



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

DISEÑO SÍSMICO SIMPLIFICADO DE PUENTES CON
AMORTIGUADORES VISCOSOS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

JOSÉ EDUARDO GARFIAS ARRIAGA

ASESOR:

DR. EN INGENIERÍA SÍSMICA Y
DINÁMICA ESTRUCTURAL

JOSÉ DE JESÚS ÁLVAREZ SERENO

MORELIA, MICHOACÁN, ENERO DEL 2013

AGRADECIMIENTO

Gracias a Dios que me dio vida y sabiduría para poder cerrar este ciclo tan importante.

A mis **abuelitos**, les doy gracias por que siempre estuvieron a mi lado y fueron como mis segundos padres, el Sr. Pascual Garfias y la Sra. Eufrosina Rebollar.

A mi **padre**, por sus sacrificios, su confianza apoyo incondicional, ya que siempre estuviste cuando te necesité y ahora que concluye esta etapa te dedico mi trabajo ya que sin ti esto no hubiera sido posible, gracias papa por creer en mí.

A mi **madre**, gracias por su paciencia, comprensión y el apoyo que siempre me brindaste eres parte de este gran paso gracias mama.

A mis **profesores**, de los cuales aprendí en cada una de sus clases y me dieron la herramientas para poder forja un gran futuro, en especial a mi tutor, asesor y gran amigo el Dr. José de Jesús Álvarez Sereno, quien siempre estuvo cuando lo necesite y fue una gran ayuda para poder terminar con este gran proyecto, gracias.

Dedico la Tesis a

Mi Padre Zenaido Garfias R. y mi Madre Rosa Elvia Arriaga R.

INDICE

Capítulo 1).- Introducción.....	página 4
1.1.- Antecedentes.	página 4
1.2.- Investigación bibliográfica.	página 5
1.3.- Objetivo.	página 14
Capítulo 2).- Caracterización.	página 15
2.1.- Amortiguadores viscosos.	página 15
2.2.- Acción sísmica.	página 17
Capítulo 3).- Estudio paramétrico para sistemas de un grado de libertad.	página 27
3.1.- Modelo analítico.	página 27
3.2.- Respuesta para periodos de 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75 y 2.00 segundos.	página 29
Capítulo 4).- Ayudas de diseño.	página 47
4.1.- Desarrollo.	página 47
4.2.- Verificación.	página 65
Capítulo 5).- Conclusiones.	página 73
5.1.- Comentarios finales y conclusiones.	página 73
5.2.- Investigaciones futuras.	página 74
Bibliografía.	página 75

Capítulo 1) Introducción

1.1.- Antecedentes.

Toda obra está sujeta a grandes acciones como son las producidas por la naturaleza y las que produce la misma estructura, como acciones o fuerzas naturales se tienen lo que son: las grandes ráfagas de vientos, las fuerzas sísmicas y los oleajes.

- *Ráfagas de viento:* Los vientos globales se generan como consecuencia del desplazamiento del aire desde zonas de alta presión a zonas de baja presión, determinando los vientos dominantes de un área o región. Aún así hay que tener en numerosos factores locales que influyen o determinan los caracteres de intensidad y periodicidad de los movimientos del aire.
- *Fuerzas sísmicas:* son vibraciones de la corteza terrestre, generadas por distintos fenómenos, como la actividad volcánica, la caída de techos de cavernas subterráneas y por explosiones (naturales o artificiales), sin embargo los sismos más severos son los de origen tectónico que se deben a los desplazamientos bruscos de las grandes placas tectónicas en que se subdivide la corteza terrestre.
- *Oleajes:* en ocasiones denominado también maremoto es una ola o un grupo de olas de gran energía y tamaño que se producen cuando algún fenómeno extraordinario desplaza verticalmente una gran masa de agua. Se calcula que el 90% de estos fenómenos son provocados por terremotos, en cuyo caso reciben el nombre, más preciso, de maremotos tectónicos.

Por lo tanto las estructuras que se construyen en los lugares donde ocurren algunas de las acciones antes mencionadas deben de estar diseñadas para resistir estos fenómenos, pero en algunas ocasiones por problemas económicos no se puede utilizar alguna metodología que nos ayude a diseñar y ejecutar la construcción y así resistir tales fuerzas.

Con la ocurrencia de los sismos de Loma Prieta (1989), Northridge (1994), Kobe (1995) y Taiwán (1999), quedó en evidencia la alta vulnerabilidad de las estructuras de puentes y viaductos y el alto costo económico que

supone, no sólo su reparación, sino también la interrupción de las vías que comunican.

A partir de estas experiencias, se evidenció la necesidad de profundizar en el estudio de la respuesta sísmica de las estructuras y de mejorarla por medio de la inclusión de dispositivos capaces de moderar o incluso anular el efecto del sismo en ellas, desarrollando la tecnología de los disipadores de energía aplicada a grandes construcciones.

Estos dispositivos pueden ser utilizados en estructuras nuevas o ya existentes, ya que la finalidad de estos es reducir o eliminar la totalidad de los daños a la estructura: los beneficios son que los dispositivos pueden ser remplazados fácilmente después de un gran sismo y los costos de reparación y sustitución de los dispositivos serán menores a las reparaciones de la estructura o en algunos casos a la demolición y reconstrucción de la estructura.

