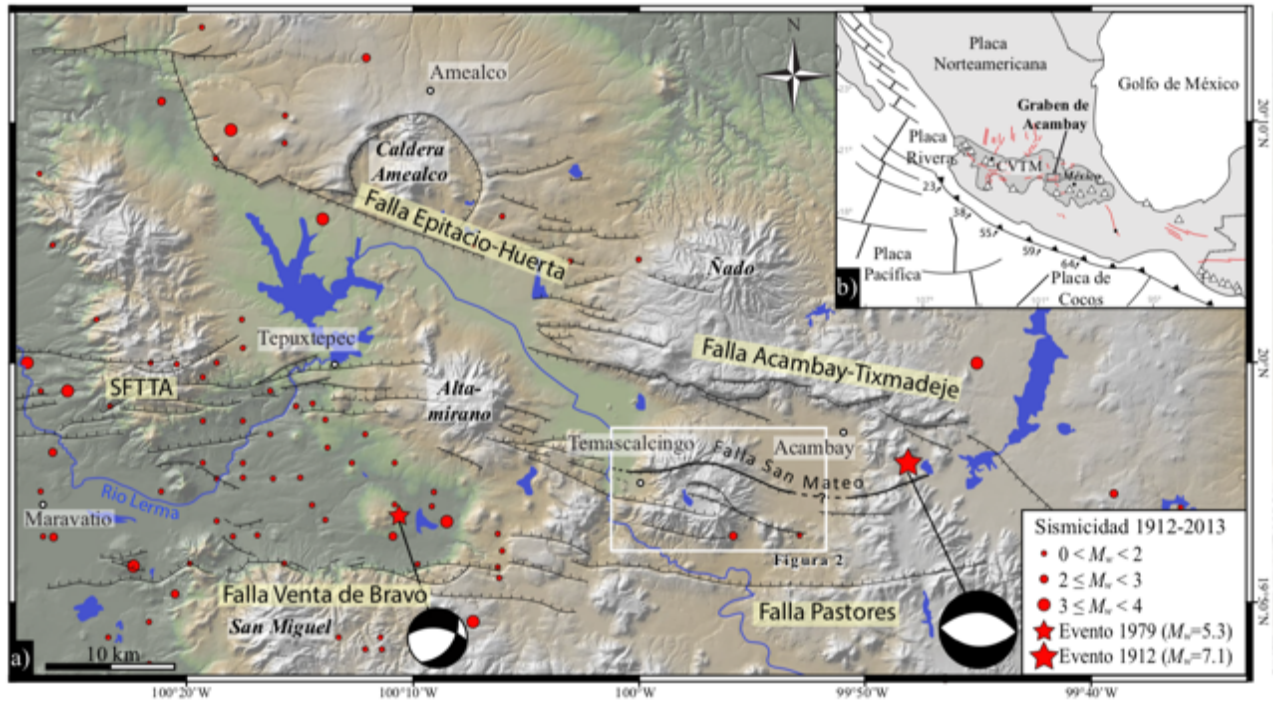


Figura 9. a) Mapa sismotectónico del graben de Acambay. Localización del graben de Acambay en el contexto geodinámico del contacto de placas en México SMTTA (Sunye-Puchol, y otros, 2015). (Martínez-Reyes & Nieto-Samaniego, 1990)

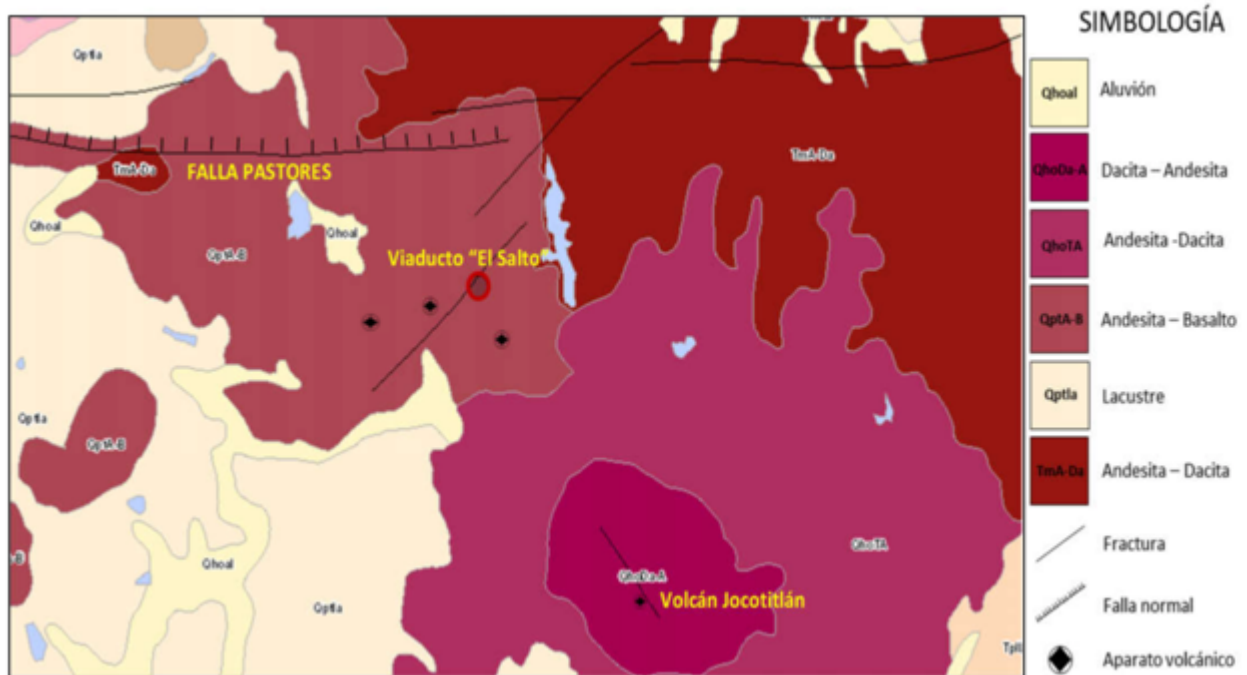


Figura 10. Geología Local (INEGI, 2017).

Las fallas F1, F2 y F3 fueron identificadas como normales de acuerdo a lo expresado en el informe (FICSA, 2017), ahí mismo concluyen finalmente que se forman dos zonas de inestabilidad, por tal motivo es que se debe tomar en cuenta en el análisis estructural, motivo de esta tesis.



Figura 11. Imágenes satelitales indicando los contactos litológico (FICSA, 2017).

Un tema de primordial interés de los especialistas fue determinar si esta falla o conjunto de fallas son activas o no. Este dictamen afecta porque es lo que nos determina si existe un riesgo de desplazamiento durante un evento sísmico, considerando que en sí, la propia falla pertenece al graben de Acambay que está asociada a un nivel de peligro sísmico (Sunye-Puchol, y otros, 2015), para la determinación de la actividad de la falla existen indicadores geológicos, geomórficos, geodésicos y sismológicos, determinada por el potencial o la probabilidad de un futuro desplazamiento asociado a un evento de la configuración tectónica y la cantidad de tiempo en que se presento el mas reciente desplazamiento.

Uno de los mas convincentes argumentos o evidencia de la actividad de una falla geológica es la relación *cross-cutting* o *non-cross-cutting* con una unidad de datos. Es decir si la actividad se ubica

en la era holocena³, entonces, tanto la edad como la cantidad de desplazamiento puede ser usada para determinar la tasa de deslizamiento y el intervalo de ocurrencia si existe un sismo característico conocido.

Particularmente, en estos estudios de las fallas del Graben de Acambay-Tixmadejé, Temascalcingo-San Mateo y de Pastores se determinan edades recientes de actividad, durante el Holoceno (últimos 10,000 años) que las convierte desde el punto de vista ingenieril como fallas activas y las fallas F1, F2 y F3 dentro de la zona de interés puedan ser capaces de presentar desplazamientos por acomodo. Durante estos estudios se calcularon magnitudes de 6.6 a 6.8 M, con base en el desplazamiento máximo de 50 cm y de ruptura de falla de 33 km largo (Langridge, et al., 2013 y Sunye, et al., 2015).

Históricamente también se identificó un evento muy relevante en la sismología local, el día 19 de noviembre de 1912 ocurrió un sismo con magnitud aproximada de 6.9, localizado en el poblado de Acambay, Estado de México (19.93 °N, 99.83 °W). El sismo fue a las 07:55, hora local (13:55, hora UTC). Este sismo ha sido caracterizado como un sismo intraplaca, ubicado en la placa tectónica de Norteamérica, y se considera como uno de los sismos más importantes en la historia sismológica de México. (CENAPRED)

Cluff y Cluff (1984) señalaron que el uso común actual de “activo” e “inactivo” puede ser una simplificación científica excesiva que puede conducir a una ubicación o diseño incorrecto de las estructuras de ingeniería.

³ Periodo geológico con inicio hace 11700 años.

CAPÍTULO II. PROCEDIMIENTO Y ELECCIÓN DE MÉTODO

Sabemos que en una estructura cercana a una falla geológica presenta efectos desfavorables que se identifican como un desplazamiento relativo en el suelo a lo largo de la falla lo que afecta directamente los movimientos reportados en la superestructura, en este caso un puente vehicular. Una vez que se han determinado por parte de los geólogos y geotecnistas la necesidad de tomar en cuenta la falla geológica en el diseño de la estructura debido a sus características se procederá al análisis estructural.

II.1 ESTUDIOS PREVIOS Y REFERENCIAS

Los eventos sísmicos, sus efectos y consecuencias han sido estudiados exhaustivamente, prueba de ello son la cantidad de artículos que anualmente se publican, sin embargo, estos están enfocados en su mayoría a edificios y dentro de la infraestructura que constituye una nación las vías de comunicación son cruciales ante eventos catastróficos. Por esta razón es que los puentes vehiculares son considerados en los códigos de diseño como una estructura de gran importancia incrementando los factores de seguridad.

Uno de los primeros acercamientos y que además fue de gran relevancia para la ingeniería es el realizado por Tseng y Penzien en 1975 el cual realiza un estudio del comportamiento elásticos a flexión un par de apoyos de un puente a partir de un trabajo de un modelo tridimensional elastoplástico y un comportamiento discontinuo que comúnmente describe a las juntas de calzada por medio de un análisis no lineal basado en un estudio (Chen 2001). En su modelo de estudio características importantes como los efectos de la separación, el impacto y el deslizamiento relativo del contacto con el suelo fueron considerados. Hoy en día es fácilmente es posible hacer este tipo de modelos, pero esta investigación la relevancia de tomar en cuenta un modelo mas refinado para el análisis de los puentes asi como evaluar las respuestas considerando un comportamiento no lineal.

Se usaron elementos a flexión biaxial con un modelo bilineal (Saiidi & Ghusn, 1986) (un modelo de un sistema de 5 resortes) para evaluar la interacción suelo-estructura de la columna de una pila

de un puente. Posteriormente Imbsen y Penzien (1986) consideraron, además, la evaluación de las características de absorción de energía en las columnas de pilas de puentes de autopistas por medio de incluir el endurecimiento cinemático en la unión trabe columna.

Apoyos de puentes de concreto reforzado fueron modelados considerando una restricción rígida considerando una masa nodal en los elementos que incluyeran efectos de rotación de la masa en tres direcciones ortogonales fue desarrollado por Ingham en 1997 (Ingham et al. 1997)

Unos procedimientos simplificados fueron propuestos por Goel y Chopra en el 2008, con el objetivo de analizar y comparar el desempeño sísmico de los puentes sujetos a un desplazamiento inducido por una falla geológica y movimiento del suelo, sin embargo debido a lo limitado del objetivo de la investigación la aplicabilidad de esos procedimientos fue acotado a puentes convencionales en condiciones ideales como son un trazo recto. Por lo que ese. Mismo año trabajaron en la misma investigación pero ampliando la aplicabilidad a puentes curvos.

Un análisis mas profundo realizado por Afshin y Amjadian (2010) muestra que los puentes con geometrías complejas como los puentes en curva son mas susceptibles a un daño en comparación a los de trazo recto con geometrías regulares. El estudio mostro que el acoplamiento de los movimientos traslacionales y rotacionales de un tablero de la superestructura de un puente produce efectos notables en el concreto teniendo como consecuencia una posible ruptura en el tablero o el apoyo. Este modelo del tablero de superestructura dinámico en el plano, que sin embarco considera las propiedades remanentes del material intactas y con un comportamiento lineal durante la excitación de un evento sísmico, demostrando comportamientos normales exceptuando bajo un sismo irregular de larga duración.

En el desarrollo de este tipo de estudios y con la experiencia en daños observados en la zona de California en recientes eventos sísmicos, en especifico de puentes que cruzan fallas geológicas, el gobierno del Estado de California en Estados Unidos a través de el departamento de transporte (CALTRANS) con el fin de integrar una mejor estrategia ante este tipo de eventos y debido al riesgo preexistente en la zona, dado que el evitar la construcción de puentes no siempre seria viable, incorporo una clasificación de los puentes en sus códigos normativos de diseño en relación

al sitio específico sismológico para determinar los movimientos del suelo que varían espacialmente y el tipo de estructuración y demanda de tráfico para indicar los procedimientos del tipo de análisis a emplear.

II.2 BASE TEÓRICA

Las aproximaciones que se tiene para evaluar los efectos sísmicos son los presentados por el departamento de transporte del estado de California (Caltrans, 2013)⁴ el cual propone 3 alternativas:

Análisis Modal Pushover (MPA)

Análisis Dinámico Lineal (LDA)

Análisis Estático Lineal (LSA)

El método LSA es el más sencillo, pero también es el más conservador del cual se ha estimado un 2.5 veces más el valor máximo de la aceleración por tal razón el método recomienda usar en la medida de los posibles los métodos MPA y LDA los cuales son los utilizados en esta tesis. A continuación, se describen estos métodos.

Definido como el método exacto por análisis no lineal de la respuesta tiempo historia (RHA) y el análisis por espectro de respuesta de ruptura de falla (FR-RSA por sus siglas en inglés) ambos descritos por Goel y Chopra (Chopra & Goel, 2008). En ambos métodos se calcula el punto máximo de aceleración de un análisis cuasi-estático por medio de un análisis no lineal bajo los desplazamientos del suelo asociado a la falla y estas respuestas en la estructura serán estimadas considerando la regla de combinación cuadrática completa (CQC por sus siglas en inglés).

⁴ MTD 20-8, “Analysis of ordinary Bridges that Cross faults”

La componente de desplazamiento en el apoyo \hat{i} fe un puente debido al movimiento de una falla de ruptura definidas como $u_{gi}^{FP}(t)$ en la direccion paralela a la falla y $u_{gi}^{FN}(t)$ en ladireccion normal a la falla se calculan con la siguiente aproiximación:

$$u_{gi}^{FP}(t) = \alpha_i^{FP} u_g^{FP}(t)$$

$$u_{gi}^{FN}(t) = \alpha_i^{FN} u_g^{FN}(t)$$

Donde $u_g^{FP}(t)$ y $u_g^{FN}(t)$ son los desplazamientos en dirección paralela y normal a la falla corresponden a la historia de desplazamientos debidos al movimiento en la ubicación de referencia y α_i^{FP} y α_i^{FN} pueden diferrir de +1 o -1.

Para excitaciones del suelo definidas en las ecuaciones 1 y 2 la ecuación de movimiento es:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\mathbf{v}_{eff}^{FP}\ddot{u}_g^{FP}(t) - m\mathbf{v}_{eff}^{FN}\ddot{u}_g^{FN}(t)$$

En esta ecuación m , c y k representan la matriz de masa, rigidez y amortiguamiento del sistema respectivamente; \ddot{u} , \dot{u} y u representan los vectores de aceleración, velocidad y desplazamiento del puente; \mathbf{v}_{eff}^{FP} mostrado en la ecuación de movimiento es el vector de influencia efectivo paralelo al movimiento en la falla definido como el vector de desplazamientos en todos los grados de libertad de la estructura debidos a la aplicación simultanea de todos los desplazamientos estaticos en el apoyo con valor igual a α_i^{FP} en el iesimo apoyo elastico del modelo del puente, y tambien $\ddot{u}_g^{FP}(t)$ y $\ddot{u}_g^{FN}(t)$ son las aceleraciones en el apoyo en el apoyo de referencia en las direcciones paralela y normal de la falla, respectivamente.

Los desplazamientos total de el analisis linear elastico del puente estan dados por:

$$u^t(t) = u^s(t) + u(t) = \iota_{eff}^{FP} \ddot{u}_g^{FP}(t) + \iota_{eff}^{FN} \ddot{u}_g^{FN}(t) + \sum_{i=0}^n \Gamma_n^{FP} \phi_n D_n^{FP}(t) + \sum_{i=0}^n \Gamma_n^{FN} \phi_n D_n^{FN}(t)$$

Donde:

$$\Gamma_n^{FP} = \frac{\phi_n^T \mathbf{m} \iota_{eff}^{FP}}{\phi_n^T \mathbf{m} \phi_n}$$

$$\Gamma_n^{FN} = \frac{\phi_n^T \mathbf{m} \iota_{eff}^{FN}}{\phi_n^T \mathbf{m} \phi_n}$$

$D_n^{FP}(t)$ y $D_n^{FN}(t)$ corresponden a la respuesta de desplazamiento del n^{ta} modo en un modelo de un sistema de un grado de libertad sujetos a las aceleraciones del suelo de referencia $\ddot{u}_g^{FP}(t)$ y $\ddot{u}_g^{FN}(t)$ en las direcciones paralela y normal de la falla, respectivamente. Los dos primeros términos en el lado derecho de la ecuación son las respuestas cuasi-estáticas y los dos últimos términos de la ecuación corresponden a la respuesta dinámica debida a los movimientos en los apoyos de falla paralela y falla normal. (Figura 12)

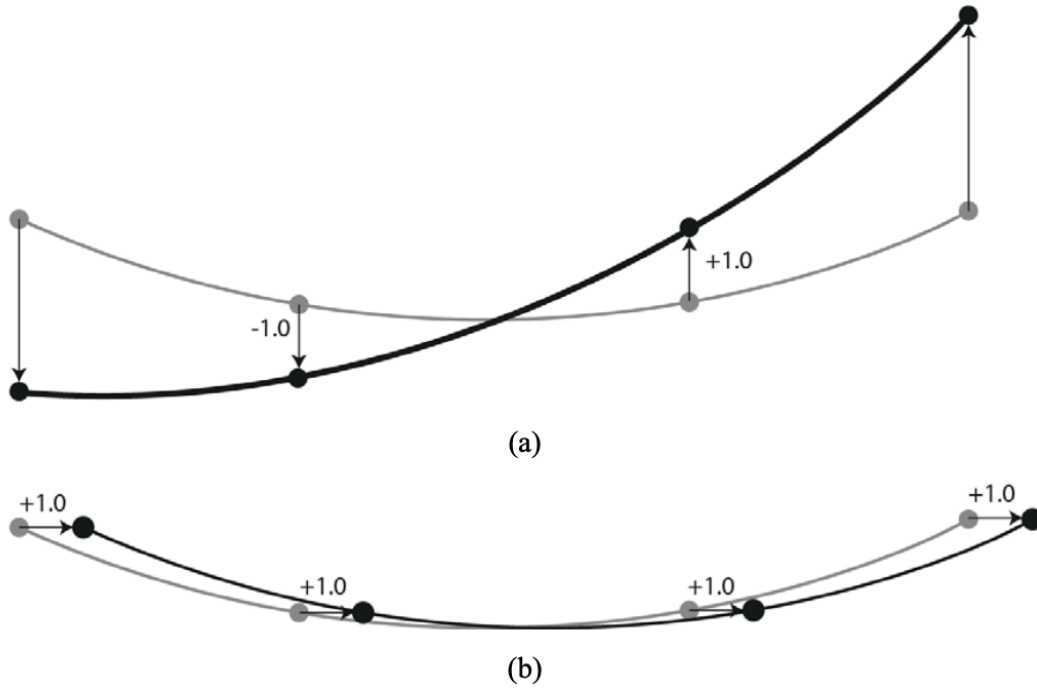


Figura 12. Influencia efectiva en un puente de tres claros (a) para aceleraciones de falla paralela, (b) para aceleraciones de falla normal.

Durante una excitación fuerte del suelo asociados a la ruptura de una falla, se prevé que el puente presente una respuesta que supere el rango lineal elástico, en estudios previos (Goel y Chopra 2008) se demostró que la respuesta total en esos modelos de puentes puede ser estimado por la superposición de los valores pico de las respuestas de análisis cuasi estático y el dinámico.

CAPÍTULO III. MOVIMIENTOS SÍSMICOS Y GENERACIÓN DE ESPECTROS SÍSMICOS

En esta tesis se revisaran los distintos métodos de análisis sísmico que se tienen disponibles los cuales describen sus propias metodologías para la determinación de la fuerzas actuantes. En este apartado se describirán las que se utilizaran y que incluyen espectros de diseño y acelerogramas.

Como los criterios contenidos en el manual de obras civiles de la CFE (MOC-CFE) son los que abordan con mayor profundidad el tema sísmico a nivel nacional fue el considerado de inicio durante el desarrollo del proyecto ejecutivo y será para este estudio el referente a considerar como punto de partida y donde de manera inicial se evaluaran los criterios referentes a la obtención de un espectro de diseño y otros considerando los efectos de sitio a partir de los indicado en el apartado *3.1.3.6 Revisión de fallas activas*. En este apartado, el cual de acuerdo a las graficas que describen las áreas sismogénicas, se puede constatar que la región centro de México incluye el Eje Transmexicano Volcánico y también señala que los datos con los que se tiene califican con baja probabilidad de ocurrencia sísmica para la construcción de su mapa de peligro sísmico, en contraste con los estudios geológicos recientes.

Para el estudio de los efectos locales sísmicos indicados en la distinta literatura de referencia se evaluaran diversos escenarios que quedaran caracterizados espectros y acelerogramas, éste capítulo describe cada uno de estos efectos. Para este estudio se dividen convencionales y no convencionales. Los convencionales corresponden a un análisis cuasi estático y Modal Espectral; los no convencionales corresponden a un análisis paso a paso y el descrito en el CAPÍTULO II, el cual es un análisis modal espectral con la modificación del espectro de diseño.