En la investigación que se muestra a continuación se crearon ayudas de diseño, las cuales sirven para que el ingeniero encargado del diseño de las estructuras de puentes tenga una gran variedad de soluciones en la implementación de disipadores de energía (amortiguadores viscosos) y así eliminar el análisis analítico que se acostumbraba realizar para poder saber que amortiguador viscoso era el más conveniente y que cumplía con las características deseadas.

1.2.- Investigación bibliográfica.

La disipación de energía se logra mediante la introducción de dispositivos especiales en una estructura, con el fin de reducir las deformaciones y esfuerzos sobre ella.

Estos dispositivos reducen la demanda de deformación y esfuerzos producidos por el sismo mediante el aumento del amortiguamiento estructural, como se muestra en la *figura 1*. Como resultado los esfuerzos inducidos por el sismo en la estructura pueden ser hasta un 50% menores que los correspondientes a la estructura sin disipadores, reduciendo sustancialmente las incursiones inelásticas (daño) de la estructura.

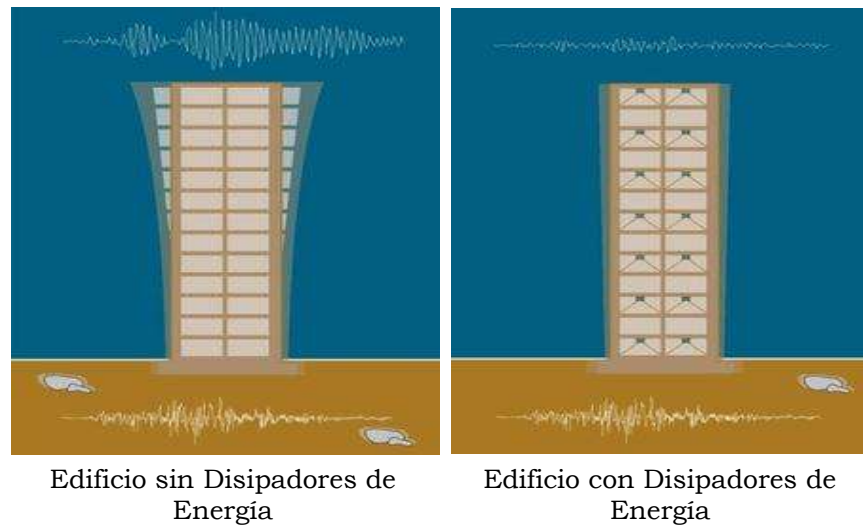


Figura 1.- Comparación de desplazamiento con y sin disipador de energía.

La estructura sin disipadores de energía sobrevive el sismo severo disipando energía en sus elementos principales, los que sufren daño.

En la estructura con disipadores, la energía es absorbida por estos dispositivos reduciendo significativamente las deformaciones y el daño estructural.

Puente

Un puente es una construcción, por lo general artificial, que permite salvar un accidente geográfico o cualquier otro obstáculo físico como un río, un cañón, un valle, un camino, una vía férrea, un cuerpo de agua, o cualquier obstrucción, como se muestra en la *figura 2*. El diseño de cada puente varía dependiendo de su función y la naturaleza del terreno sobre el que el puente es construido.

Su proyecto y su cálculo pertenecen a la ingeniería estructural, siendo numerosos los tipos de diseños que se han aplicado a lo largo de la historia, influidos por los materiales disponibles, las técnicas desarrolladas y las consideraciones económicas, entre otros factores.



Figura 2.- Puente sobre el río Colorado, en Estados Unidos.

Feng et al. (2000) estudiaron el uso de amortiguadores viscoelásticos en las juntas de expansión de puentes, demostrando la eficacia en reducir los desplazamientos relativos en las juntas de expansión sin introducir incrementos significativos de las demandas de ductilidad en las subestructuras. Los efectos que en la respuesta dinámica generan los amortiguadores en dos distintas tipologías de puentes fueron analizados por Forment et al. (2000). También se han realizado estudios en puentes colgantes; Murphy (2000) propuso y evaluó una estrategia de refuerzo para estas estructuras a base de dispositivos amortiguantes distribuidos a lo largo de la superestructura. Una interesante propuesta es la que han presentado Jerónimo y Guerreiro (2002); realizaron un estudio paramétrico de modelos simplificados sometidos a acciones sísmicas congruentes con la norma portuguesa, obteniendo gráficas que permiten al ingeniero proyectista escoger la solución óptima en el diseño sísmico de puentes con amortiguadores.

En la práctica de la ingeniería de puentes, los amortiguadores viscosos se han empleado tanto para reforzar estructuras existentes como para proteger obras nuevas, como por ejemplo los viaductos:

Vernègues (Boitel y De La Fuente, 1998) y de Saint-André (Datry et al., 1998) en Francia, y el puente Cape Girardeu en E. U. A. (Taylor, 2002), entre otros.

Inclusive estos dispositivos se han usado en puentes atirantados para reducir la vibración excesiva de tirantes producida por la ocurrencia simultánea de viento y lluvia (Main y Jones, 2001). Con la finalidad de ilustrar el estado de la práctica en el diseño sísmico de puentes equipados con amortiguadores viscosos.

A continuación dos casos relevantes: los puentes Golden Gate y Rion-Antirion.

Puente Golden Gate



Figura 3.- Puente Golden Gate localizado en San Francisco.

Después del sismo de Loma Prieta en 1989, se llevó a cabo un estudio para la evaluación sísmica y el refuerzo del Golden Gate (*figura 3*), el puente colgante que ha sido símbolo de la ciudad de San Francisco y que fue récord mundial durante casi 30 años con su claro principal de 1,280 m. Entre otros aspectos, una parte importante del proyecto de refuerzo consistió en proponer la instalación de amortiguadores viscosos entre la armadura rigidizante del claro principal y las torres, y entre las armaduras rigidizantes de los claros de compensación y las pilas (Rodríguez e Ingham, 1996); el desplazamiento relativo entre el claro principal y la torre, calculado suponiendo una capacidad ilimitada de deformación a partir de los acelerogramas sintéticos generados para este fin resultó de 1.30 m, lo cual excedía ampliamente los 0.46 m de capacidad de las juntas de expansión en sentido longitudinal.

Los amortiguadores longitudinales se instalarían en las ubicaciones mostradas en la *Figura 4*. Se propusieron dos amortiguadores en cada uno de los cordones de las armaduras entre el claro principal y las torres, entre los claros de compensación y las torres, y entre los claros de compensación y las pilas, con la finalidad de reducir los desplazamientos relativos en las

juntas de dilatación, eliminando la posibilidad de impacto. La instalación de amortiguadores en los extremos de los claros de compensación crea la posibilidad de usar fusibles estructurales entre estos claros y las torres, con la finalidad de desacoplar la vibración de estos dos elementos.

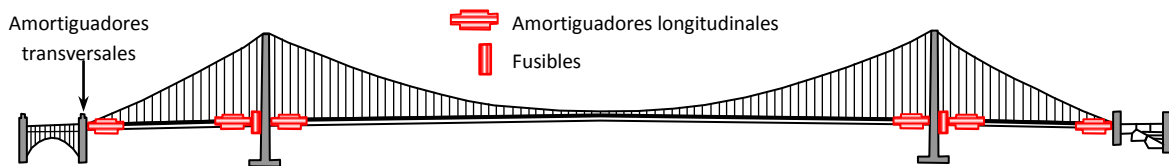


Figura 4.- Localización de amortiguadores en el Puente Golden Gate.

Se consideraron valores del exponente n de 0, 0.5, 1 y 2 (Ec. 1). Para cada exponente se examinaron varios valores de C con la finalidad de definir los amortiguadores óptimos. Este estudio se llevó a cabo evaluando la respuesta sísmica del modelo tridimensional del puente producida por uno de los acelerogramas y considerando un comportamiento lineal de los elementos estructurales.

[Ec. 1]
$$F = C_n \operatorname{sgn}(V) |V|^n$$

La *Figura 5* muestra el desplazamiento relativo máximo entre el claro principal y las torres en función de la fuerza máxima desarrollada en los amortiguadores del claro principal. Cada punto en esta gráfica representa el resultado de un análisis dinámico empleando un par de valores de n y C ; se ajustaron cuatro líneas de tendencia con los puntos disponibles. La tendencia fue clara, resultando más eficientes los amortiguadores con exponente n pequeño; con éstos se logró un cierto desplazamiento relativo máximo para una fuerza menor. Se requeriría de una fuerza en el amortiguador de aproximadamente 6,700 kN por cada cordón de la celosía para reducir el desplazamiento relativo a 0.53 m, para $n=0.5$.

Una reducción mayor de los desplazamientos relativos requeriría de una fuerza bastante mayor, ya que la pendiente de las líneas de tendencia disminuye conforme aumenta la fuerza.

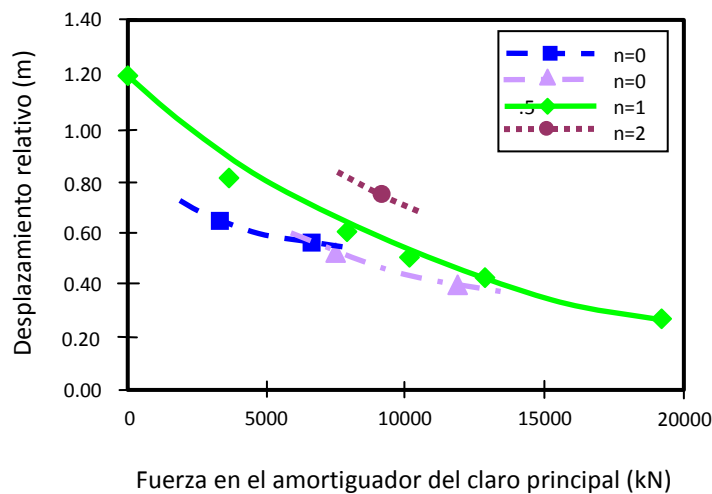


Figura 5.- Desplazamientos relativos en los amortiguadores del claro principal.

Desde el punto de vista de la disipación de energía también resultaron más eficientes los amortiguadores con exponente n pequeño; para una fuerza dada, éstos disiparon más energía que los amortiguadores con un exponente grande. Los amortiguadores longitudinales tendrían otros beneficios secundarios como la reducción de los esfuerzos en las torres debida a la disminución de los desplazamientos longitudinales, y una reducción de las demandas en las estructuras rigidizantes.