III.1 ASPECTOS A CONSIDERAR

De acuerdo con la información previa del proyecto que incluye ensayos geofísicos durante la construcción del viaducto, y aplicando la referencia, metodología y resultados de la base de datos del programa PRODISIS⁵ elaborada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Para puentes de especial importancia, la ejecución y los resultados obtenidos en el suelo, resulta como parámetros básicos del espectro de respuesta $a_0 = 0.35g$ y $c = 1.26g$ para el suelo tipo II (tobas), contrasta con los valores iniciales $a_0 = 0.14g$ y $c = 0.41g$ para el suelo tipo I (ver Tabla 2) Estos resultados son significativamente superiores a los valores considerados en el espectro del proyecto original, con $a_0 = 0.06g$ y $c = 0.21g$.

(Tseng & Penzien, 1975)

Tabla 2. Valores característicos del espectro sísmico de la exploración geotécnica inicial (FICSA, 2015)

Valores característicos del espectro sísmico						
Zona sísmica	Tipo de suelo	a_0	c	T_a	T_b	r
B	I	0.04	0.14	0.20	0.60	1/2

Por tanto, respecto a lo contemplado en el proyecto original, la demanda sísmica es del orden de seis veces superior en la zona de tobas, y del orden de dos veces superior en la zona de andesitas. Dado que en el proyecto original las columnas y cimentaciones están ajustadas y dimensionadas para los esfuerzos resultantes del correspondiente espectro elástico, estos mismos factores sirven de referencia para valorar la suficiencia de las medidas que se proponen. (Tabla 2)

El proyecto original del viaducto desarrolla el dimensionamiento con base en los requisitos de la Normativa para la Infraestructura del Transporte, de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), y que forman parte de la colección de documentos de la Normativa para el Proyecto Puentes y Estructuras, N-PRY-CAR-6-01-005/01. Aplica una clasificación del riesgo asociado al tipo estructura correspondiente al Grupo A, Puentes de especial importancia en los que

⁵ El programa de diseño sísmico incluido en el manual de obras civiles de CFE utilizado es la versión 4.1.1 en la versión más reciente del año 2017 porque sigue los mismos lineamientos del apartado de diseño sísmico 2015.

se requiere un grado de seguridad alto y estructuras similares ubicados en o sobre carreteras de cuatro o más carriles. Se considera un suelo tipo I, roca, aplicado a la totalidad de la estructura. De esta manera resultan como parámetros básicos del espectro de respuesta $a_0 = 0.06g$ y $c = 0.21g$.

Aceptando la normativa aplicada como válida, y sin discutir la cuestión de la consideración uniforme del tipo de suelo como tipo I, no cabe duda que la presencia de la falla obliga a reconsiderar la demanda sísmica, como así lo establece la propia normativa de SCT. La zonificación incluida en la norma no incluye el efecto de fallas próximas a la estructura en análisis, por lo que aconseja realizar un estudio de riesgo sísmico local basándose en otras referencias.

La nueva consideración será tomar en cuenta los parámetros obtenidos con una nueva clasificación con los resultados del último sondeo donde describen un suelo tipo II a partir del apoyo del eje 5 en adelante. Por lo tanto los parámetros para construcción del espectro son los de la Tabla 3.

Tabla 3. Valores característicos del espectro sísmico a partir de estudios nuevos (FICSA, 2015) (FICSA, 2017)

Valores característicos del espectro sísmico						
Zona sísmica	Tipo de suelo	a_0	c	T_a	T_b	r
B	II	0.08	0.30	0.30	1.50	2/3

III.2 MANUAL DE OBRA CIVIL DE CFE (PRODISIS)

Se realizó a partir de la información obtenida en sitio y por medio del programa para determinación de espectros de respuesta del manual de diseño de la Comisión Federal de electricidad. Con la localización geográfica se obtienen los parámetros iniciales:

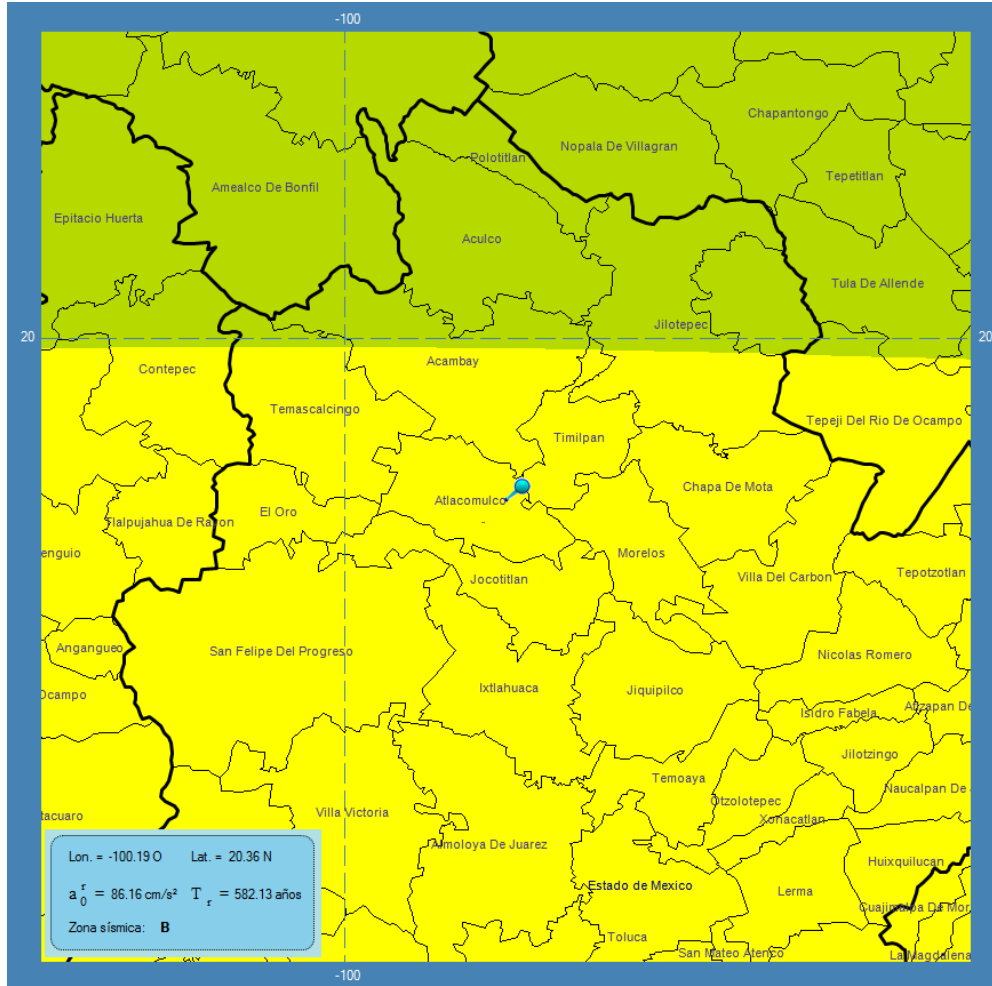


Figura 13. Determinación de la zona sísmica (Prodisis v4.1, [software], 2017)

Tabla 4. Datos del estudio geofísico (Mextypsa, 2017)

Capa	Velocidad Vs [m/s]	Densidad [kg/m ³]	Intervalo de profundidad	clase ⁶	material
1	303	1733	De 0 a 2m	Clase D	Suelo rígido
2	282	1733	De 2 a 5m	Clase D	Suelo rígido
3	415	1733	De 5 a 8m	Clase C	Suelo muy denso / roca fracturada
4	411	1784	De 8 a 12m	Clase C	Suelo muy denso / roca fracturada
5	478	1784	De 12 a 16m	Clase C	Suelo muy denso / roca fracturada
6	478	1886	De 16 a 21m	Clase C	Suelo muy denso / roca fracturada

⁶ Litotipo NERFP y IBC

7	478	1886	De 21 a 26m	Clase C	Suelo muy denso / roca fracturada
8	595	1886	De 26 a 32m	Clase C	Suelo muy denso / roca fracturada
9	595	1886	De 32m – indet.	Clase C	Suelo muy denso / roca fracturada

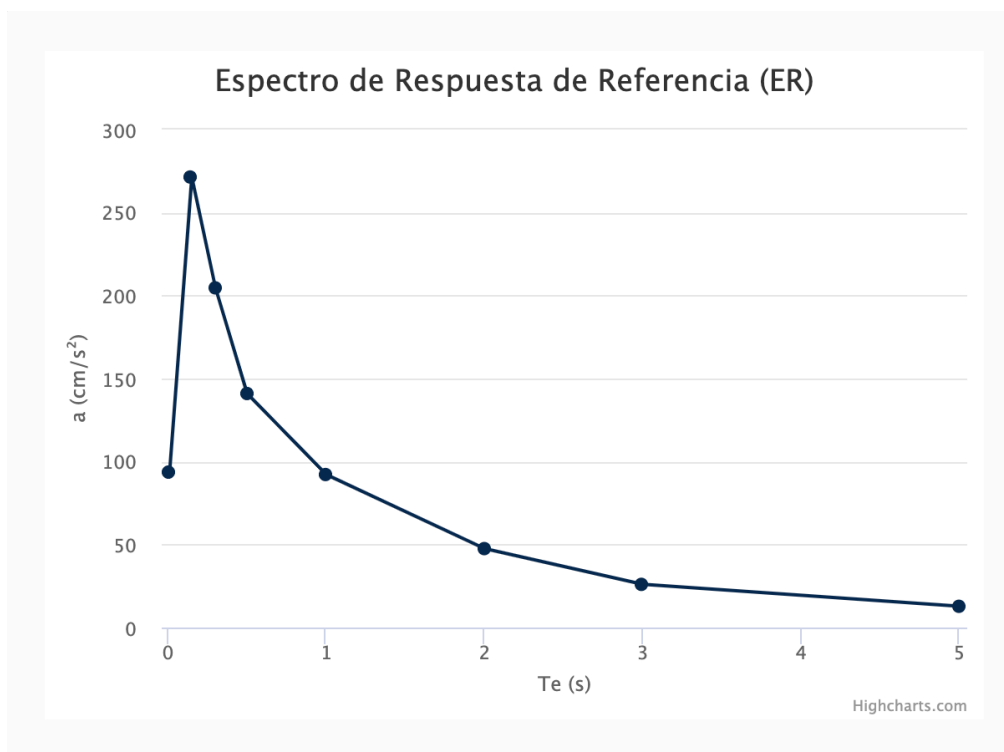


Gráfico 1. Espectro de respuesta de referencia (Prodisis v4.1, [software], 2017).

Tabla 5. Parámetros de respuesta en roca (Prodisis v4.1, [software], 2017).

Espectros Regionales

$a_0^r = 93.88 \text{ cm/s}^2$ $c^r = 270.58 \text{ cm/s}^2$

Zona sísmica : B Importancia estructural B ▼

Caracterización del terreno de cimentación

$v_s = 548.61 \text{ m/s}$ $H_s = 33 \text{ m}$ $T_s = 0.24 \text{ s}$

Estratigrafía Tipo de suelo II

Parámetros espectrales para estructuras A2 y B1

$F_{\text{Sit}} = 2.42$ $F_{\text{Res}} = 3.62$

$a_0 = 227.62 \text{ cm/s}^2$ $c = 825.00 \text{ cm/s}^2$

Considerar interacción suelo-estructura

Tabla 6. Tabla resumen de parametros (Prodisis v4.1, [software], 2017)

ESPECTRO DE ROCA		ESPECTRO DE SITIO	
Zona sísmica		B	
Longitud	-99.8094 O	Latitud	19.8102 N
a0r:	93.88 cm/s ²	a0:	227.62 cm/s ²
c:	279.58 cm/s ²	c:	825.00 cm/s ²
		Ta:	0.2 s
		Tb:	0.2 s
		Tc:	0.2 s
		k:	1
		r:	0.67

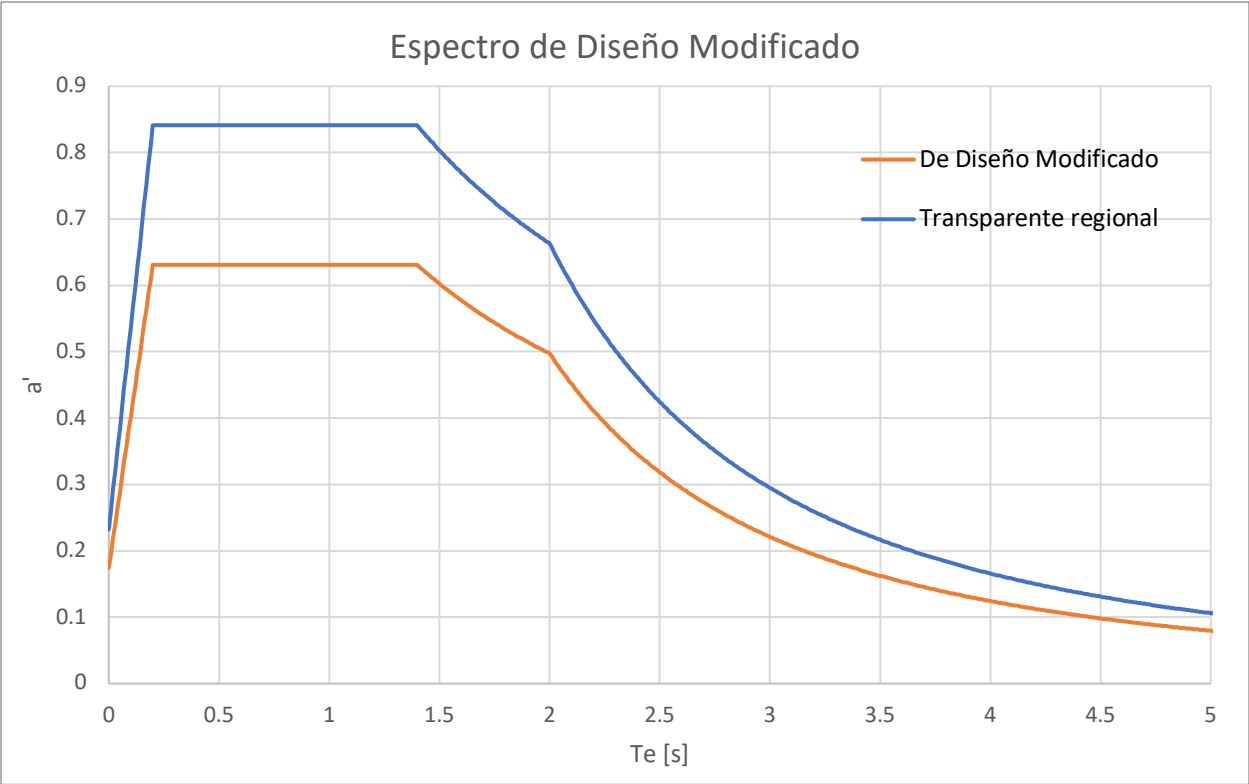


Gráfico 2. Espectro de diseño (Prodisis v4.1, [software], 2017)

III.3 INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE (IMT)

Siguiendo los lineamientos indicados por la Secretaria de Comunicaciones y transportes de acuerdo al a normativa para los puentes se determinaran los efectos sísmicos a partir de lo indicado en las normas emitidas por el IMT en el *titulo J, Espectros sísmicos*, estos parámetros se basan en un mapa de regionalización sísmica y esos se indican a continuación:

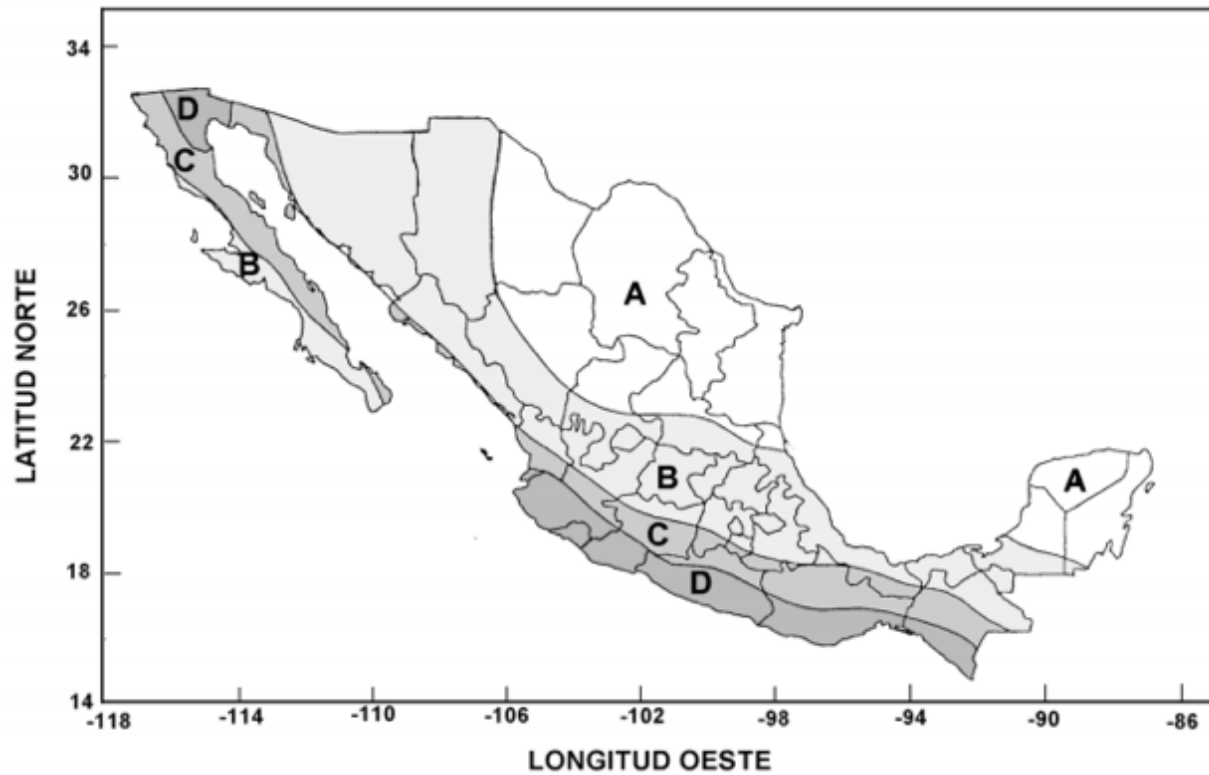


Figura 14. Regionalización sísmica de la república mexicana (SCT, 2001).

Tabla 7. Valores característicos del espectro sísmico para estructuras tipo B (SCT, 2001)

Zona	Tipo de Suelo	a0	c	Ta (s)	Tb (s)	r
A	I	0.02	0.08	0.2	0.6	1/2
	II	0.04	0.16	0.3	1.5	2/3
	III	0.05	0.20	0.6	2.9	1
B	I	0.04	0.14	0.2	0.6	1/2
	II	0.08	0.30	0.3	1.5	2/3
	III	0.10	0.36	0.6	2.9	1
C	I	0.09	0.36	0.2	0.6	1/2
	II	0.13	0.50	0.3	1.4	2/3
	III	0.16	0.64	0.6	1.9	1
D	I	0.13	0.50	0.2	0.6	1/2
	II	0.17	0.68	0.3	1.2	2/3
	III	0.21	0.86	0.6	1.7	1
E	I	0.04	0.16	0.2	0.6	1/2
	II	0.08	0.32	0.3	1.5	2/3
	III	0.10	0.40	0.6	3.9	1

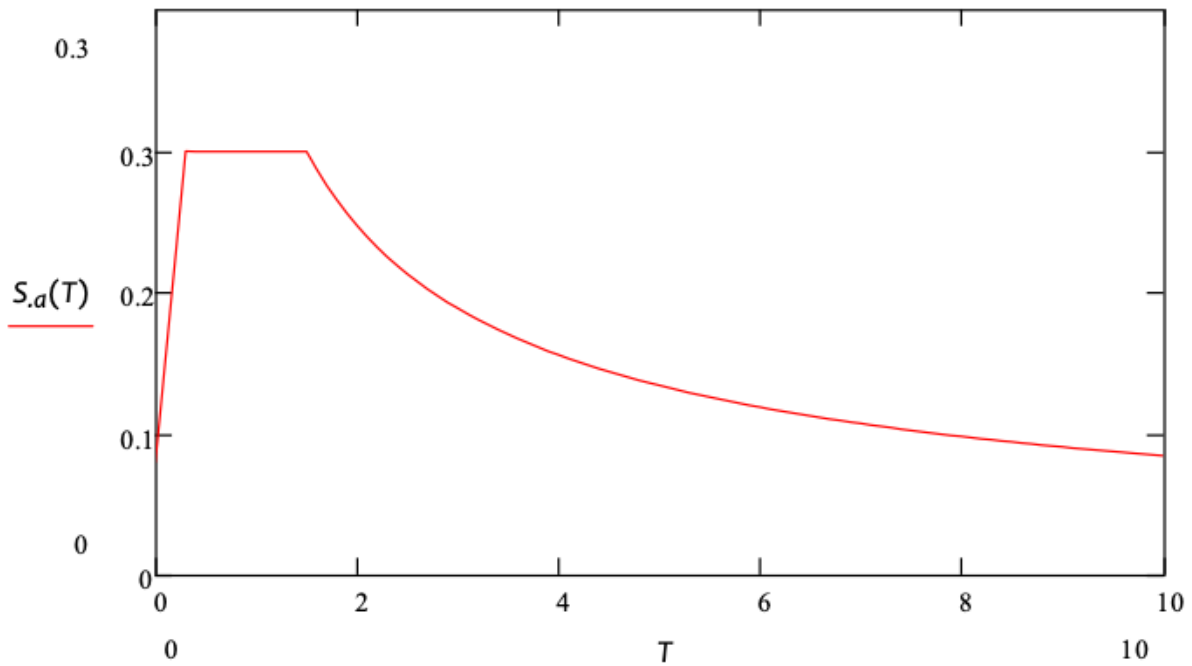


Gráfico 3. Espectro sísmico para estructuras tipo B (SCT, 2001).