Considerando los resultados anteriores, se seleccionó un exponente $n=0.5$ que resultó muy semejante al exponente $n=0$, y amortiguadores con estas características podrían ser suministrados por varios fabricantes. La capacidad óptima por amortiguador rondó alrededor de los 6,700 kN por cordón. Se llevó a cabo un estudio paramétrico más detallado con modelos analíticos no lineales y tres diferentes acelerogramas con la finalidad de evaluar el coeficiente C óptimo con relación a las fuerzas máximas en los amortiguadores y los desplazamientos en las juntas de expansión. El resultado fue escoger dos diferentes coeficientes $C=490 \text{ kN}/(\text{cm}/\text{s})^{0.5}$ y $C=560 \text{ kN}/(\text{cm}/\text{s})^{0.5}$ por cordón. El primero se seleccionó para el claro principal y para el pilar sur, y el segundo para el claro de compensación norte. La máxima fuerza calculada fue de 6,540 kN por cordón, que sería absorbida físicamente por dos amortiguadores.

Puente Rion-Antirion



Figura 6.- Puente Rion-Antirion

El Puente Rion-Antirion (*figura 6*), que cruza el estrecho del mismo nombre en el Golfo de Corintio, Grecia, se localiza en una región de alta sismicidad y grandes movimientos tectónicos generados por fallas locales activas. Se trata de un puente atirantado de varios claros con el tablero continuo y completamente suspendido (en toda su longitud de 2,252 m) de cuatro pilas (con claros de 286m + 560m + 560m + 560m + 286m). En la *Figura 7* se muestra una vista longitudinal en elevación.

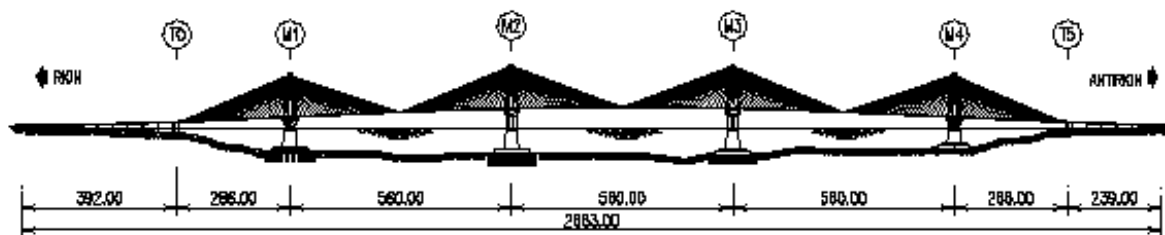


Figura 7.- Vista longitudinal del Puente Rion-Antirion.

El puente está diseñado para soportar eventos sísmicos con una aceleración pico de 0.48g y movimientos tectónicos entre dos pilas consecutivas de hasta 2 m en cualquier dirección.

Esto fue posible gracias al empleo de un sistema de disipación de energía que conecta el tablero con cada pila y limita el movimiento del tablero durante la ocurrencia de un sismo intenso, mientras que disipa energía.

El sistema amortiguante está formado por fusibles y amortiguadores viscosos actuando en paralelo, conectando el tablero con las pilas en dirección transversal.

Los fusibles están diseñados para trabajar como conexiones rígidas para soportar sismos moderados y las altas cargas de viento.

Ante la ocurrencia del sismo de diseño, los fusibles están diseñados para fallar, dejando libres a los amortiguadores viscosos para disipar la energía inducida por el temblor.

En cada pilar se instalarán cuatro amortiguadores viscosos (con una capacidad de 3500 kN de reacción cada uno, una constante de amortiguamiento $C=3000 \text{ kN}/(\text{m/s})^{0.15}$ y un paso de la carrera del pistón de $\pm 1750 \text{ mm}$) y un fusible (con capacidad de 10500 kN), mientras que para las pilas de transición se consideraron dos amortiguadores (con capacidad de 3500 kN de reacción, constante $C=3000 \text{ kN}/(\text{m/s})^{0.15}$ y paso de la carrera del pistón de $\pm 2600 \text{ mm}$) y un fusible (con capacidad de 3400 kN).

La *Figura 8* muestra la configuración general de los cuatro amortiguadores y el fusible en una de las pilas.

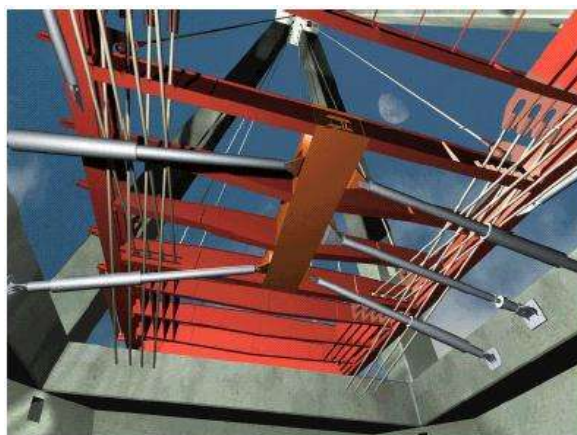


Figura 8.- Sistema amortiguante del Puente Rion-Antirion

El comportamiento y los requerimientos del sistema de disipación fueron evaluados mediante un análisis temporal no lineal de un modelo tridimensional de la estructura.