Estos valores de aceleración reportados en el espectro del Gráfico 3 deberán de ser afectados por el coeficiente de comportamiento sísmico Q de los cuales se indica su valor en las siguientes tablas y por un factor de importancia de 1.5:

Tabla 8. Valores del factor de comportamiento sísmico Q. (SCT, 2001)

CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA	Q
<ul style="list-style-type: none"> • Estructuras cuya superestructura forma un marco dúctil* con los elementos de la subestructura, ya sean de concreto reforzada, presforzado o acero estructural. • Para el calculo de fuerzas transmitidas por la superestructura a la subestructura, cuando la primera se apoya libremente en dispositivos de neopreno. • Para el calculo de fuerzas generadas por la subestructura en elementos formados por marcos dúctiles. 	4
<ul style="list-style-type: none"> • Estructuras en la que la fuerza sísmica es resistida por una sola columna o pila continua con el tablero de la subestructura. • Para el calculo de fuerzas transmitidas por la superestructura a la subestructura, si los dispositivos de apoyo ya no existen o son diferentes al neopreno. • Para el calculo de fuerzas generadas por la subestructura en elementos tipo muro o en columnas aisladas de concreto reforzado. 	2
<ul style="list-style-type: none"> • Para el calculo de fuerzas generadas por la subestructura en elementos de mampostería. 	1

*Un marco se considera dúctil cuando se cumplen los requisitos de dimensiones y detalles de diseño que, para tal efecto, se incluyen en las Normas de los Títulos 03 *Diseño de estructuras de concreto* y 04 *Diseño de estructuras de acero*, de la Parte 6 *Proyectos de nuevos puentes y estructuras similares*, del libro PRY Proyecto, del Tema CAR Carreteras.

III.4 ACELEROGRAMAS

En la base de datos mexicana de sismos fuertes se obtuvo la información de los acelerogramas, para la cual se busco la estación más cercana correspondiente a la estación SAN LUCAS PATHE (SLPA), ubicada en el municipio de Acambay.

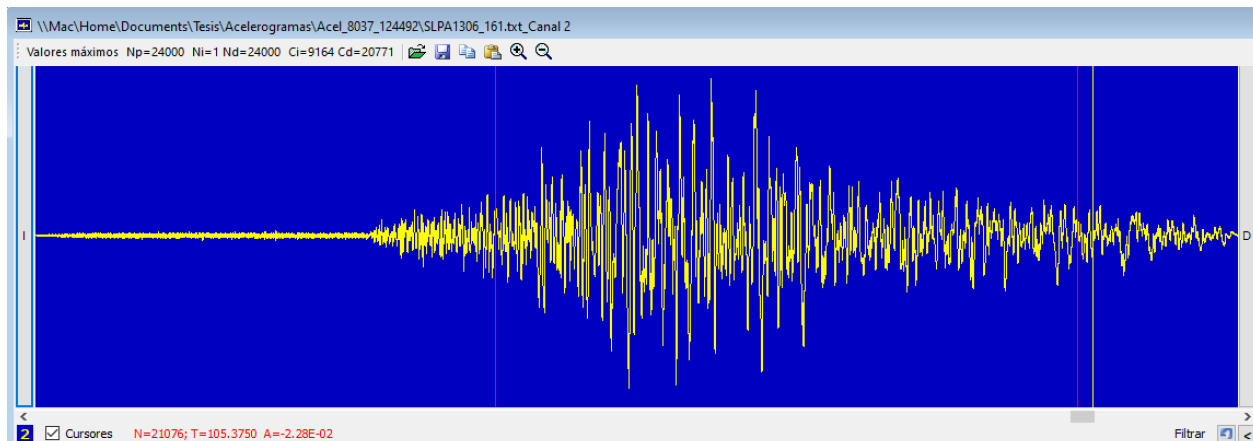
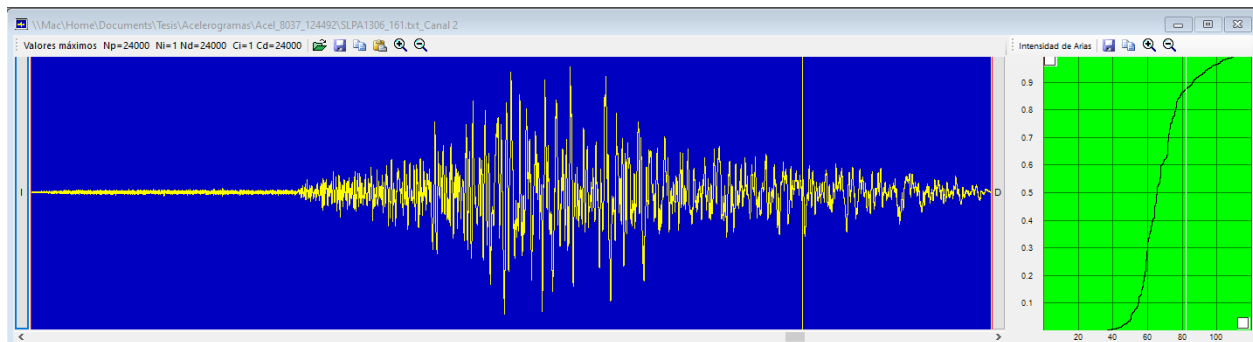
Para procesar los datos y analizarlos se utilizará el programa degtra para el cual los acelerogramas se les aplico una corrección por línea base, un filtro pasa alto cortando a 0.05hz y 0.2hz para sismos con magnitud menor a 6 y 0.1hz para registros de eventos con magnitud mayor a 6, y obtener un espectro de respuesta de pseudoaceleración. (Ordaz 2005)

Tabla 9. Aceleregramas utilizados y sus características (BDSF)

Acelerograma	Fecha	Hora	Magnitud	A max (gal)	foco (km)
SLPA0804.281	28/04/08	0:06:29	M= 5.6	1.56	52
SLPA1112.111	11/12/11	1:47:25	M= 6.5	2.24	58
SLPA1203.201	20/03/12	18:02:47	M= 7.4	2.72	16
SLPA1304.221	22/04/13	1:16:34	M= 5.8	1.25	10
SLPA1306.161	16/06/13	5:19:03	M= 5.8	1.04	60
SLPA1308.211	21/08/13	12:38:30	M= 6	1.06	20
SLPA1404.181	18/04/14	14:27:23	M= 7.2	3.97	10
SLPA1709.081	08/09/17	4:49:17	M= 8.2	3.03	45.9
SLPA1709.191	19/09/17	18:14:40	M= 7.1	4.49	38.5
SLPA1802.161	16/02/18	23:39:39	M= 7.2	2.2	16

Estos registros fueron procesados en cada dirección, es decir, canal 1 y canal 2 por separado con ayuda del programa degtra (CENAPRED - UNAM, 2018) . El proceso y análisis que se le dio a cada registro de aceleración fue aplicar una corrección por línea base, posteriormente un filtro el cual fue un pasa alta con frecuencias entre 0.05Hz para los eventos con magnitud Mw superior a 6.5 y 0.1Hz para el resto delos registros (García, Singh, Herráiz, Ordaz, & Pacheco, 2005). Posteriormente se procedió a obtener los espectros de pseudoaceleración considerando un coeficiente de amortiguamiento de 5% donde se obtuvieron y compararon los valores máximos que sirvieron de referencia para compararlos con el espectro de diseño transparente regional.

En el proceso de evaluar y analizar los espectros de respuesta se pudo detectar que los registros presentaban valores amplios de coda por lo que se realizo un proceso adicional de recorte para lo cual se obtuvieron los diagramas de energía por medio de la aplicación de la fórmula de intensidad de Arias⁷, que permitían observar donde a partir de que segundo se comenzaba a acumular la energía y así reducir el registro obteniendo con un espectro de respuesta mas claro y definido (Figura 15).



⁷ La intensidad de Arias también conocida como la intensidad sísmica relaciona la oscilación sísmica con la respuesta de una determinada estructura, en otras palabras es la energía del evento sísmico por lo tanto si calculamos la intensidad de Arias entre los valores del 5% y 95% podemos determinar la duración significativa.

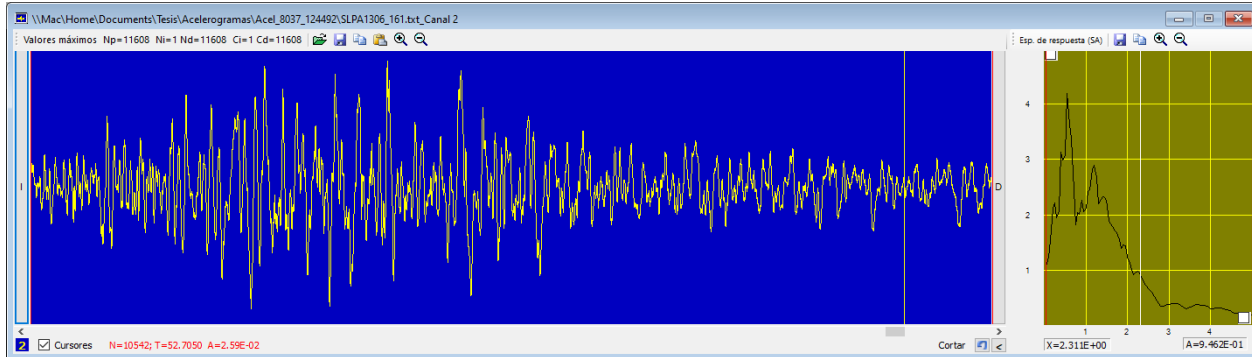


Figura 15. Proceso de obtención de los espectros con los diagramas de intensidad Arias.

El siguiente paso fue obtener los factores de escalamiento (M. Nau & Hall, 1984) para poder usar estos como parte del análisis estructural, para ello se tomo como referencia el periodo del primer modo de la estructura, el cual es de 1.8s, con un porcentaje de participación modal de la masa de 49.6%.

Tabla 10. Resumen de los factores de escalamiento.

ACCEL	Factor de escala		Datos
	C1	C2	
SLPA0804.281	43.70	80.89	22202
SLPA1112.111	23.20	28.90	29600
SLPA1203.201	9.48	13.00	32000
SLPA1304.221	51.65	36.79	22200
SLPA1306.161	53.49	35.08	24000
SLPA1308.211	38.55	27.84	22401
SLPA1404.181	6.47	11.64	40601
SLPA1709.081	12.97	7.66	38092
SLPA1709.191	4.58	6.77	39600
SLPA1802.161	17.20	15.60	25200

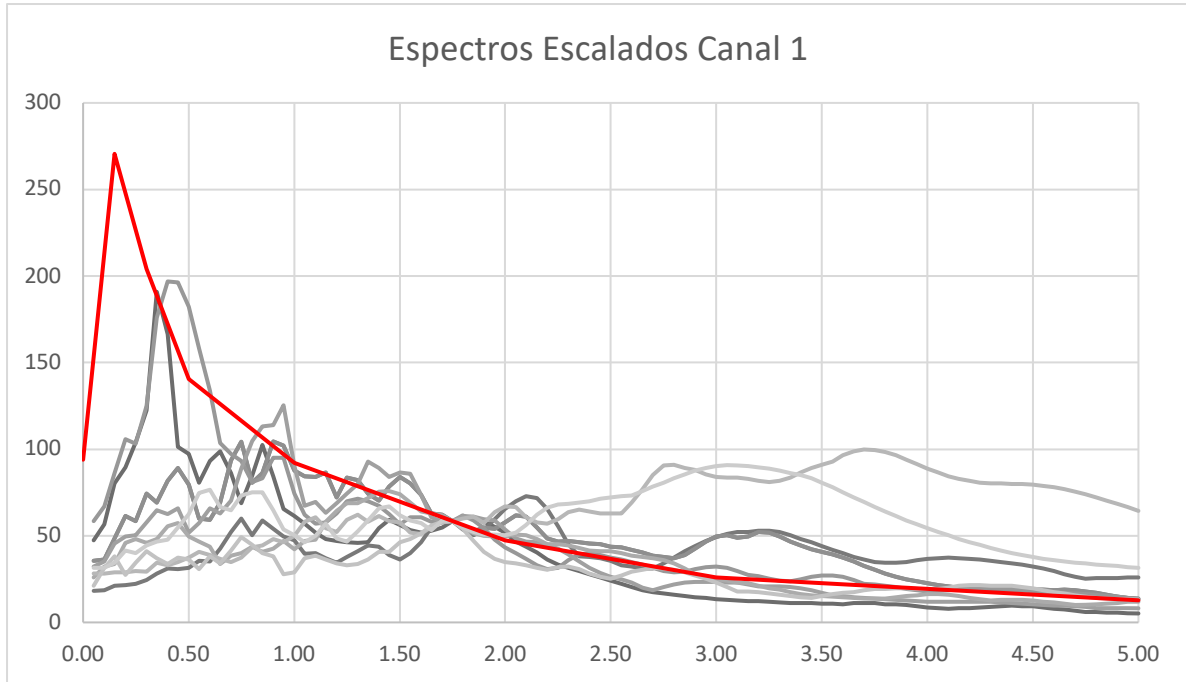


Gráfico 4. Comparativa de espectros de respuesta con la referencia (Canal 1).

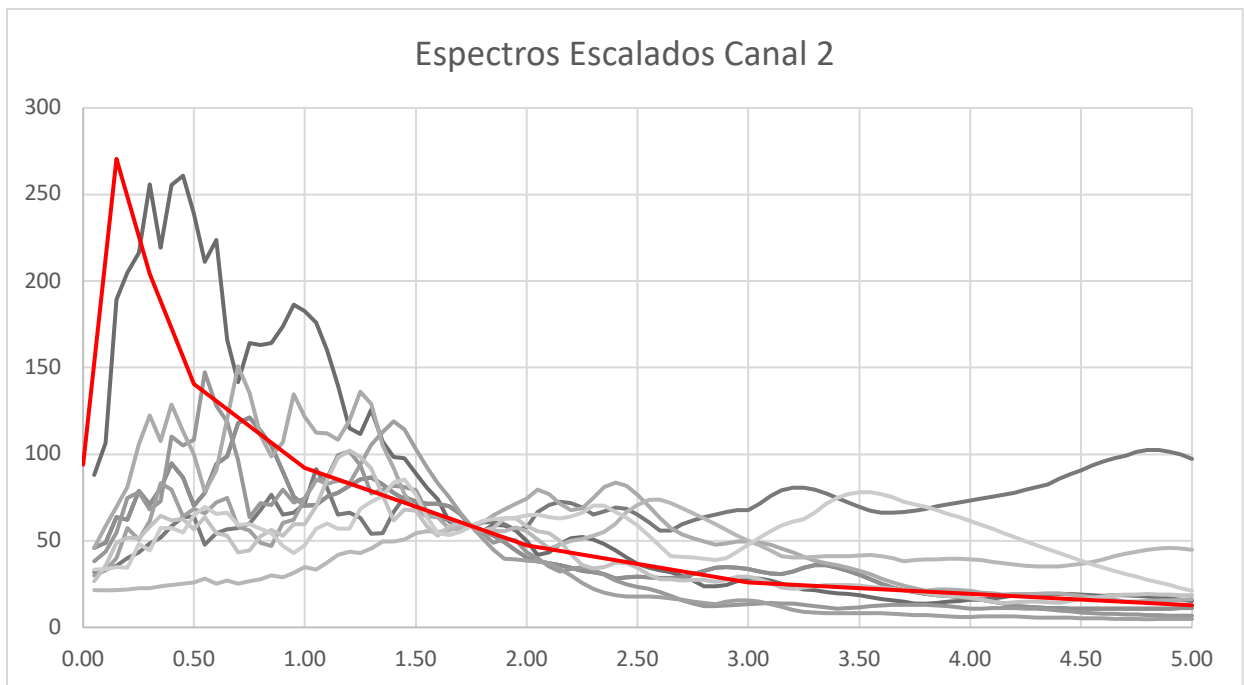


Gráfico 5. Comparativa de espectros de respuesta con la referencia (Canal 2).

CAPÍTULO IV. PROCESO Y ANÁLISIS

Para realizar el análisis estructural se utilizó el programa SAP2000 en el cual se modeló con elementos tipo barra, con excepción de la losa la cual se optó por usar elementos tipo placa que transmiten todos los grados de libertad para permitir dar rigidez al sistema que conforma el tablero de la superestructura.

IV.1 MODELO

A continuación, se hará una descripción general de los parámetros utilizados en la construcción del modelo analítico:

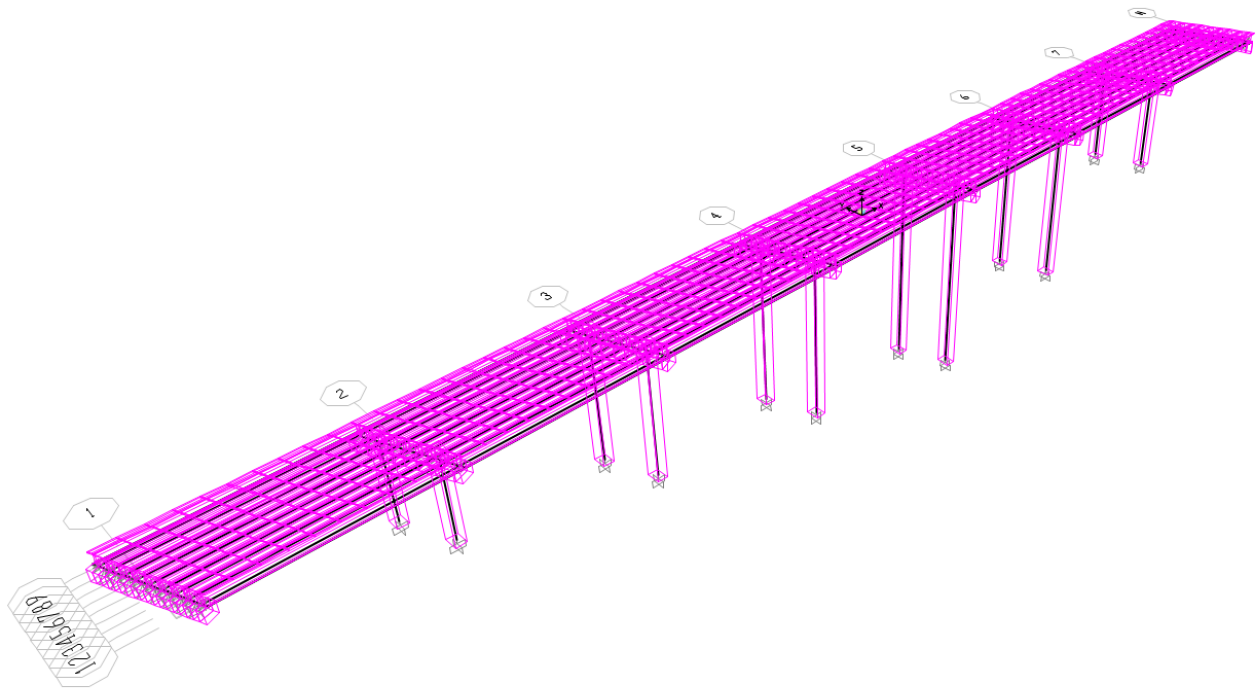


Figura 16. Representación tridimensional.

Tabla 11. Propiedades de los materiales.

Nombre	Material	Tipo	Nota
A416Gr270	Tendon	Uniaxial	ASTM A416 Grade 270
A615Gr60	Rebar	Uniaxial	ASTM A615 Grade 60
A992Fy50	Steel	Isotropic	ASTM A992 Grade 50
C250	Concrete	Isotropic	Customary f _c 4000 psi
C400	Concrete	Isotropic	United States Customary f _c 6000 psi

Tabla 12. Propiedades de la sección en elementos barra.

Nombre	Material	Forma	Area [cm ²]	TorsConst	I33 [cm ⁴]	I22 [cm ⁴]
Abut_8	C250	Rectangular	47250	248518039.4	390698438	88593750
Bent	C250	Rectangular	80000	871820018	416666667	682666667
BentAbut_1	C250	Rectangular	71020	709336466	415614958	425078373
Col	C250	Box/Tube	57600	1589351111	752320000	1766720000
NU240	C400	PC Conc I Girder	8606.41	1343954.07	67217538.86	4807051.96

Tabla 13. Propiedades de la sección en elementos placas.

Nombre	Material	Tipo	Espesor [cm]	Espesor diseño	Peso [kg]	Masa
Slab	C250	Shell-Thin	25	25	4028387.51	4107.81

Tabla 14. Propiedades de los resortes para apoyos.

Nombre	GDL	Rigidez [kg/cm]	Amortiguamiento	Dist. al nodo
LIN1	U1	315749.8	0.05	
LIN1	U2	1736.6	0.05	0
LIN1	U3	1736.6	0.05	0

Tabla 15. Patron de Cargas asignados.

Carga	Tipo	Peso propio	Adicional
DC	Dead	1	
DW	Dead	0	
LL	Live	0	
TH1	Quake	0	None
TH2	Quake	0	None
TH3	Quake	0	None
TH4	Quake	0	None
TH5	Quake	0	None
TH6	Quake	0	None
TH7	Quake	0	None
TH8	Quake	0	None
TH9	Quake	0	None
THX	Quake	0	None
F	Notional	0	

Tabla 16. Caso de cargas historia-tiempo.

Acel	Nombre	Tipo	No. datos	Paso	Amortiguamiento	Constante
SLPA0804.281	TH1	Transient	22200	0.2	Constant	0.05
SLPA1112.111	TH2	Transient	32000	0.2	Constant	0.05
SLPA1203.201	TH3	Transient	32000	0.2	Constant	0.05
SLPA1304.221	TH4	Transient	22200	0.2	Constant	0.05
SLPA1306.161	TH5	Transient	24000	0.2	Constant	0.05
SLPA1308.211	TH6	Transient	22400	0.2	Constant	0.05
SLPA1404.181	TH7	Transient	40600	0.2	Constant	0.05
SLPA1709.081	TH8	Transient	38000	0.2	Constant	0.05
SLPA1709.191	TH9	Transient	39600	0.2	Constant	0.05
SLPA1802.161	THX	Transient	25200	0.2	Constant	0.05

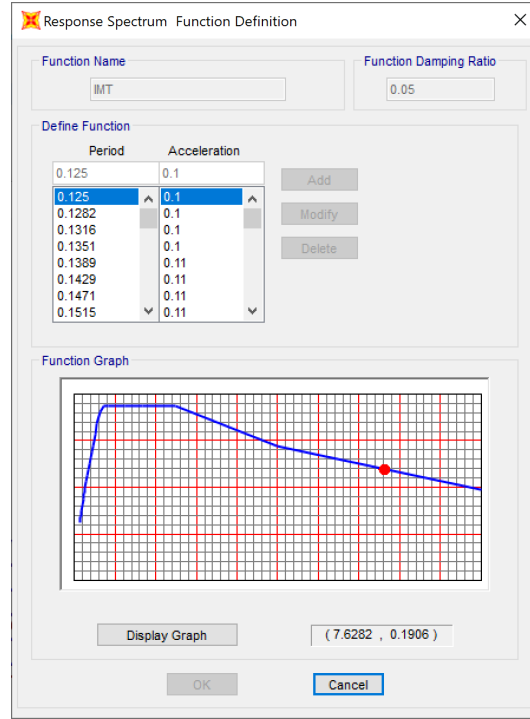
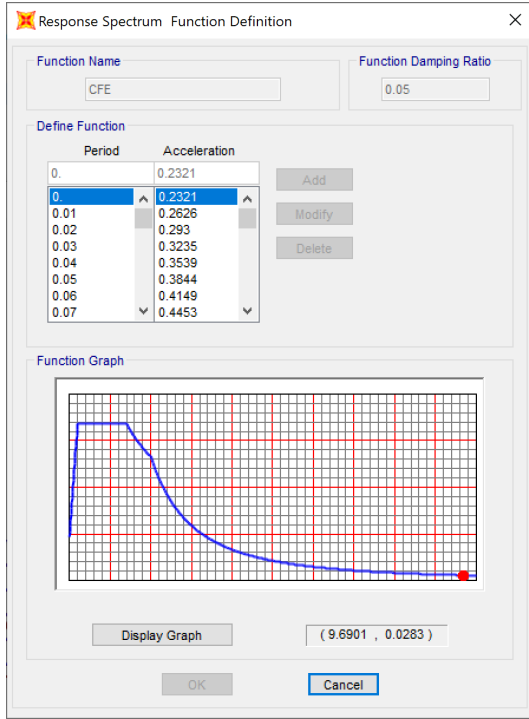
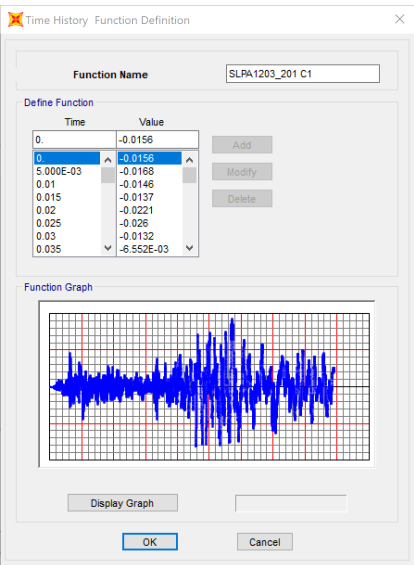
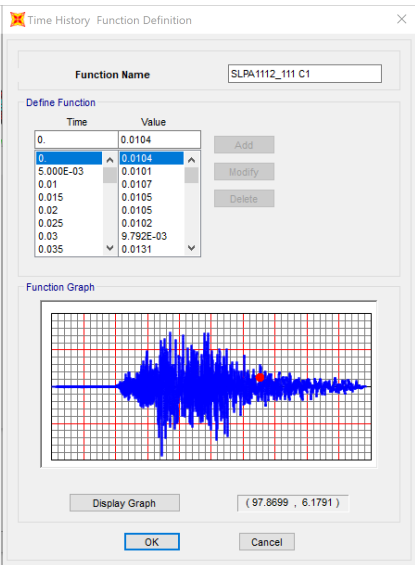
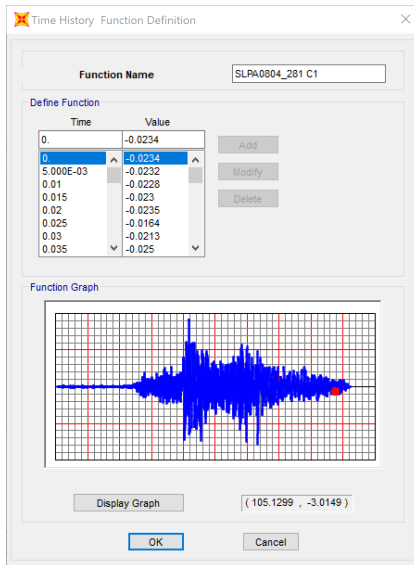


Figura 17. Definición de los espectros de diseño.



Time History Function Definition

Function Name: SLPA1304_221 C1

Define Function

Time	Value
0.	0.0107
0.	0.0107
5.000E-03	8.988E-03
0.01	0.0152
0.015	6.439E-03
0.02	0.0112
0.025	4.789E-03
0.03	7.900E-03
0.035	6.253E-03

Function Graph

Display Graph (80.7353 , 2.8398)

OK Cancel

Time History Function Definition

Function Name: SLPA1306_161 C1

Define Function

Time	Value
0.	0.0119
0.	0.0119
5.000E-03	0.0127
0.01	0.011
0.015	0.0104
0.02	0.0119
0.025	8.145E-03
0.03	9.916E-03
0.035	0.0151

Function Graph

Display Graph (92.9326 , -1.9633)

OK Cancel

Time History Function Definition

Function Name: SLPA1308_211 C1

Define Function

Time	Value
0.	-2.202E-03
0.	-2.202E-03
5.000E-03	-1.337E-03
0.01	3.390E-04
0.015	-1.213E-03
0.02	-7.852E-03
0.025	-3.311E-03
0.03	2.824E-03
0.035	-6.594E-03

Function Graph

Display Graph (134.5589 , -1.7591)

OK Cancel

Time History Function Definition

Function Name: SLPA1404_181 C1

Define Function

Time	Value
0.	9.740E-04
0.	9.740E-04
5.000E-03	9.550E-04
0.01	9.930E-04
0.015	1.030E-03
0.02	1.048E-03
0.025	1.550E-04
0.03	6.370E-04
0.035	1.335E-03

Function Graph

Display Graph (134.5589 , -1.7591)

OK Cancel

Time History Function Definition

Function Name: SLPA1709_081 C1

Define Function

Time	Value
0.	0.0702
0.	0.0702
5.000E-03	0.0709
0.01	0.0716
0.015	0.0721
0.02	0.0729
0.025	0.0737
0.03	0.0738
0.035	0.0738

Function Graph

Display Graph (134.5589 , -1.7591)

OK Cancel

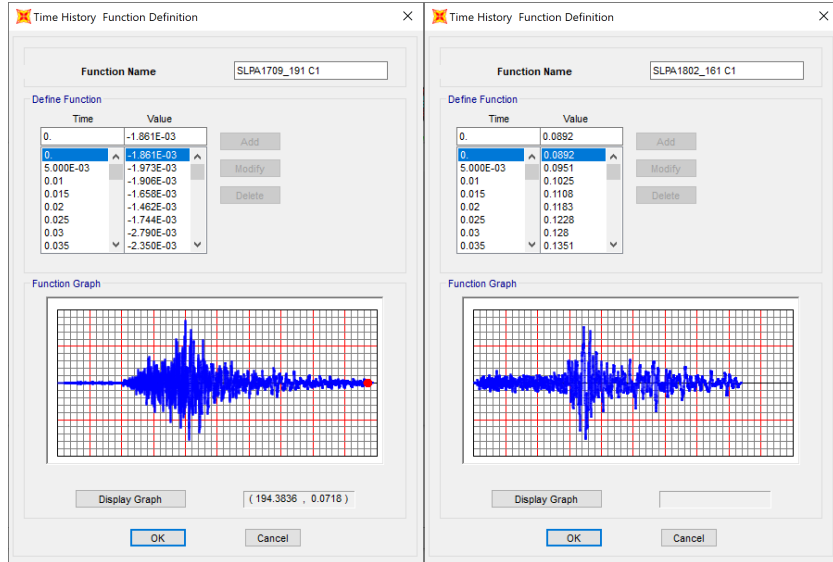
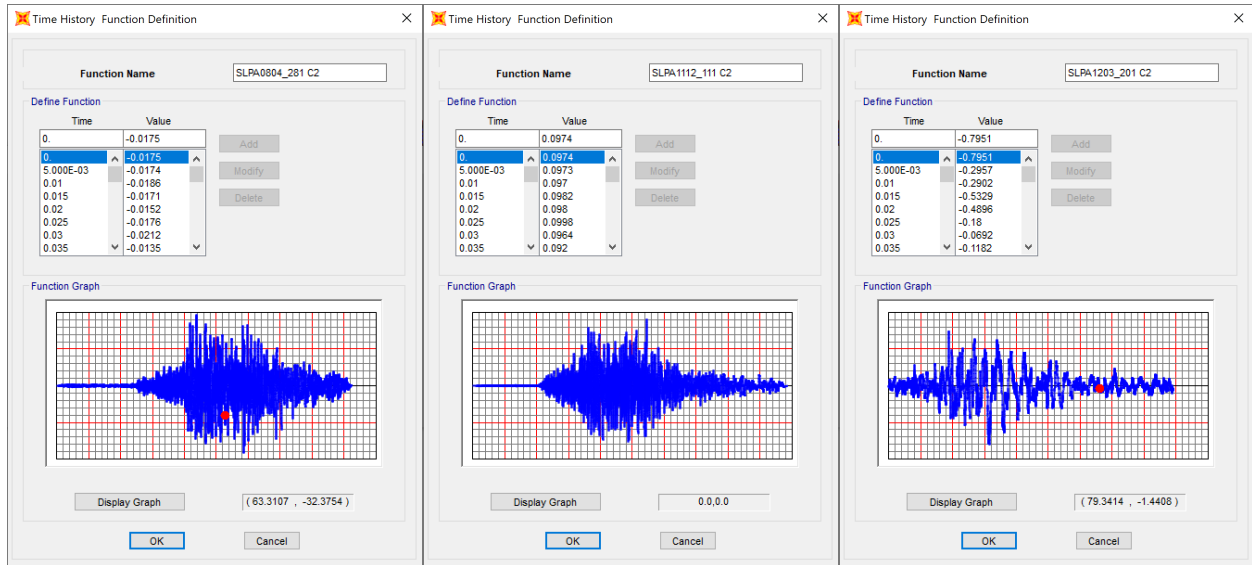


Figura 18. Definición Tiempo-historia de los canales C1.



Function Name SLPA1304_221 C2

Define Function

Time	Value
0.	0.0735
5.000E-03	0.0729
0.01	0.0725
0.015	0.0719
0.02	0.0737
0.025	0.0755
0.03	0.0758
0.035	0.0699

Function Graph

Display Graph

OK Cancel

Function Name SLPA1306_161 C2

Define Function

Time	Value
0.	0.0164
5.000E-03	0.0163
0.01	0.0165
0.015	0.0149
0.02	0.0147
0.025	0.0148
0.03	0.0179
0.035	0.0197

Function Graph

Display Graph

OK Cancel

Function Name SLPA1308_211 C2

Define Function

Time	Value
0.	0.011
5.000E-03	0.0108
0.01	9.880E-03
0.015	0.0105
0.02	0.0111
0.025	8.620E-03
0.03	0.0159
0.035	0.0126

Function Graph

Display Graph

OK Cancel

Function Name SLPA1404_181 C2

Define Function

Time	Value
0.	-0.0577
5.000E-03	-0.0575
0.01	-0.0574
0.015	-0.0569
0.02	-0.0576
0.025	-0.0573
0.03	-0.057
0.035	-0.0566

Function Graph

Display Graph

OK Cancel

Function Name SLPA1709_081 C2

Define Function

Time	Value
0.	-1.131
5.000E-03	-1.1241
0.01	-1.2069
0.015	-1.2674
0.02	-1.3356
0.025	-1.3356
0.03	-1.3961
0.035	-1.4574

Function Graph

Display Graph

OK Cancel

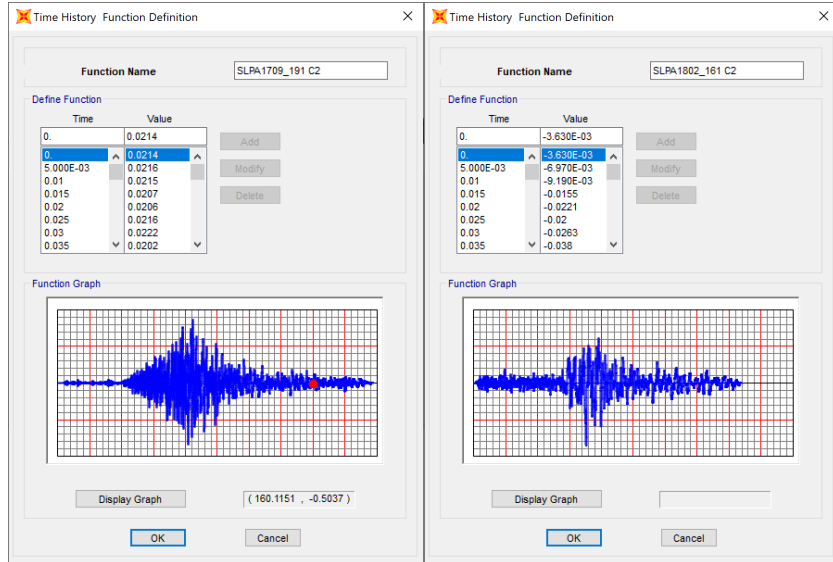


Figura 19. Definición Tiempo-historia de los canales C2.

Adicionalmente se impuso un desplazamiento en los apoyos de los ejes 5, 6 y 7, introduciendo de esta manera el desplazamiento máximo que se pueda presentar después un evento sísmico en el área de contacto de la falla, además se definió un registro tiempo-historia tipo rampa para obtener la respuesta dinámica.

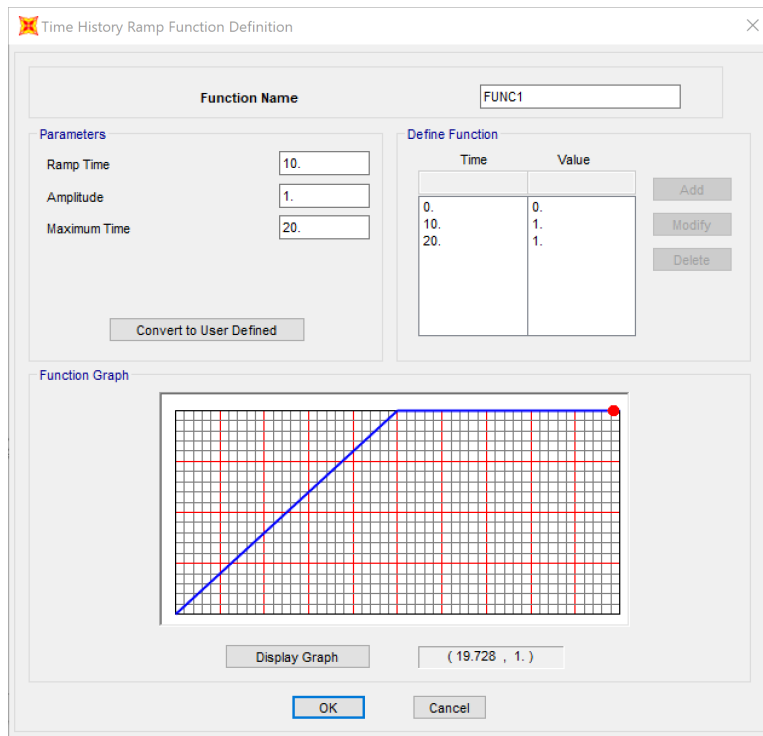


Figura 20. Definición de la función tiempo-historia para el desplazamiento en la base

CAPÍTULO V. EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Del modelo estructural se obtuvieron resultados de desplazamiento para análisis dinámicos establecidos. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

V.1 RESULTADOS

Para revisión de los desplazamientos se eligió el nodo 249 el cual corresponde al punto del cabezal de la pila del eje 5 y el cual reporta el desplazamiento máximo como se puede observar en la comparativa de la Figura 21 y 22. Se evaluarán los valores del cabezal ya que el elemento placa correspondiente a modelado de la losa de rodadura puede presentar una variación por algún efecto local que no refleje el comportamiento general, dado que el cabezal es un elemento con una rigidez se tomarán en este elemento.

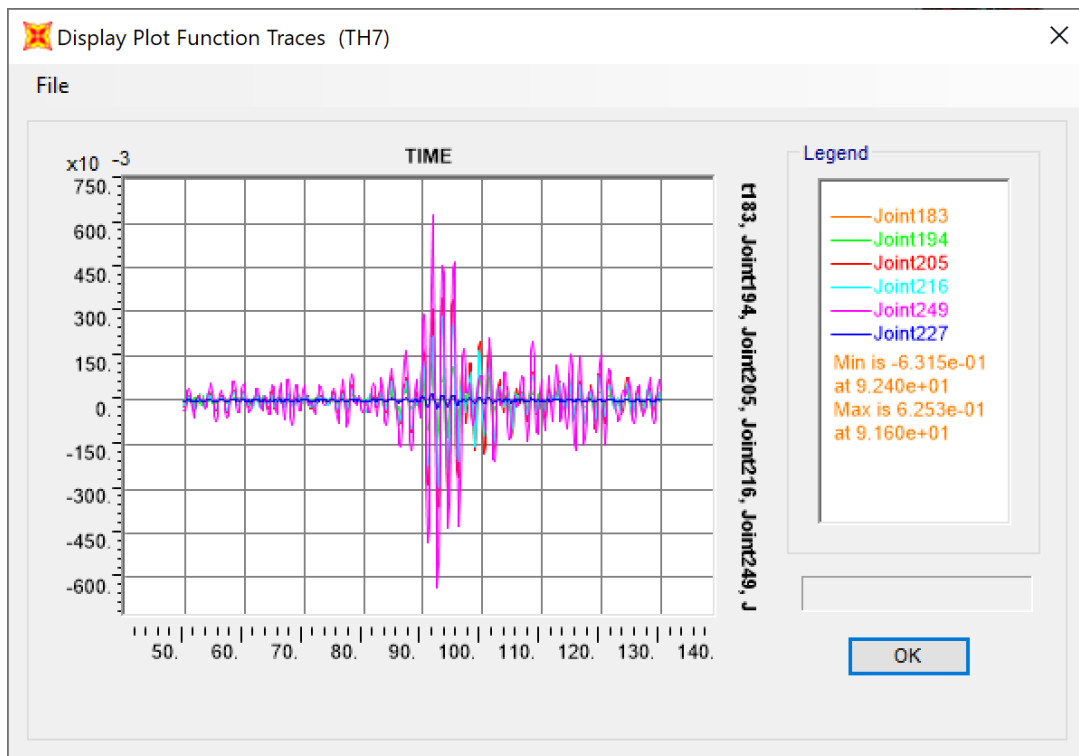


Figura 21. Desplazamientos en los nodos de ejes de los apoyos. TH7

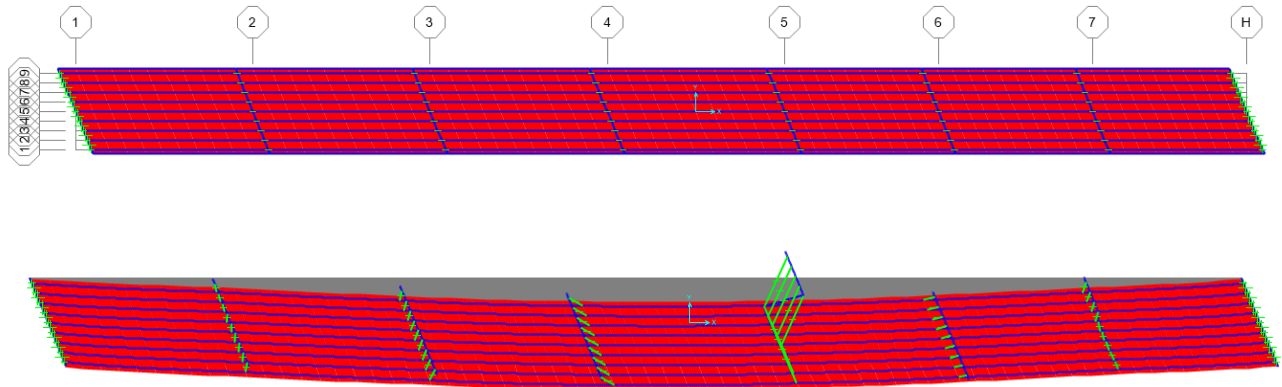


Figura 22. Desplazamientos máximos en la dirección uy.

Nombre	Tipo		Fx [ton]	Fy ton]	Fz [ton]	Mx[ton-m]	My[ton-m]	Mz[ton-m]
DC	NonStatic	Max	-0.001	-0.000364	6488.669	1.08264	26976.703	2.18701
DC	NonStatic	Min	-0.001	-0.000364	6488.669	1.08264	26976.703	2.18701
DW	LinStatic		0	0	1770.447	0	15934.026	0
LL1	LinMoving	Max	0	0	0	0	0	0
LL1	LinMoving	Min	0	0	0	0	0	0
EQx_CFE	LinRespSpec	Max	3093.669	2070.705	7.8265	452.506	2640.860	69017.495
EQy_CFE	LinRespSpec	Max	2063.378	8586.201	8.5919	1212.682	3205.938	80686.323
EQx_IMT	LinRespSpec	Max	1134.948	844.9869	2.7985	168.857	974.1535	24697.331
EQy_IMT	LinRespSpec	Max	841.820	3560.885	3.1618	484.0452	1341.592	29237.383

Tabla 17. Reacciones en la base.