Sin embargo, las hipótesis de diseño y el comportamiento real de los dispositivos debían ser verificados en prototipos a escala natural.

Actualmente es posible ensayar, en algunos laboratorios, dispositivos como los antes mencionados; en el laboratorio de la Universidad de California en San Diego, se ensayó un prototipo con las mismas características que los requeridos para el puente en cuestión (excepto el paso de la carrera del pistón que fue menor para ajustar con las dimensiones del marco de pruebas del laboratorio), verificándose la ley constitutiva del amortiguador.

Se trata de un espécimen que puede desarrollar una reacción de 3220 kN ante la velocidad de diseño de 1.6 m/s, cuenta con una constante de amortiguamiento $C=3000 \text{ kN}/(\text{m/s})^{0.15}$, un paso de la carrera del pistón de $\pm 900 \text{ mm}$, una longitud de 6930 mm y un peso total de 54 kN. La *Figura 9* muestra el prototipo montado en el marco de pruebas.



Figura 9.- Prototipo montado en el marco de pruebas, U. de California en San Diego

1.3) Objetivo

El objetivo de esta tesis es evaluar el comportamiento sísmico esperado de puentes con amortiguadores, obteniéndose una serie de ayudas de diseño que resumen los resultados y permiten al ingeniero proyectista seleccionar los amortiguadores que permitan limitar el desplazamiento longitudinal del puente a un valor previamente definido por el calculista, sin tener que realizar complejos y largos análisis dinámicos no lineales paso a paso. Basta con un modelo lineal en 3D, que permita obtener las propiedades dinámicas de la estructura.

La investigación se realiza por medio de estudios paramétricos basados en análisis dinámicos no lineal de modelos simplificados de puentes que están sujetos a movimientos sísmicos del terreno registrado en la zona de subducción de la costa del pacífico mexicano, en el cual se encuentran la estaciones sísmicas siguientes:

1.- APAT	6.- CHI1	11.- OCTT	16.- RIML
2.- APAT	7.- COPL	12.- PAPN	17.- SICC
3.- AZIH	8.- LZ01	13.- PARS	18.- SMR2
4.- CALE	9.- 0Z01	14.- PETA	19.- SUCH
5.- CALE	10.- MZ01	15.- PTSU	20.- UNIO

En las estaciones sísmicas se obtienen los registros llamados acelerogramas, los cuales se introducen en un modelo que se elaboro en el programa SAP 2000 con el que se obtienen unos resultados expresados en máximos desplazamientos, velocidad en el tablero, aceleración y fuerza en el amortiguador para cada estación sísmica.

Con los valores máximos obtenidos para cada estación sísmica se sacan los promedios para los distintos periodos y se elaboran las graficas que serán utilizadas como ayudas de diseño por los ingenieros en la elección del amortiguador viscoso más conveniente y que cumplan con las características necesarias para reducir los desplazamientos en las estructuras.

Capítulo 2).- Caracterización.

2.1.- Amortiguadores viscosos.

El amortiguamiento es el proceso mediante el cual los sistemas estructurales disipan y absorben la energía inducida por excitaciones externas. Entre otros efectos, el amortiguamiento reduce la amplitud en la respuesta del sistema y controla el aumento en la energía de deformación.

Un amortiguador viscoso (*figura 10*) es un dispositivo que disipa energía por medio de la aplicación de una fuerza resistente a lo largo de un desplazamiento finito. La reacción en el amortiguador actúa en dirección opuesta a la del movimiento de entrada, y como su funcionamiento se rige por las leyes de la mecánica de fluidos, el valor de la fuerza resistente varía de acuerdo con la velocidad translacional del amortiguador en cualquier instante de tiempo.

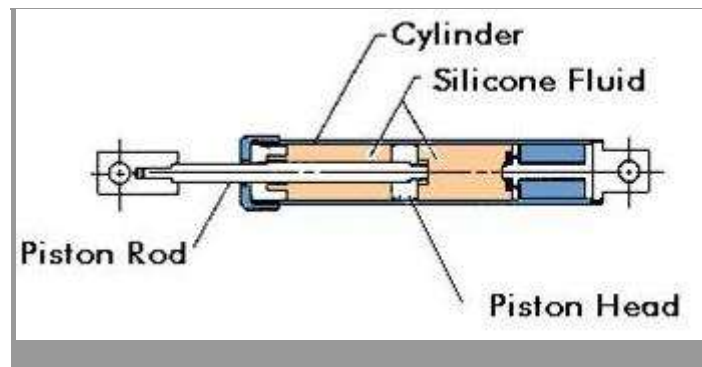


Figura 10.- Esquema típico de un amortiguador viscoso

La energía disipada por el amortiguador es igual al trabajo realizado por la fuerza en el dispositivo a lo largo de su desplazamiento.

El medio de disipación de energía es la transferencia de calor; por ejemplo, la energía mecánica disipada por el amortiguador causa un calentamiento del fluido, y esta energía de calor es transferida al medio por mecanismos de transporte como la convección y la conducción.