Caso	Tipo	No.	Periodo [s]	Frecuencia	Frec. circular	Eigenvalor
MODAL	Mode	1	1.807591	0.553	3.476	12.083
MODAL	Mode	2	1.630213	0.613	3.854	14.855
MODAL	Mode	3	1.453638	0.688	4.322	18.683
MODAL	Mode	4	1.426417	0.701	4.405	19.403
MODAL	Mode	5	1.226764	0.815	5.122	26.232
MODAL	Mode	6	1.120426	0.892	5.608	31.448
MODAL	Mode	7	1.012471	0.988	6.206	38.512
MODAL	Mode	8	0.978862	1.022	6.419	41.202

Caso	Tipo	No.	Periodo [s]	Frecuencia	Frec. circular	Eigenvalor
MODAL	Mode	9	0.802208	1.247	7.832	61.346
MODAL	Mode	10	0.769073	1.300	8.170	66.746
MODAL	Mode	11	0.741246	1.349	8.476	71.851
MODAL	Mode	12	0.704237	1.419	8.922	79.602

Tabla 18. Periodos y frecuencias del análisis modal

A continuación se muestran los resultados comparativos para los desplazamientos sin considerar la respuesta debida al desplazamiento relativo debido a la falla.

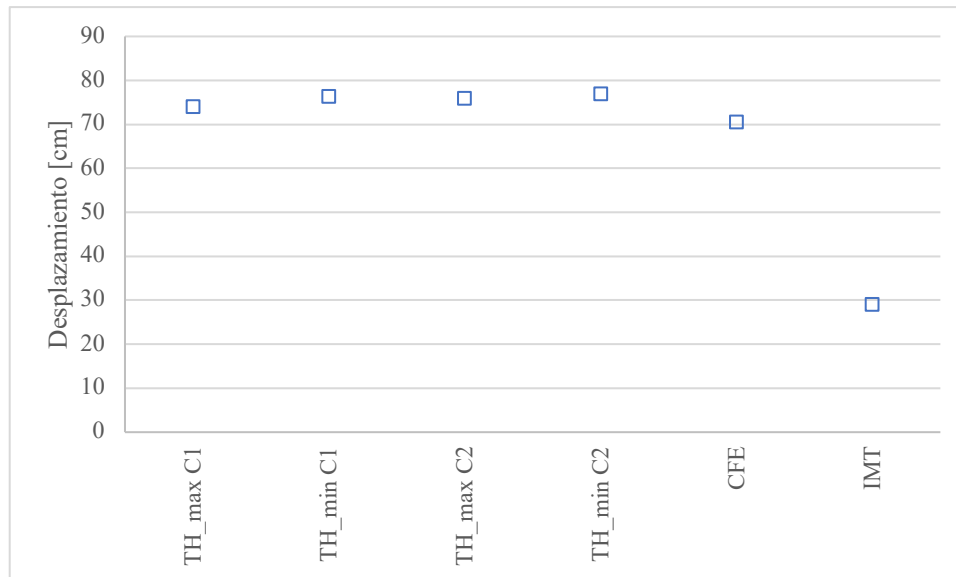


Gráfico 6. Comparativa de desplazamientos en el sentido longitudinal [nodo 249]

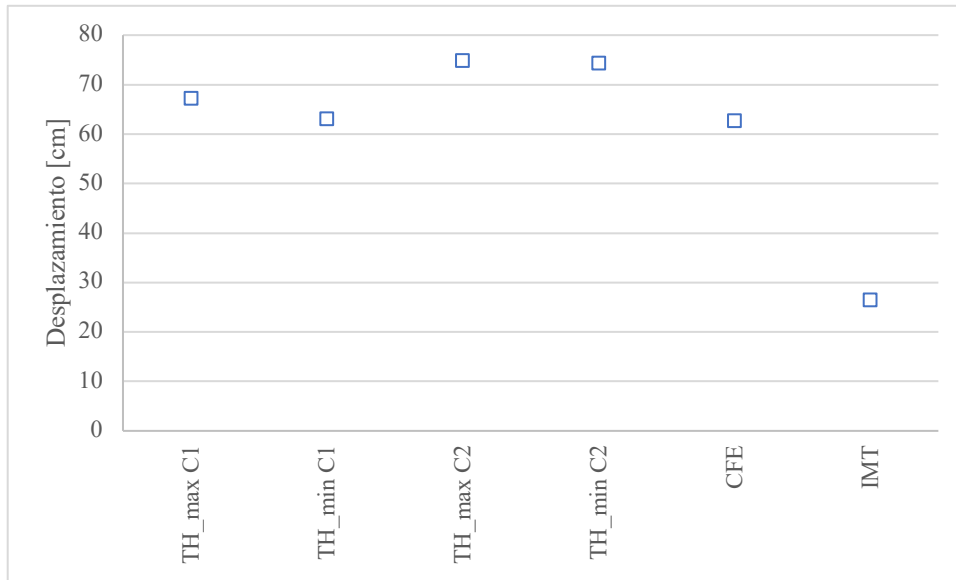


Gráfico 7. Comparativa de desplazamientos en el sentido transversal [nodo 249]

En la siguiente grafica se muestra la comparativa de resultados de los desplazamientos donde se considera la respuesta del sistema ante un desplazamiento relativo entre los bloques de suelo.

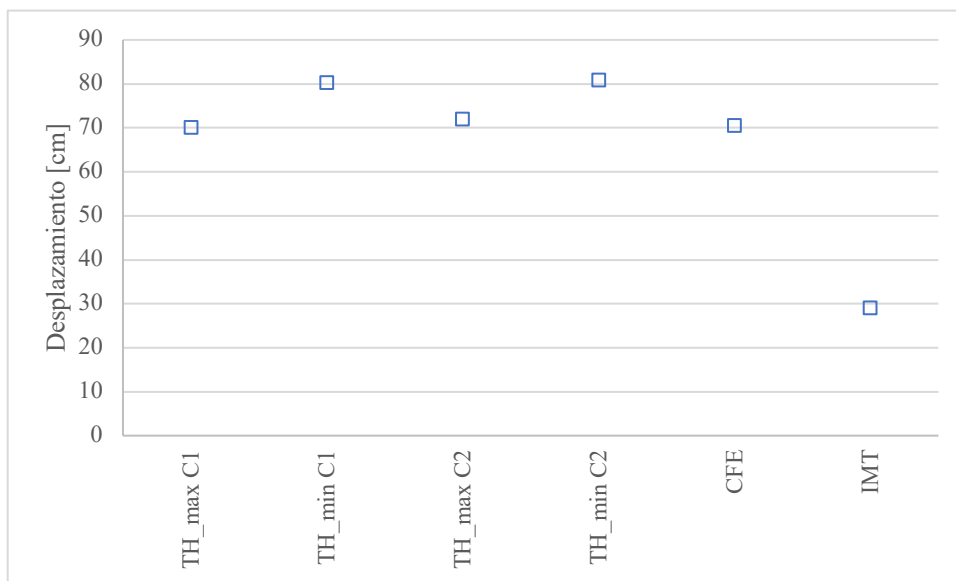


Gráfico 8. Comparativa final de desplazamientos en el sentido Longitudinal [nodo 249]

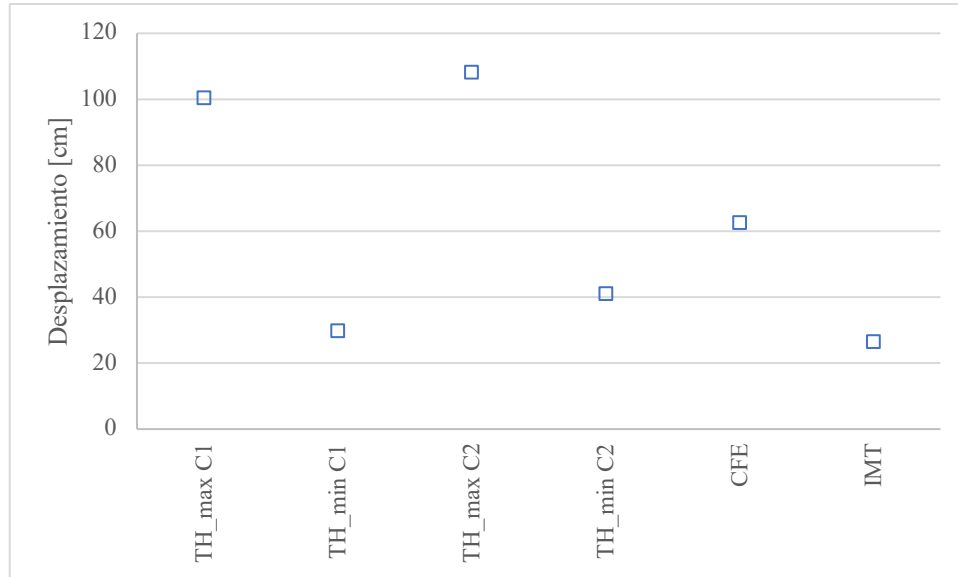


Gráfico 9. Comparativa final de desplazamientos en el sentido transversal [nodo 249]

Se puede observar en estas últimas graficas que el impacto de la falla en la respuesta de la estructura es mayor en el sentido de la falla, en este caso en la dirección transversal, donde los desplazamientos máximos que se observan en el Gráfico 9, superan en un 60% los reportados en un análisis modal espectral con los parámetros del MOC CFE respecto del valor máximo obtenido para el canal 2 y hasta un 400% con los lineamientos indicados en la normativa IMT.

De los resultados podremos también notar que los desplazamientos fueron obtenidos en un extremo del elemento estructural donde se han reportado desplazamientos importantes y de magnitudes similares en ambas direcciones ortogonales por lo que se analiza además un nodo más central asumiendo que los desplazamientos repostados son asociados a efectos torsionales del elemento.

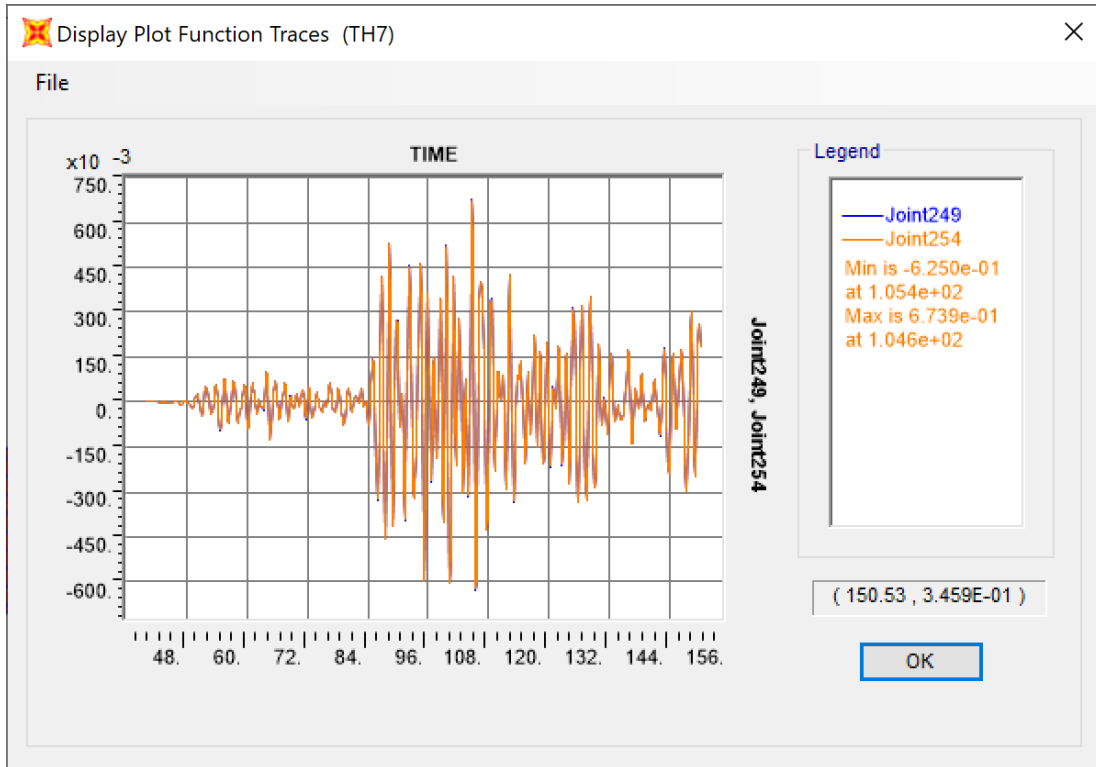


Figura 23. Comparación de desplazamiento entre el nodo 249 y 254.

De los resultados se pudo observar que los valores reflejaban el mismo comportamiento o una variación mínima respecto de un punto central. El nodo 249 corresponde al extremo y el nodo 254 al centro.

CONCLUSIONES

El trabajo presentado muestra una comparativa de metodologías en el análisis estructural de puentes vehiculares, esta comparativa incluye los métodos tradicionalmente usados y recogidos por las normativas locales y federales así como los que se han ido adoptando como uso generalizado en el desempeño profesional.

En esta tesis se trata el tema de una estructura que cruza una falla geológica, escenario el cual no se detecto desde la parte de exploración inicial y que no cubre la actual normativa. De esta manera es como a partir de la revisión y búsqueda de estudios previos que ha tenido un acercamiento a intentar determinar los efectos de eventos sísmicos en las cercanías de fallas es que se propone un método para determinar la respuesta dinámica de las estructuras, en le caso particular de la infraestructura carretera, los puentes al presentar grandes longitudes son los mas susceptibles de cruzar estas fallas y, por tanto, de sufrir daño.

Es necesario aclarar que no se pretende mitigar o controlar los desplazamientos en el suelo, sino proponer herramientas de análisis que nos permita conocer y cuantificar los efectos de esta en las estructuras para así tener elementos que determinen nuestra toma de decisión en la planeación y etapa de proyecto.

El estudio que se realizo a un puente de 7 claros donde la falla se presenta cercana al apoyo del eje 5, reporto que los desplazamientos obtenidos aplicando la metodología propuesta presentan, en relación con los obtenidos mediante un espectro de respuesta obtenido de acuerdo a los estipulado en la normativa y el manual de obras civiles de CFE, un incremento de 47cm lo que representa un 57.8%. Se pudo observar también que la respuesta ante aceleraciones en un solo sentido repercute en desplazamientos en ambas direcciones.

RECOMENDACIONES

Es comprensible que dada la extensa área que involucra la presencia de este tipo de fallas no se tenga contemplado en los mapas de riesgo a pesar de tener muy bien identificados las principales zonas donde se encuentran, sin embargo parece necesario dada nuestra posición geográfica ampliar el estudio que se tiene sobre los efectos de los sismos en estructuras cercanas a una falla geológica, involucrando instrumentación y un seguimiento a las estructuras mayores que se encuentren ya en servicio.

Se muestra que ante este caso particular el efecto de la falla puede ser controlable, sin embargo el diseño final de estos elementos queda para otro trabajo. No en todos los casos se presentarán las mismas condiciones y cada caso requerirá un estudio particular de ellos. Queda este trabajo como una propuesta para evaluar la respuesta dinámica ante eventos sísmicos con estas características.

A manera de recomendación se deberá verificar el diseño de los elementos ante estas demandas de esfuerzos obtenidos a partir de los resultados obtenidos y proponer dispositivos de apoyo con mayor amplitud de movimiento.

En la práctica profesional y a lo largo del territorio nacional algo con lo que tenemos que lidiar constantemente son los eventos sísmicos que hasta el momento se han atendido de manera exitosa y sin embargo quedan retos por abarcar.

BIBLIOGRAFÍA

- Saiidi, M., & Douglas, B. (2014). *Inelastic Static and Dynamic Analysis of Short R/C Bridges Subjected to Lateral Loads*. Washinton, DC.
- Google Earth. (2014). [software]. Image Digital Globe.
- INEGI. (2017). *Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática*. Obtenido de www.inegi.gob.mx
- FICSA. (2015). *Estudio de cimentación, E79, "Viaducto el Salto", km 91+874*. México: Fuerte Ingenieros Consultores, S.A. de C. V. para Grupo OHL.
- FICSA. (2017). *Estudio Geológico Viaducto el Salto*. México: Fuerte Ingenieros Consultores, S.A. de C. V. para Grupo OHL.
- Servicio Geologico Mexicano. (1997). *Carta geológica-minera E14-2, escala 1:250 000*. Ciudad de México: Servicio Geologico Mexicano.
- SCT. (octubre 2018). *Concesión para la construcción de la Autopista "Atizapán-Atlacomulco"*. CDMX: Secretaría de Comunicaciones y Transporte.
- OHL. (2014). E79, Proyecto ejecutivo Viaducto "El Salto". En Senermex (Ed.), *Autopista Atzapán-Atlacomluco*. Estado de México: OHL México, S.A.B. de C.V.
- Chopra, A. K., & Goel, R. K. (2008). *Analysis of ordinary bridges crossing fault-rupture zones*. University of California at Berkeley. Berkeley, CA.: Earthquake Engineering Research Center.

- Caltrans. (2013). *Analysis of ordinary Bridges that Cross faults*. California: California Department of Transportation.
- Sunye-Puchol, I., Lacan, P., Ortuño, M., Villamor, P., Audin, L., Zúñiga, F. R., . . . Lawton, T. F. (2015). La falla San Mateo: nuevas evidencias paleosismológicas de fallamiento activo en el graben de Acambay, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 32(num. 3), 361-376.
- Martínez-Reyes, J., & Nieto-Samaniego, A. (1990). Efectos geológicos de la tectónica reciente en la parte central de México. *Instituto de Geología, revista*, 9, 33-50.
- SCT. (2001). Sismo (N-PRY-CAR-6-01-005/01). En *Normas de Proyectos para Carreteras, Proyectos de nuevos Puentes y Estructuras similares*. México: Secretaria de Comunicaciones y Transporte e Instituto Mexicano del Transporte.
- Mextypsa. (2017). *Informe Estudio Geofísico Viaducto El Salto*. Estado de Mexico: Grupo OHL.
- García, D., Singh, S., Herráiz, M., Ordaz, M., & Pacheco, J. (2005). Inslab Earthquakes of Central Mexico. *Bulletin of Seismological Society of America*, 2274.
- M. Nau, J., & Hall, W. (1984). Scaling Methods for Earthquake Response Spectra. *ASCE*, 1533-1548.
- Prodisis v4.1, [software]. (15 de agosto de 2017). (Programa de Diseño Sísmico). México, México: Comisión Federal de Electricidad (CFE), Instituto de Investigaciones Eléctricas.
- CENAPRED - UNAM. (2018). Degtra. Version 10.4.0.
- Tseng, W., & Penzien, J. (1975). Seismic Analysis of Long Multiple-Span Highway Bridges. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 3-24.

Saiidi, M., & Ghusn, G. (1986). *Simple Histeretic Element for Biaxial Bending of R/C Colulumns (Nonlinear Earthquake Analysis of Bridge Systems)*. Reno: Nevada University.

Imbsen, R., & Penzien, J. (1986). *Evaluation of Energy-Absorption Characteristics of Highway Bridges under Seismic Conditions (Vol. 1)*. Berkeley: University of California.

Afshin, K., & Amjadian, M. (2010). n Approximate Method for Dynamic Analysis of Highway Bridges with Continuous Rigid Deck. *Engineering Structures*, 2850-2860.

REFERENCIAS

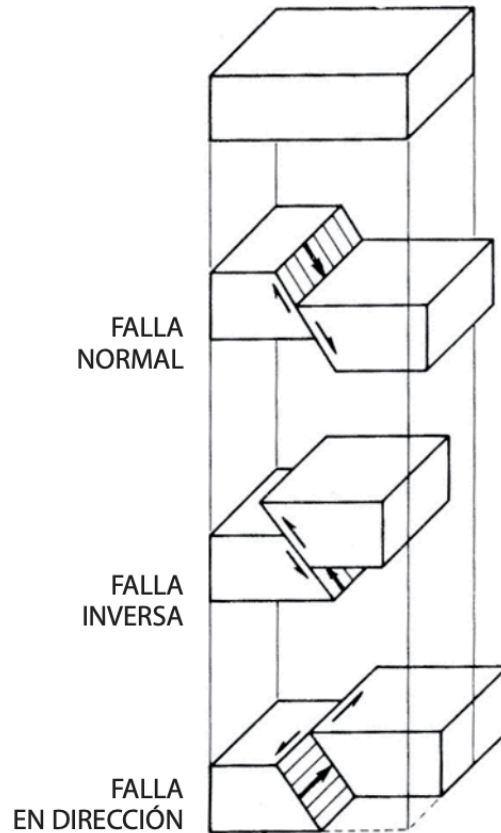
- FICSA. (2015). *Estudio de cimentación, E79, "Viaducto el Salto", km 91+874*. México: Fuerte Ingenieros Consultores, S.A. de C. V. para Grupo OHL.
- FICSA. (2017). *Estudio Geológico Viaducto el Salto*. México: Fuerte Ingenieros Consultores, S.A. de C. V. para Grupo OHL.
- Servicio Geologico Mexicano. (1997). *Carta geológica-minera E14-2, escala 1:250 000*. Ciudad de México: Servicio Geologico Mexicano.
- SCT. (octubre 2018). *Concesión para la construcción de la Autopista "Atizapán-Atlacomulco"*. CDMX: Secretaría de Comunicaciones y Transporte.
- OHL. (2014). E79, Proyecto ejecutivo Viaducto "El Salto". In Senermex (Ed.), *Autopista Atzapán-Atlacomulco*. Estado de México: OHL México, S.A.B. de C.V.
- Sunye-Puchol, I., Lacan, P., Ortuño, M., Villamor, P., Audin, L., Zúñiga, F. R., . . . Lawton, T. F. (2015). La falla San Mateo: nuevas evidencias paleosismológicas de fallamiento activo en el graben de Acambay, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 32(num. 3), 361-376.
- Martínez-Reyes, J., & Nieto-Samaniego, A. (1990). Efectos geologicos de la tectónica reciente en la parte central de México. *Instituto de Geología, revista*, 9, 33-50.
- Mextypsa. (2017). *Informe Estudio Geofísico Viaducto El Salto*. Estado de Mexico: Grupo OHL.
- García, D., Singh, S., Herráiz, M., Ordaz, M., & Pacheco, J. (2005). Inslab Earthquakes of Central Mexico. *Bulletin of Seismological Society of America*, 2274.

ANEXO 1. INFORMACIÓN GEOLÓGICA

Las Fallas geológicas

Como una breve mención se recuerda que una falla son fracturas en la corteza a lo largo de las cuales se ha tenido un desplazamiento apreciable. Las fallas se visualizan como planos o superficies que dividen una porción de terreno desplazado uno respecto del otro. A partir de lo anterior se han clasificado las fallas de acuerdo al desplazamiento, inclinación (buzamiento), los tipo de falla, de manera general son:

- Fallas normales. Se produce un desplazamiento vertical por esfuerzos distensivos cuando el bloque de techo se desplaza hacia abajo con respecto al bloque de muro.
- Fallas inversas. Se produce un desplazamiento vertical por esfuerzos compresivos cuando el bloque de muro se desplaza hacia arriba con respecto al bloque de techo.
- Fallas en dirección. Son planos de fractura con desplazamiento en la horizontal paralela a la dirección de la falla. Se dan en todas las escalas, pueden recorrer desde centenares de kilómetros y afectar a toda la corteza o tratarse de pequeños accidentes que acompañan a los pliegues



Es frecuente encontrar asociaciones de fallas, que dan lugar a estructuras tipo graben, horst y mantos de cabalgamiento.

Los graben y horst son estructuras que suelen localizarse en el contexto de la tectónica de placas y se caracterizan por tratarse de zonas hundidas o valles alargados, limitados por fallas con desplazamiento vertical. También se denominan fosas tectónicas. Cuando se suceden varias fosas tectónicas, las zonas elevadas limítrofes entre dos consecutivas se denominan horst. El tamaño de este tipo de estructuras puede variar de decenas a miles de kilómetros



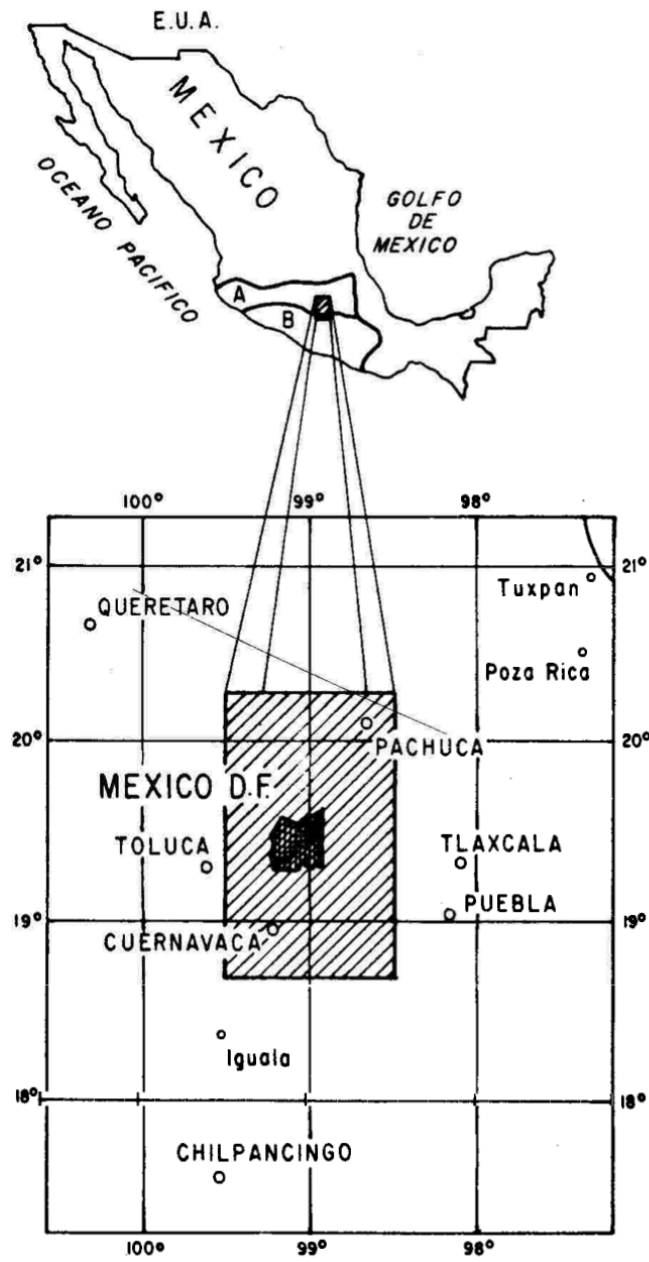
Graben relleno de sedimentos o fosa tectónica.

Origen y Geología regional.

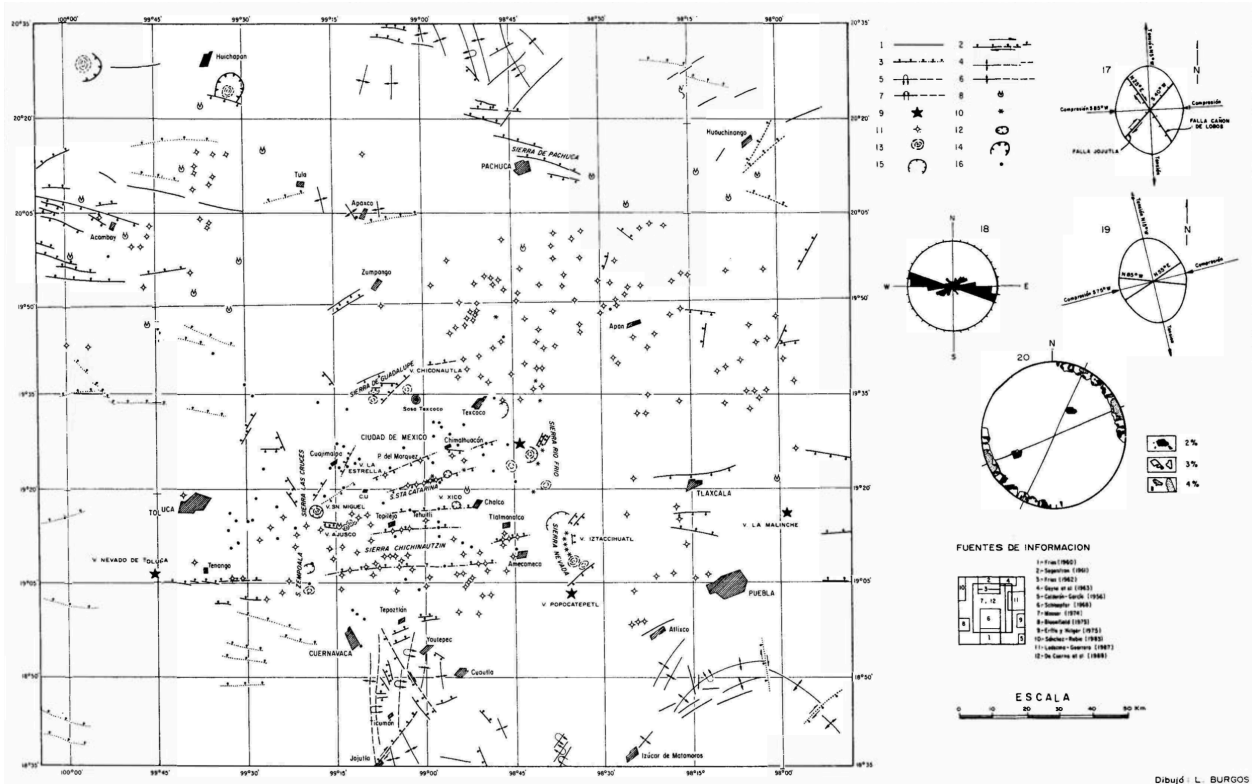
En la zona del puente se localiza una serie de fallas asociadas al eje transísmico Mexicano, particularmente a la denominadas falla pastores.

La litología del estado de México esta constituida por afloramientos de rocas de origen ígneo, sedimentario y metamórfico, siendo las rocas ígneas intrusivas las que ocupan una mayor extensión. Las rocas de esta entidad datan desde el triásico (las metamórficas) hasta el cuaternario (representado por las rocas ígneas de composición basáltica, así como por depósitos lacustres aluviales).

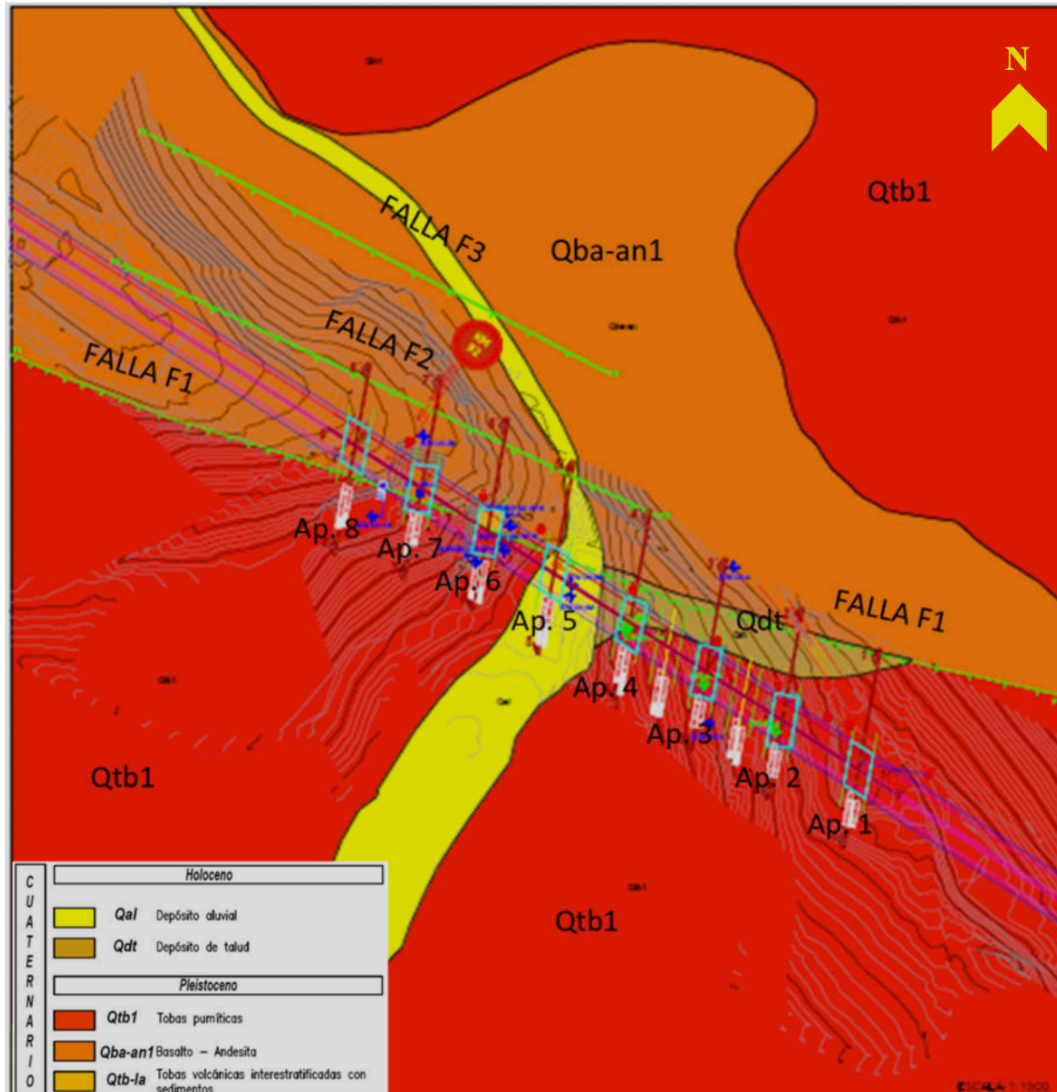
Las principales estructuras geológicas que se representan son aparatos volcánicos, algunos de los cuales se cuentan entre los mas notables del país son: el Popocatépetl, el Iztaccíhuatl y el nevado de Toluca. Además existen fracturas y fallas regionales, asociadas a los fenómenos de vulcanismo y mineralización. Los aspectos de la geología económica mas importantes están relacionados con las rocas que por su naturaleza primaria y las estructuras que las han afectado, constituyen zonas favorables para la explotación de acuíferos, de yacimientos minerales y de bancos de materiales para la construcción.



Localización del arco volcánico transamericano (Damon et al. 1981)



En la carta geológica mostrada en la Figura 10 del CAPÍTULO I, I.4 La Falla Geológica se muestra la ubicación de las fallas geológicas descritas por Sunye-Puchol, et al., 2015 en la zona, la ubicación del viaducto y la distribución de los materiales geológicos de la región.



Geología Local y ubicación (INEGI, 2017).

A lo largo de la zona se identificaron los contactos geológicos y lineamientos más sobre salientes. A escala regional se aprecia los alineamientos asociados las fallas principales del sistema del Graben de Acambay, y otras fallas, como La Perales al suroeste de Atacomulco. Sobre la Figura 11, que es la de mayor acercamiento, se observan claramente los contactos y fallas de área de interés. En esta imagen se define geológicas sobre el trazo del viaducto cuatro unidades litológicas asociadas a los Sedimentos Lacustres intercalados con Tobas ($Qla-tb$), que corresponde a las unidades más antiguas identificadas en la zona de interés, seguido de Andesitas-Basálticas ($Qa-b$), Tobas (Qtb), Depósitos de Talud (Qdt) y Depósitos aluviales (Qal).

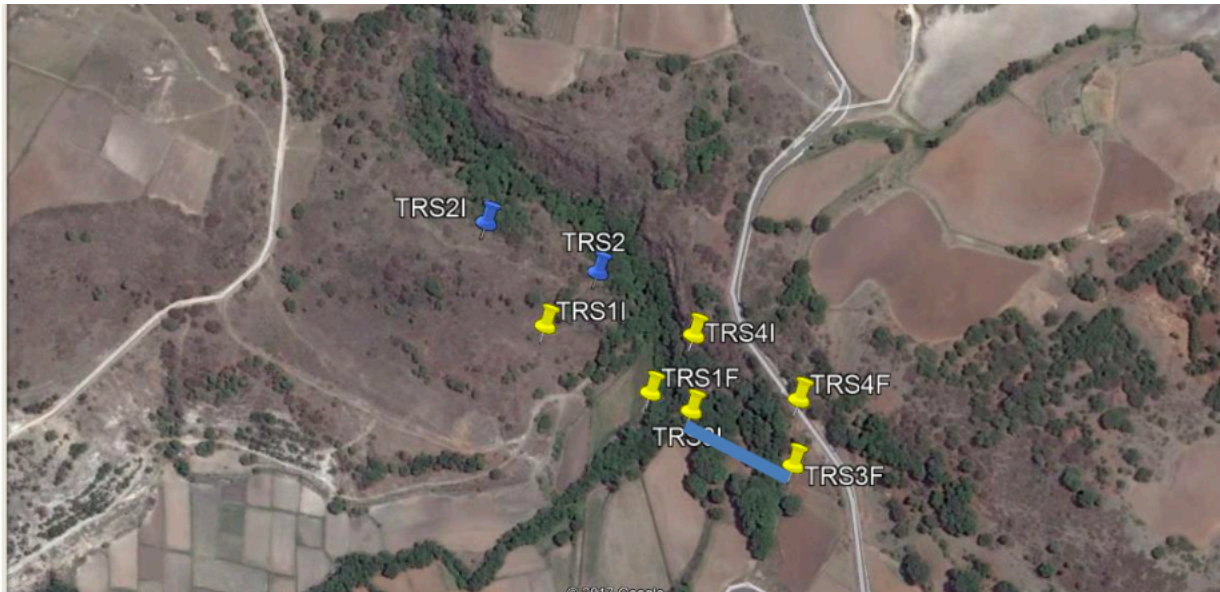
Se identifica la interacción entre la falla geológica y la estructura en la Figura 11 y se puede apreciar la cercanía en el apoyo 5 en una vista en planta. “Las fallas identificadas en la zona del Viaducto se les denominaron como F1, F2 y F3. La falla de este sistema y más importante por su longitud y que afecta principalmente a los apoyos 6 y 7 se le denominó como Falla F1 que a su vez se le designó como “Falla El Salto” (FICSA, 2017). Tiene una longitud de aproximadamente 8 km y termina o cruza la falla de Pastores al oeste de la zona de estudio, muy cerca del entronque al final de esta obra, con la autopista que va a Guadalajara.



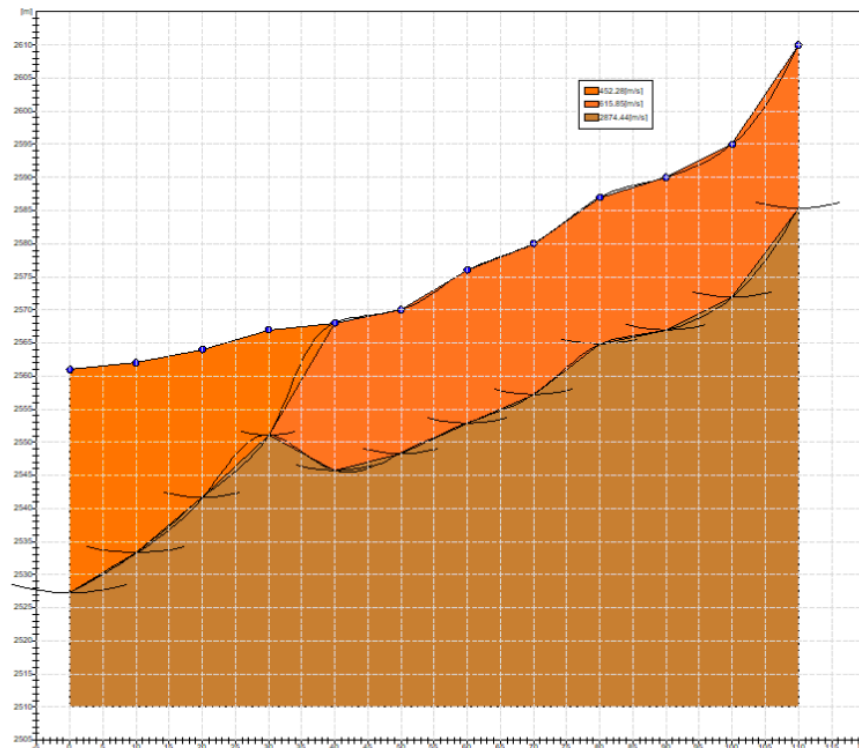
Imágen indicando los contactos litológico (FICSA, 2017).

A los lados de la falla F1 en ambos lados se observaron fallas menores asociadas a esta; al norte del viaducto se identificaron la F2 y F3 en basaltos (Qa-b) y tobas de la unidad Qtb; al sur en la falla F1 también se observan varias fallas normales menores en las tobas Q1a-tb en la zona de apoyo 6 pero que no se han incluido en la interpretación. Estas fallas tienen un echado fuerte hacia el sur de cerca de 80°”, de acuerdo a la descripción realizada por FICSA en el estudio geológico realizado en el 2017.

Información y datos geofísicos.



Posición del tendido sísmico TRS 3



Gráfica del perfil sísmico para el MASW⁸ 3, correspondiente al tendido TR3.

⁸ MASW is an acronym of Multichannel Analysis of Surface Waves. It is a seismic exploration

The National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP) es un programa desarrollado para el gobierno federal de EE.UU. con el fin de reducir los victimas, heridos y perdidas de propiedades causadas por un terremoto.

El congreso Estadounidense creo NEHRP en 1997 dirigido por cuatro agencias federales que coordinan sus actividades con la mejora y mantenimiento del programa. Estas agencias son el FEMA, National Institute of Standards and Metodología Descripción del método de cálculo 39 Technology (NIST), National Science Foundation (NSF), y U.S. Geological Survey (USGS).

The Site Classes are defined as follows:

- A. Hard rock with measured shear wave velocity, $\bar{v}_s > 5,000 \text{ ft/sec (1500 m/s)}$
- B. Rock with $2,500 \text{ ft/sec} < \bar{v}_s \leq 5,000 \text{ ft/sec (760 m/s} < \bar{v}_s \leq 1500 \text{ m/s)}$
- C. Very dense soil and soft rock with $1,200 \text{ ft/sec} < \bar{v}_s \leq 2,500 \text{ ft/sec (360 m/s} < \bar{v}_s \leq 760 \text{ m/s)}$ or with either $N > 50$ or $\bar{s}_u > 2,000 \text{ psf (100 kPa)}$
- D. Tiff soil with $600 \text{ ft/sec} \leq \bar{v}_s \leq 1,200 \text{ ft/sec (180 m/s} \leq \bar{v}_s \leq 360 \text{ m/s)}$ or with either $15 \leq N \leq 50$ or $1,000 \text{ psf} \leq \bar{s}_u \leq 2,000 \text{ psf (50 kPa} \leq \bar{s}_u \leq 100 \text{ kPa)}$
- E. A soil profile with $\bar{v}_s < 600 \text{ ft/sec (180 m/s)}$ or with either $N < 15$, $\bar{s}_u < 1,000 \text{ psf}$, or any profile with more than 10 ft (3 m) of soft clay defined as soil with $PI > 20$, $w \geq 40$ percent, and $s_u < 500 \text{ psf (25 kPa)}$

technique first introduced in GEOPHYSICS by Park et al., (1999). It evaluates ground stiffness by measuring shear-wave velocity (V_s) of subsurface in 1-D, 2-D, and 3-D for various types of geotechnical engineering projects in the most common depth range of 0-30 meters.