La ecuación constitutiva que rige el comportamiento de estos amortiguadores se define de la siguiente manera: $F = C \cdot V^n$ donde F es la fuerza de amortiguamiento, V es la velocidad a través del dispositivo, C es el coeficiente de amortiguamiento, y n es un exponente que define el tipo

de amortiguador. Si el exponente es igual a la unidad, el dispositivo proporciona amortiguamiento lineal; otros valores de n producen el funcionamiento no lineal del aparato, tal como lo muestra la *figura 11*.

La fuerza generada por el amortiguador es debida a la presión diferencial a través de la cabeza del pistón. Al pasar de un lado a otro del compartimiento, el volumen del fluido se reduce como consecuencia del recorrido del pistón y del área de su cabeza. Como el fluido es compresible, dicha reducción en volumen está acompañada de una fuerza restauradora que se desarrolla.

En general, estos dispositivos añaden amortiguamiento viscoso al modo fundamental de la estructura, y aumentan el amortiguamiento y la rigidez en los modos altos, lo cual suprime su contribución en la vibración (Taylor y Constantinou, 1996).

Los amortiguadores viscosos, entre otras ventajas relativas a su funcionamiento, reducen los desplazamientos máximos esperados ante excitaciones dinámicas, absorben la fuerza sísmica y por tanto liberan de esfuerzos a los aparatos de apoyo del puente, y contribuyen a controlar la amplificación dinámica al disminuir el pico de resonancia de la estructura y le permiten recuperar su posición inicial después del sismo, lo cual no puede lograrse utilizando otro tipo de disipadores. Otra ventaja consiste en que, al ser dependiente de la velocidad, la fuerza introducida por un amortiguador viscoso es prácticamente nula para movimientos de baja velocidad, como la expansión térmica en puentes.

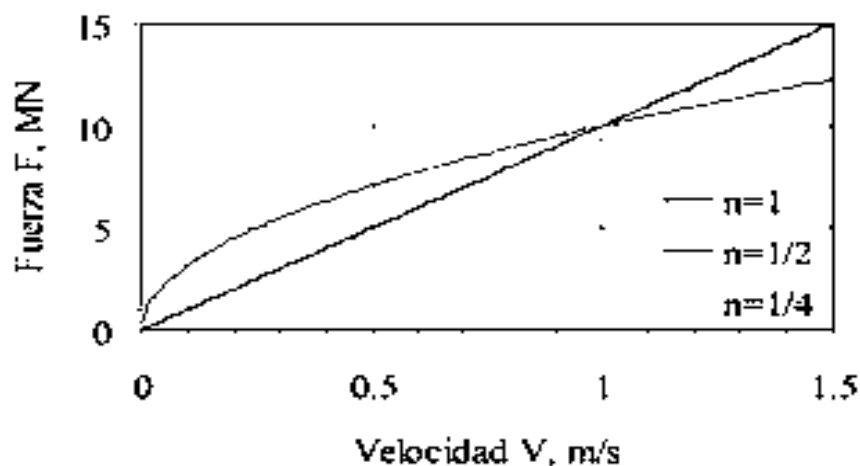


Figura 11.- Diagrama Fuerza-Velocidad para un amortiguador con coeficiente $C= 10 \text{ MN(s/m)}^n$.

Los lazos histeréticos que aparecen en la *figura 12* se calcularon de tal manera que disipasen la misma cantidad de energía por ciclo de movimiento armónico. Aunque los tres ciclos de histéresis encierran la misma área, su forma cambia de una elipse para el amortiguador viscoso lineal ($n = 1$) a un rectángulo para un amortiguador de fricción ($n = 0$).

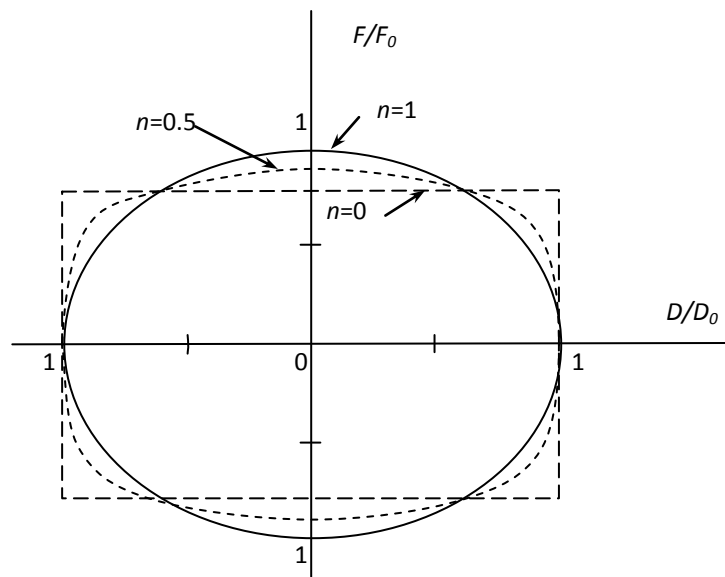


Figura 12.- Curva de Histéresis típica de un amortiguador viscoso

2.2.- Acción sísmica.

Sismicidad en la República Mexicana

El territorio mexicano se encuentra rodeado por cinco placas tectónicas (*figura 13*), La placa de Norteamérica, placa del Pacífico, placa de Cocos, placa de la Rivera y la placa del Caribe.