F. Soils requiring site-specific evaluations:

1. Soils vulnerable to potential failure or collapse under seismic loading such as liquefiable soils, quick and highly sensitive clays, collapsible weakly cemented soils.

Exception: For structures having fundamental periods of vibration less than or equal to 0.5 second, site-specific evaluations are not required to determine spectral accelerations for liquefiable soils. Rather, the Site Class may be determined in accordance with Sec. 3.5.2, assuming liquefaction does not occur, and the corresponding values of F_a and F_v determined from Tables 3.3-1 and 3.3-2.

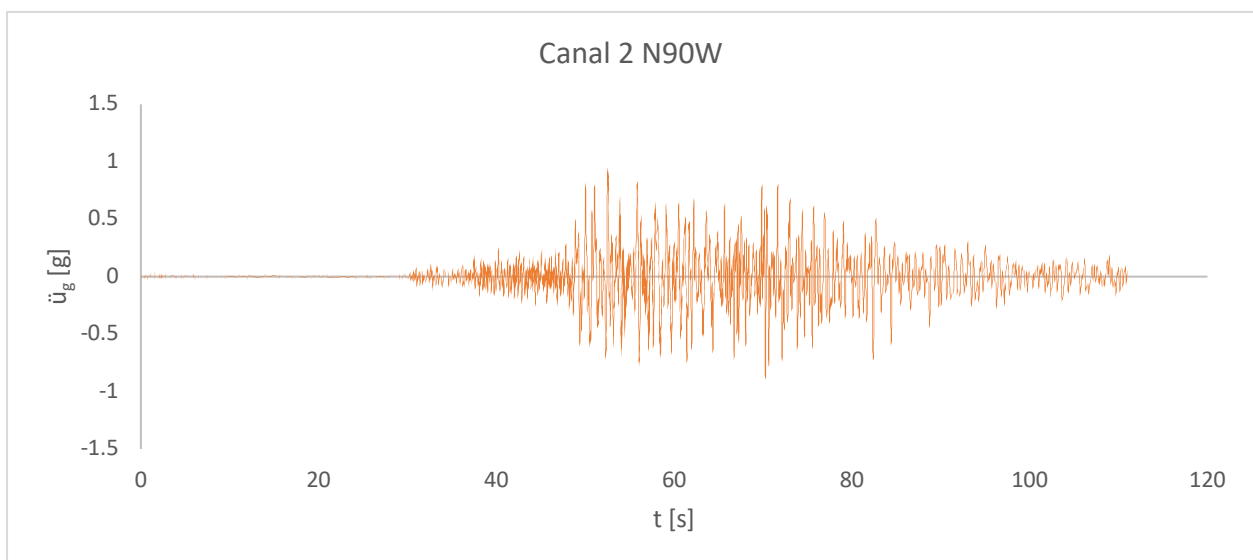
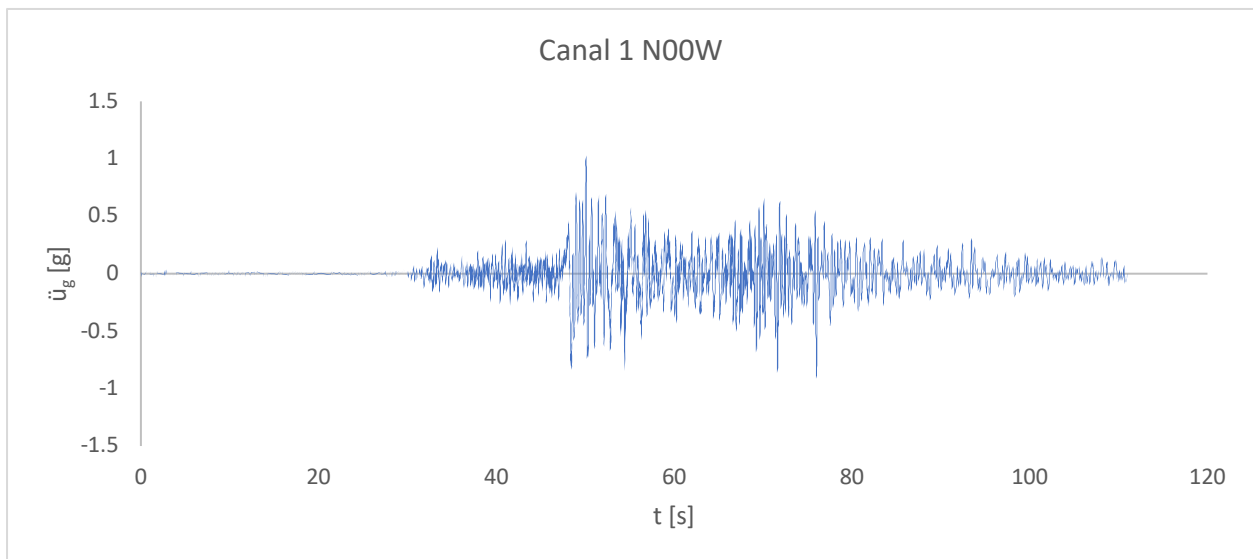
2. Peat and/or highly organic clays ($H > 10$ ft [3 m] of peat and/or highly organic clay, where H = thickness of soil).
3. Very high plasticity clays ($H > 25$ ft [8 m] with $PI > 75$)
4. Very thick, soft/medium stiff clays ($H > 120$ ft [36 m]) with $su < 1,000$ psf (50 kPa).

ANEXO 2. ACELEROGRAMAS Y ESPECTROS.

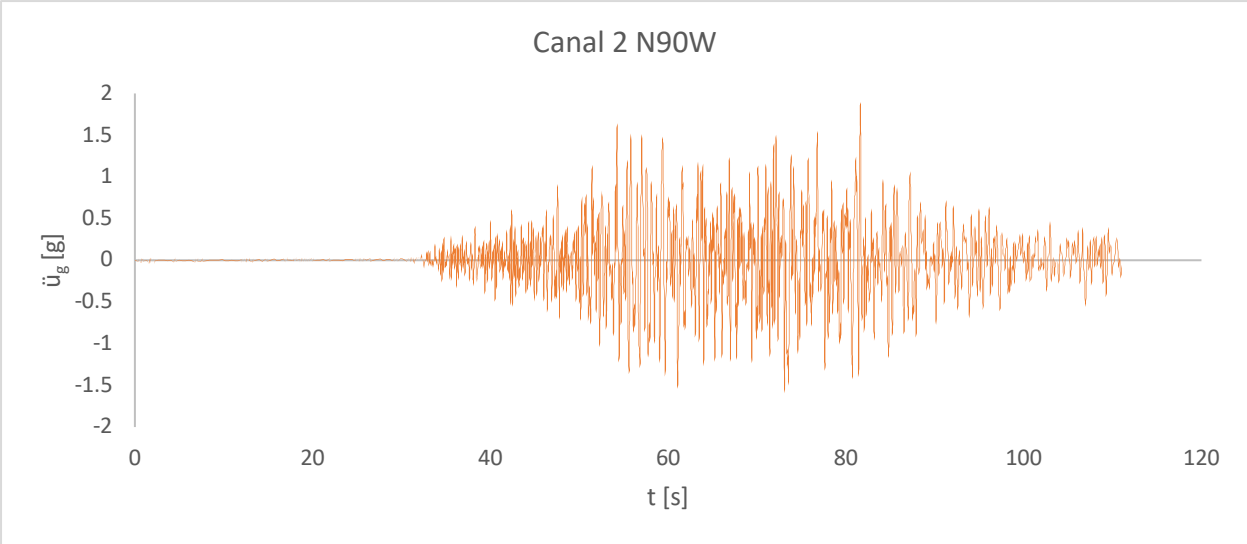
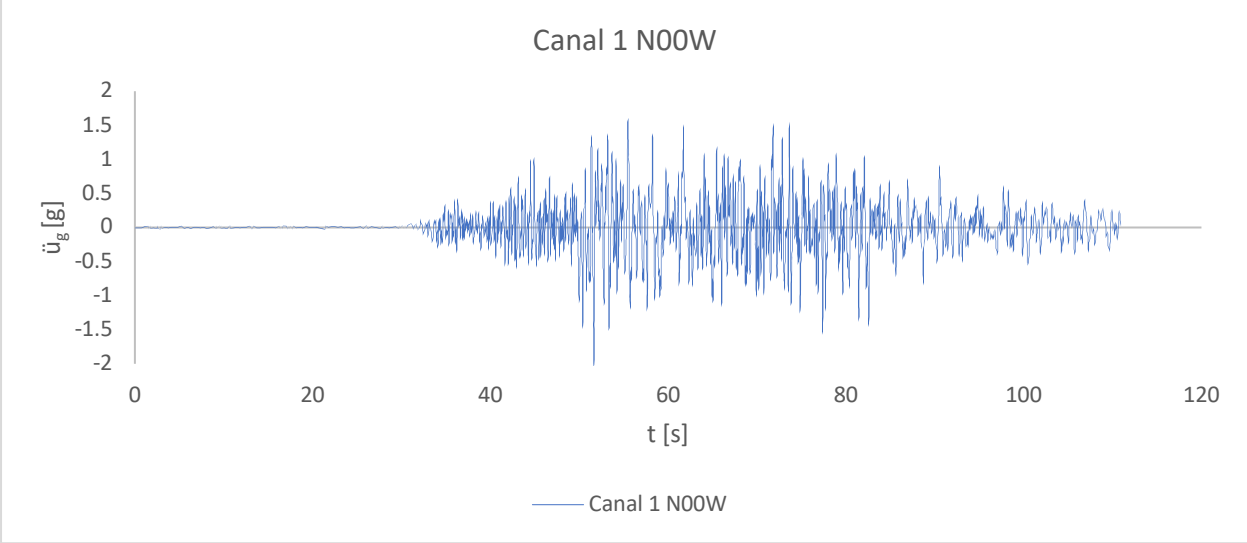
Registros

Los registros de aceleración que se utilizaron fueron obtenidos de la base Mexicana de Sismos Fuertes asociados a la región y que cumplieran con especificaciones particulares como lo es la distancia al sitio, profundidad y la magnitud.

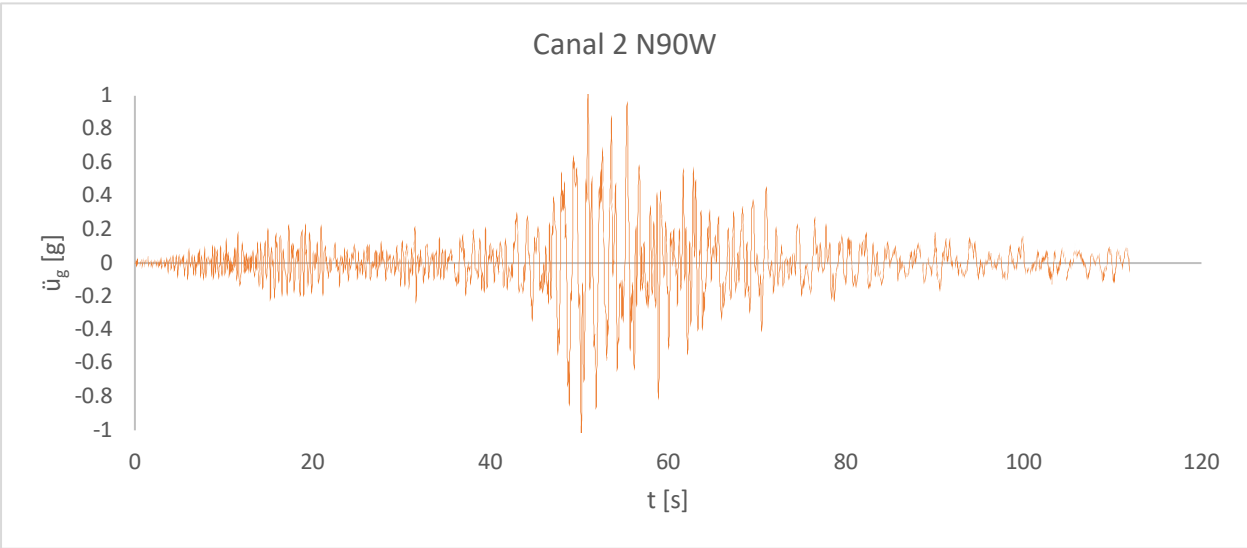
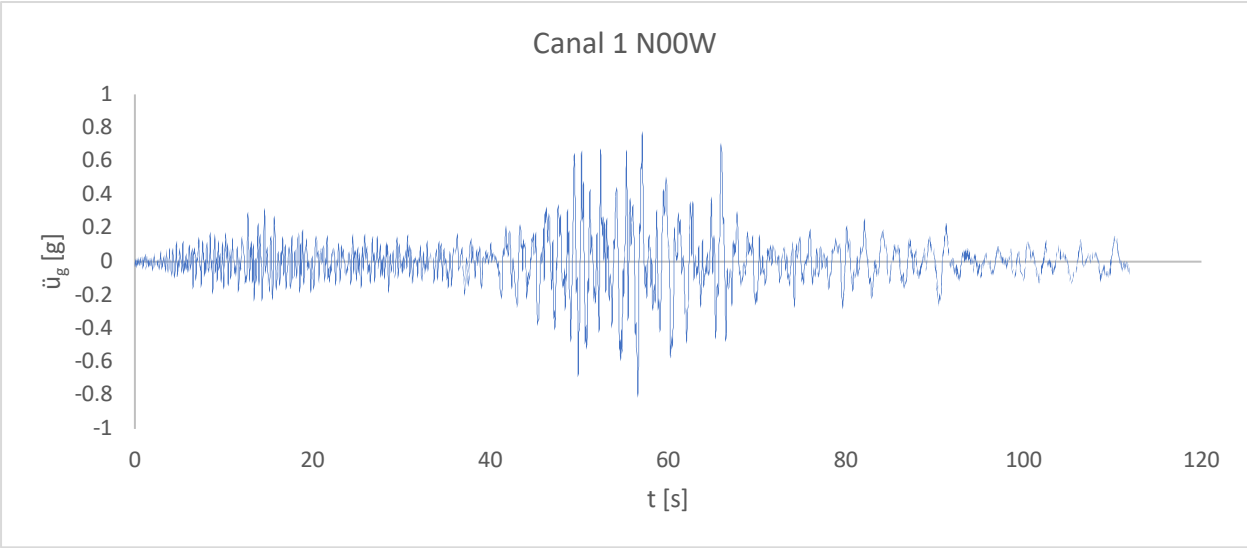
A continuación se muestran las graficas de los registros utilizados:



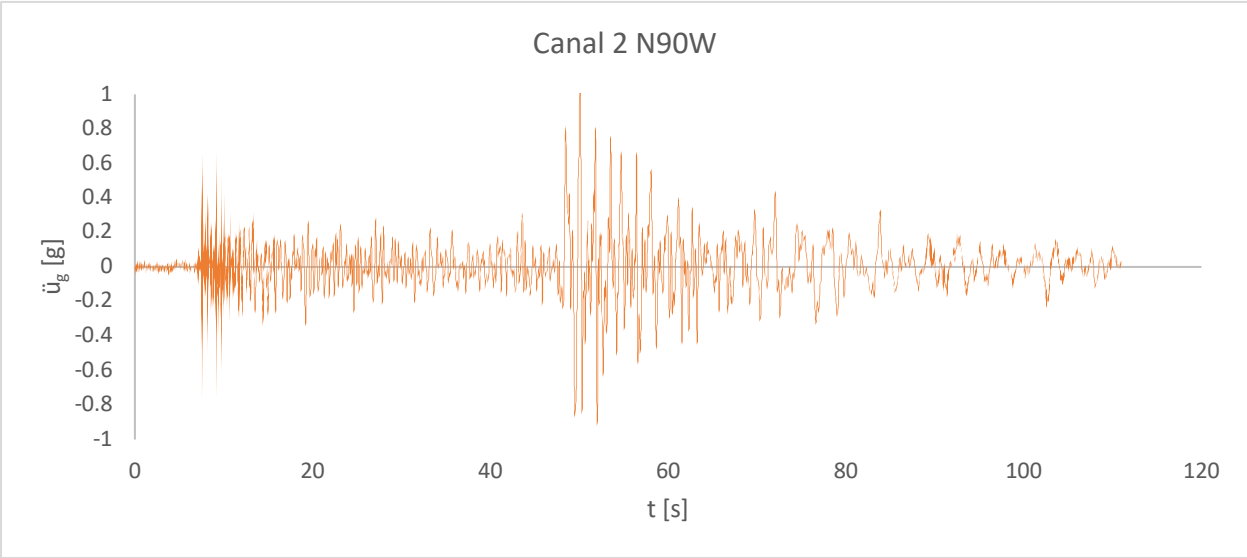
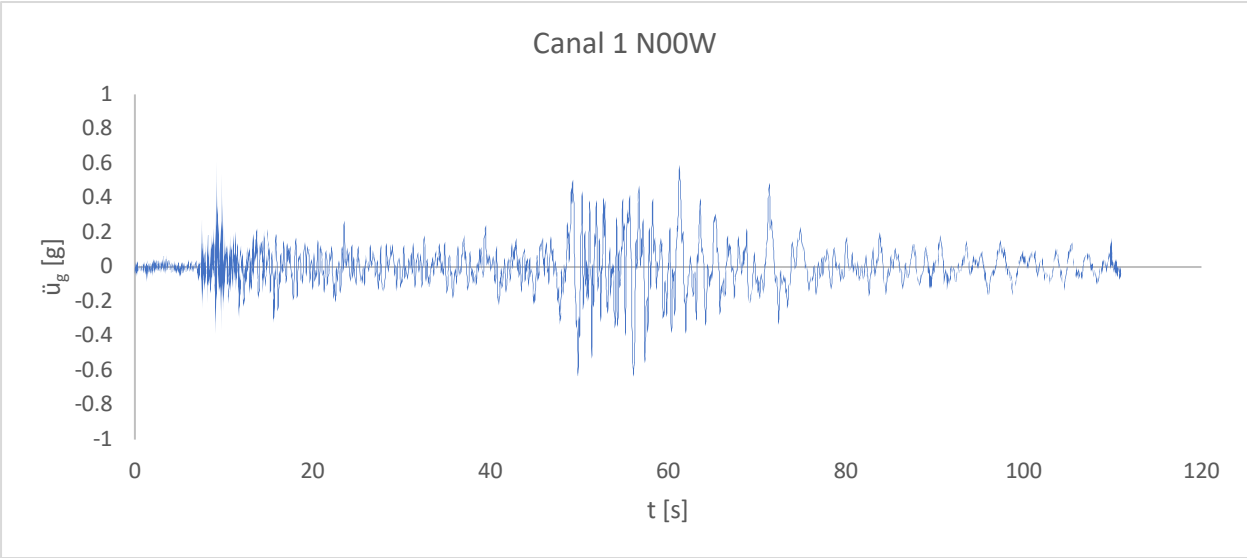
Registro 1, SLPA0804.28.



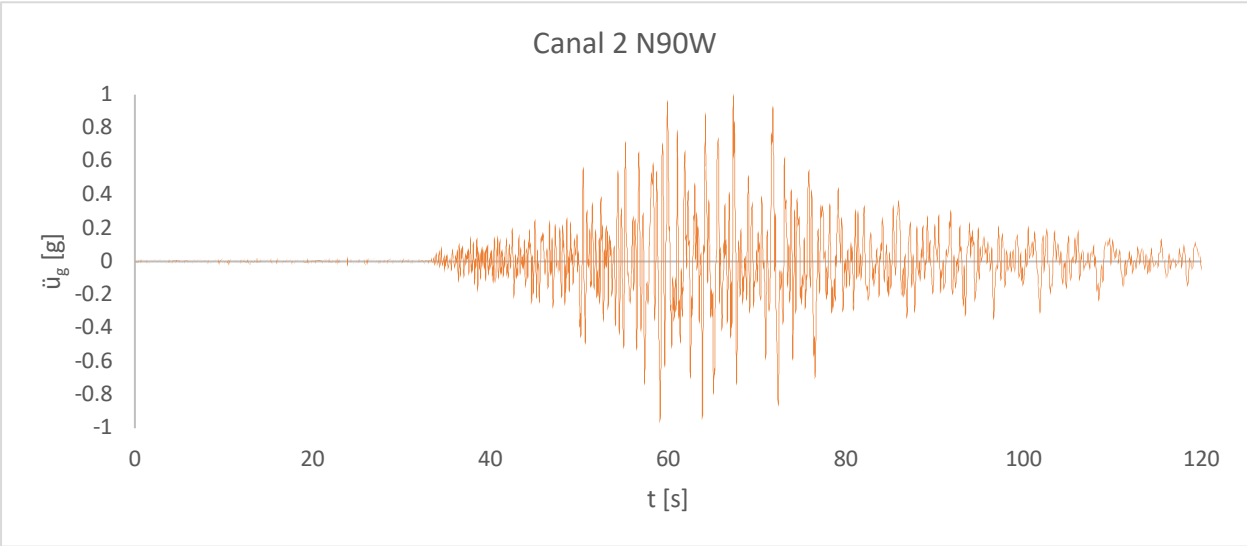
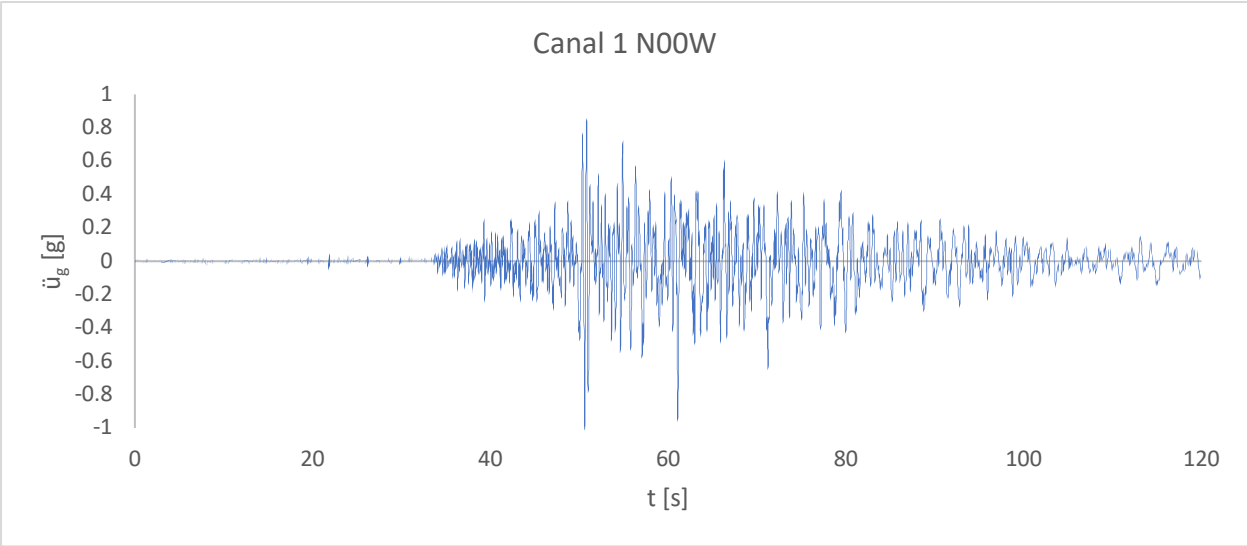
Registro 2, SLPA1112.111.



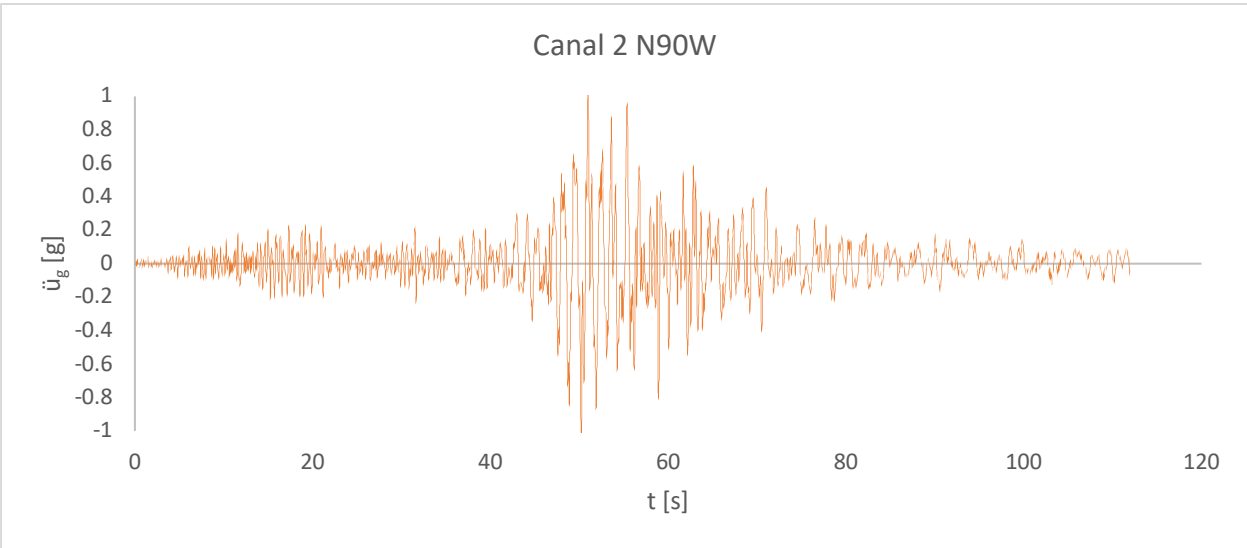
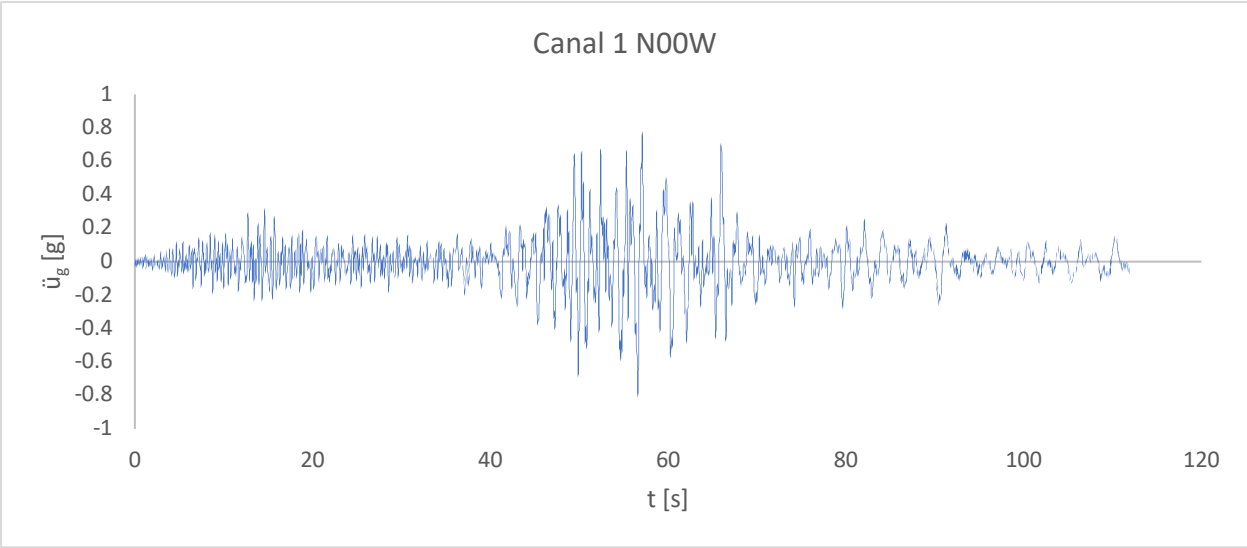
Registro 3, SLPA1203.201.



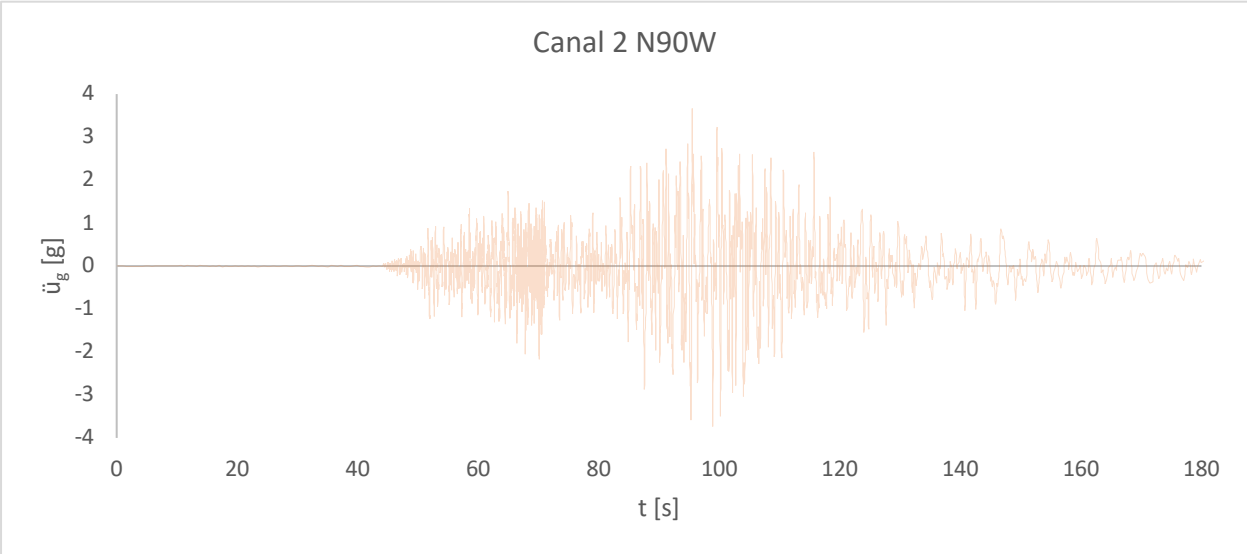
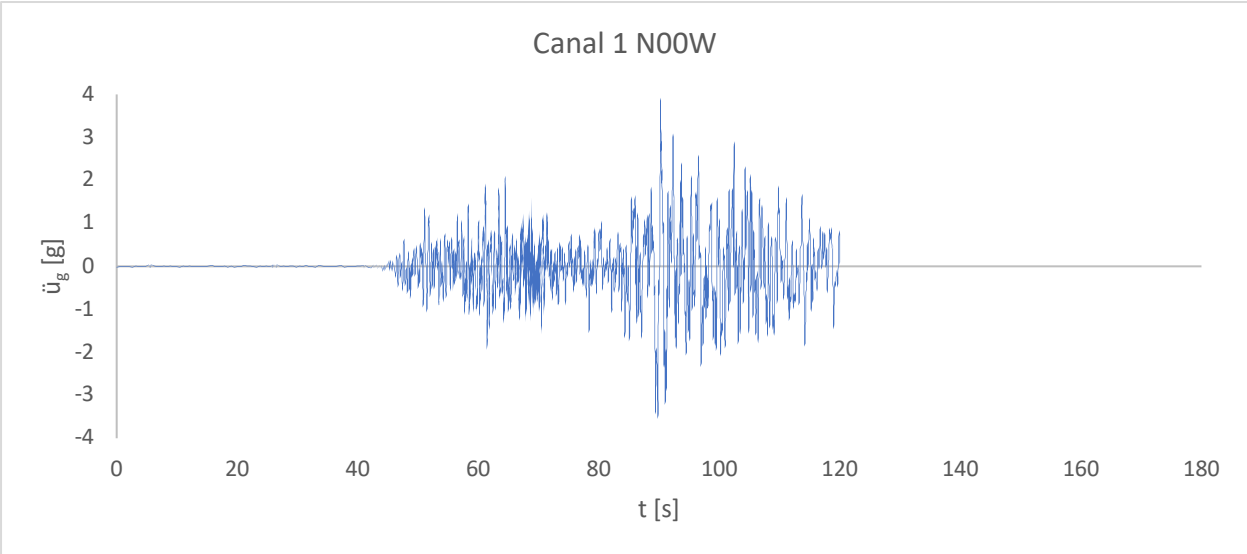
Registro 4, SLPA1304.221



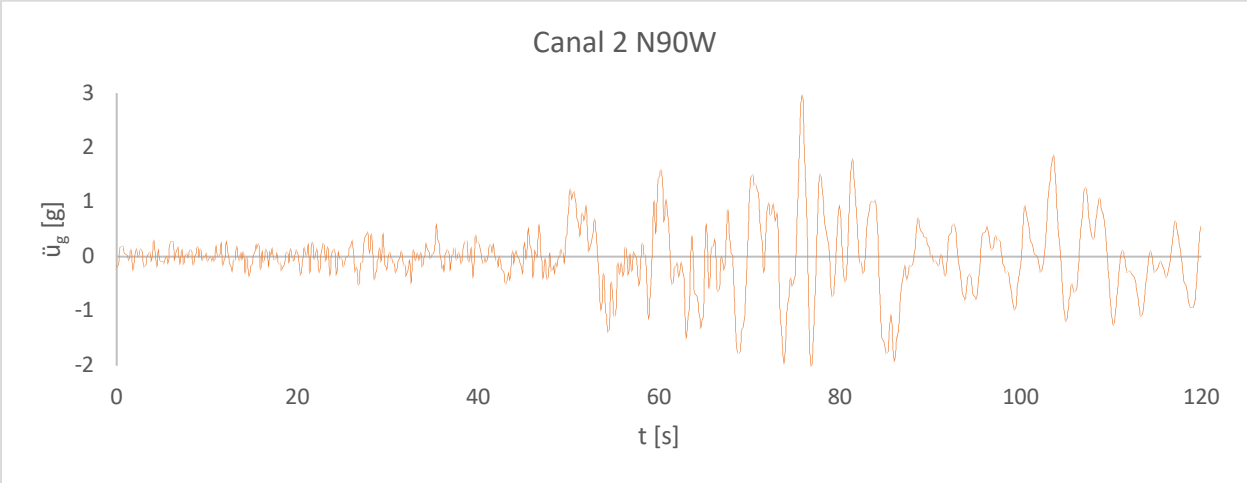
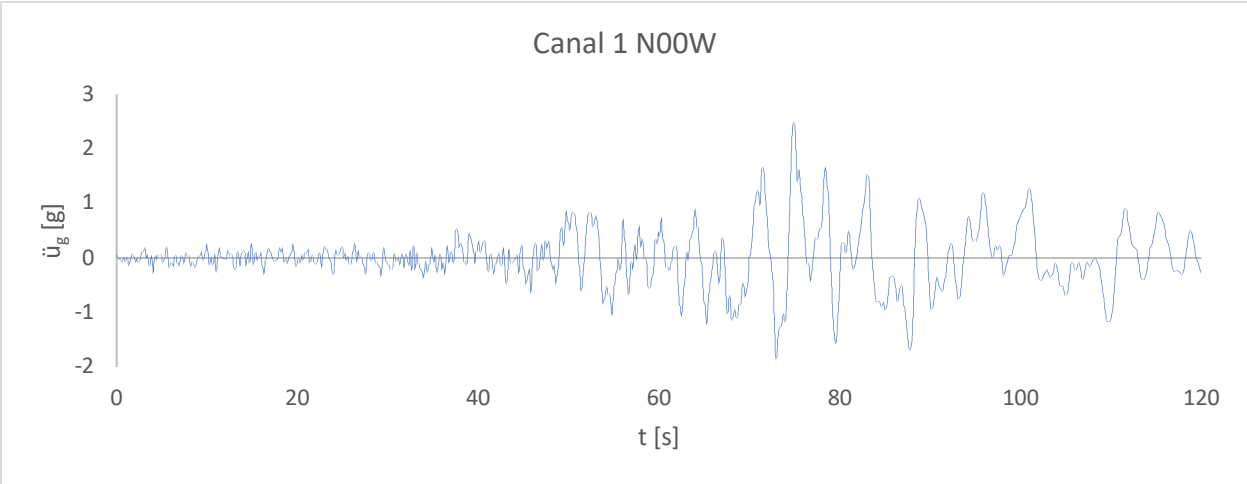
Registro 5, SLPA1306.161.



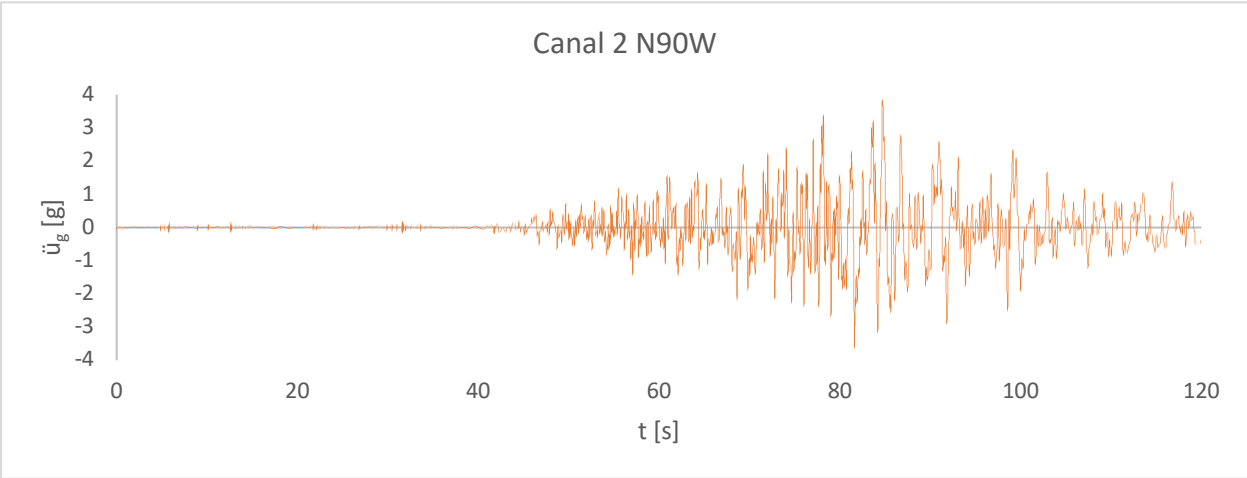
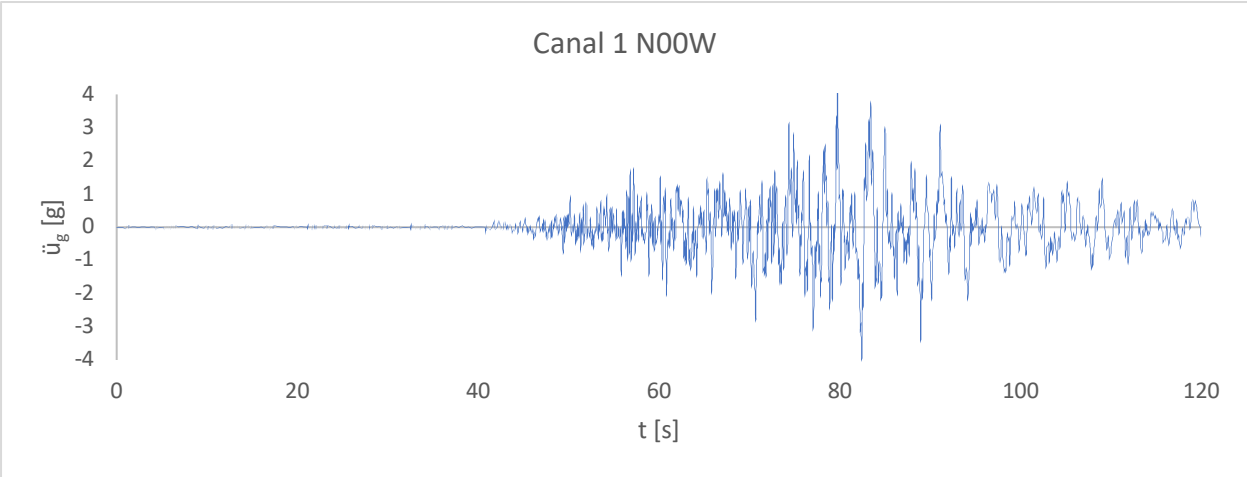
Registro 6, SLPA1308.211.



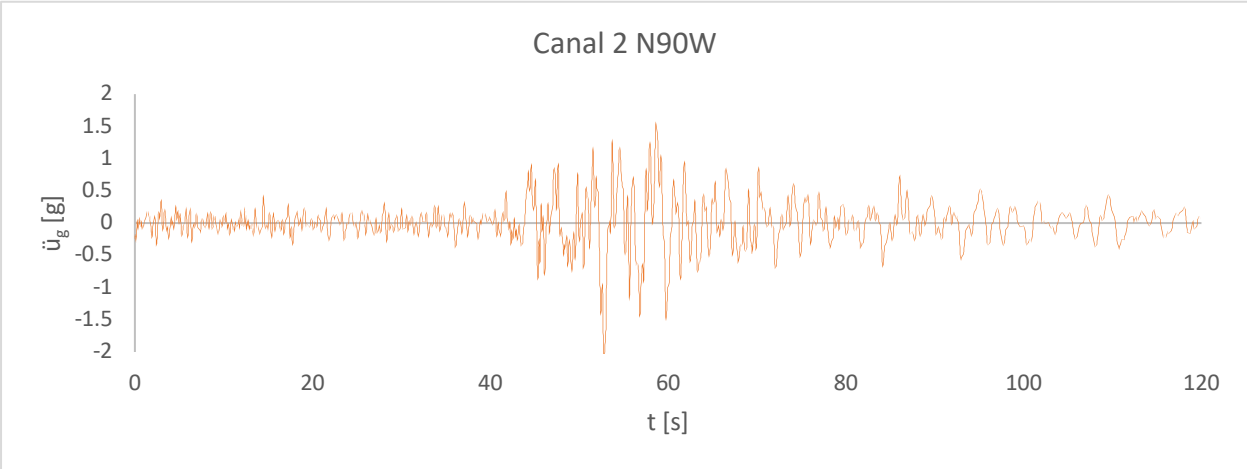
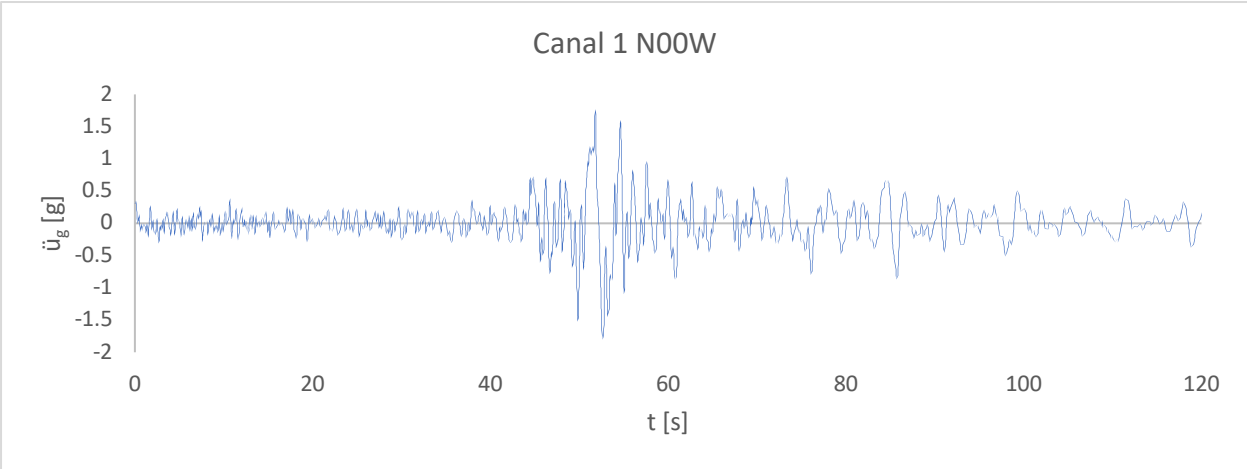
Registro 7, SLPA1404.181.



Registro 8, SLPA1709.081.



Registro 9, SLPA1709.191.



Registro 10, SLPA1802.161.

Espectros de Referencia