El movimiento relativo entre estas placas ocasiona uno de los peligros sísmicos y volcánicos más altos del mundo. Esta peligrosidad sísmica llevó al gobierno de Porfirio Díaz a fundar el Servicio Sismológico Nacional (SSN), el 5 de Septiembre de 1910.

La red sísmica operada por el SSN se consolidó entre los años de 1910 y 1923. Esta red, una de las más avanzadas en el mundo, permitió localizar sismos en toda la república con magnitudes mayores o iguales a 6.0. Una magnitud mucho menor a la permitida por la red sísmica mundial, que

podía registrar sismos en cualquier parte del mundo siempre y cuando su magnitud fuese mayor que 6.8.

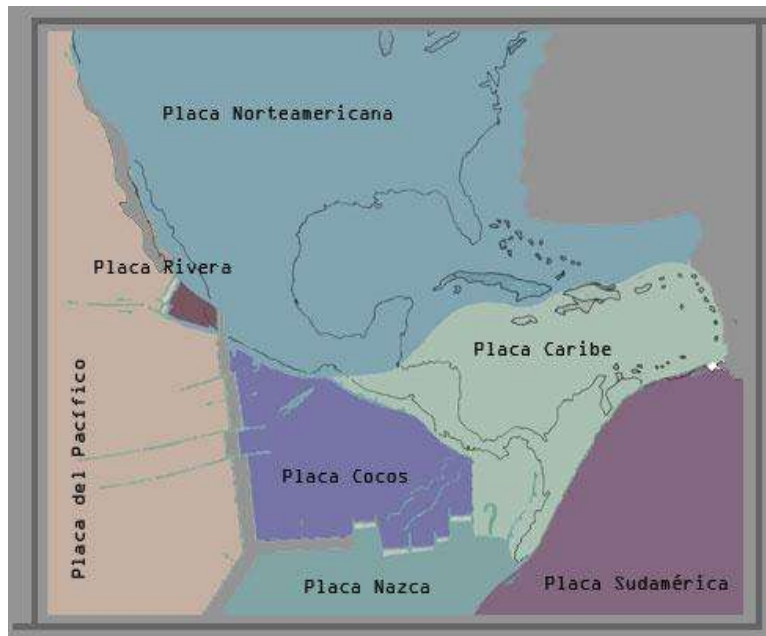


Figura 13.- Placas que se encuentran cerca de la Republica Mexicana

La mayoría de los sismos localizados se concentran a lo largo de las fronteras entre las placas tectónicas, sin embargo, pueden notarse en los acelerogramas que se registran en las estaciones sísmicas unos pocos sismos al interior del continente, en regiones alejadas de estas fronteras tectónicas, principalmente a lo largo de la faja volcánica, donde se concentra la mayor población de México.

El mayor peligro lo presentan los sismos que ocurren a lo largo de las costas del Pacífico, entre las ciudades de Puerto Vallarta y Tapachula. No solo se producen sismos con mayor frecuencia, sino también los mayores sismos registrados en México tienen su ocurrencia entre estas dos poblaciones. Estos sismos, que por su cercanía a las costas representan un grave peligro a las poblaciones costeras, también afectan al Valle de México, como se ha constatado durante los grandes sismos de 1911, 1957, 1979 y 1985. Estos se localizan frente a las costas del Océano Pacífico y son producto de la subducción de la placa oceánica bajo la placa continental.

Los epicentros de la mayor parte de los terremotos de gran magnitud (Mayores de 7, por ejemplo) que ocasionan grandes daños, se ubican en la costa del Pacífico, a lo largo de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero,

Oaxaca y Chiapas (*figura 14*). Sin embargo, también han ocurrido grandes sismos en el centro y el sur de Veracruz y Puebla, norte y centro de Oaxaca y Chiapas, Estado de México y la península de Baja California, especialmente en la zona fronteriza con los Estados Unidos de Norte América.

En los Estados de Zacatecas, Durango, Sinaloa y Sonora, la sismicidad es también más escasa; a fines del siglo XIX, en este último Estado ocurrió un sismo de magnitud 7.3. En los Estados restantes no se han originado movimientos sísmicos de importancia, aunque algunos estados como Nayarit, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Tlaxcala y Tabasco, llegan a ser afectados por los sismos que se originan en otras regiones.

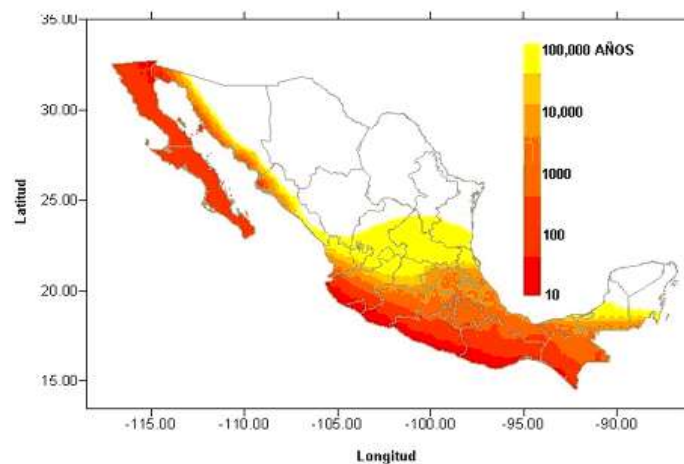


Figura 14: Mapa de Peligro Sísmico de México.

Clasificación de fallas de acuerdo a su movimiento

Las fallas se clasifican en tres tipos según sea la dirección del desplazamiento de las rocas que cortan:

- ✚ Falla Inversa
- ✚ Falla Normal
- ✚ Falla de Desgarre

Los tipos de fallas que se presentan en la República Mexicana son regularmente Fallas por Transformación, Fallas de Interplaca, Fallas de Subducción y Falla Normal, estos tipos de fallamiento los podemos ubicar en distintas partes de la República principalmente en las zonas costeras que es donde se encuentran los límites de las placas tectónicas que rodean a nuestro país. El continuo movimiento de las placas antes mencionadas da origen a sismos con magnitudes mayores a los 7 grados en escala de

Richter. Los cuales han provocado grandes movimientos de la Tierra denominando a estos movimientos, como temblores, los cuales han ocurrido con profundidades de entre 30 y 100 kilómetros.

Los registros sísmicos que se emplearán en el desarrollo del presente trabajo corresponden a la zona del Pacífico entre los estados de Michoacán, Colima y Guerrero. Se seleccionaron en total 20 registros sísmicos de la Base Mexicana de Sismos Fuertes, que se encuentran en dichos estados, de las cuales se presentan las principales características en la *tabla 1*.

Tabla 1 Registros sísmicos obtenidos de la Base Mexicana de Sismos Fuertes para las zonas de mayor actividad sísmica en los estados de Michoacán, Colima y Guerrero.

CLAVE	FECHA	T. SUELO	MAGNITUD	ACELARACIONES MAXIMAX (GAL)		UBICACIÓN
APAT7903	04/03/1998	S.N	7	S 00 E	50.43	APATZINGAN MICH. A DIEZ CUADRAS DEL ZOCCALO
				V	-24.806	
				N 90 E	-62.217	
APAT8509	15/03/1998	S.N	6.8	S 00 E	-68.74	APATZINGAN MICH. A DIEZ CUADRAS DEL ZOCCALO
				V	-44.62	
				N 90 E	81.282	
AZIH8509	02/03/1998	ROCA	6.8	V	-100.09	AEREO PUERTO INTERNACIONAL DE ZIHUATANEJO
				S 90 W	-153.93	
				S 00 W	-98.62	
CALE8509	02/03/1998	ROCA	6.8	S 90 E	-140.68	CALETA DE CAMPOS. MICH. ESC. SEC. TEC. 68
				V	88.45	
				S 00 E	-139.73	
CALE9701	16/01/1997	ROCA	6.5	S 90 E	396.21	CALETA DE CAMPOS. MICH. ESC. SEC. TEC. 68
				V	413.94	
				S 00 E	-350.27	
CHI18501	06/05/1998	ROCA	6.8	N 00 E	-194	A TRES CUADRAS DEL ZOCCALO DE CHILPANCINGO
				V	84.47	
				N 90W	187.33	
CHII9509	14/09/1995	ROCA	6.4	N 00 E	-26.31	CEMENTERIO DE AUTOMOVILES CARRETERA ACAPULCO-MEXICO
				N 90W	19.10	
				V	-18.55	
COPL9310	09/04/1996	ROCA	6.2	V	-125.04	ESC. PRIMARIA FEDERAL OTILIO MONTAÑO, COPALA
				N 90 E	-274.03	
				N 00 E	-211.53	
LZ019510	15/03/1996	JARDIN	7.3	N 45 E	10.86	LAZARO CARDENAS MICH. SICARTSA TERRENO JARDIN
				V	4.2	
				N 45 W	13.29	
LZ019701	20/03/1998	JARDIN	6.9	N 90 E	196.74	LAZARO CARDENAS MICH. SICARTSA TERRENO JARDIN
				V	193.47	
				N 00 E	189.74	

Cont. Tabla 1

CLAVE	FECHA	TERRENO	MAGNITUD	ACELARACIONES MAXIMAX (GAL)		UBICACIÓN
MZ019510	15/03/1996	CAMPO LIBRE	6.5	N 00 E	387.62	TERMO ELECTRICA MANZANILLO SUBESTACION
				V	302.86	
				N 90 E	387.13	
OCTT8904	23/03/1998	ROCA	6.3	V	195.74	ESC. CREPE CARRETERA CHILPANCINGO-ACAPULCO
				N 90 E	-201.16	
				N 00 E	126.54	
PAPN8509	02/03/1998	ROCA	6.3	V	171.62	ESC. PRIM. SOR JUANA INES DE LA CRUZ, GUERRERO
				S 90 W	-219.83	
				S 00 W	242.69	
PARS8509	01/04/1998	ROCA	6.3	S 90 E	-413.78	EL PARAISO EN GUERRERO
				V	169.63	
				S 00 E	-625.78	
PETA9607	28/10/1996	ROCA	5.7	S 90 E	135.03	BODEGA DE MATERIALES PETATLAN, GUERRERO
				V	123.24	
				S 00 E	-183.45	
PTSU9701	20/01/1997	CONG. LUTITAS	6.5	V	-170.35	4 KM DEL PUERTO LAZARO CARDENAS
				N 90 E	221.07	
				N 00 E	-311.04	
RIML9701	01/01/1997	ARCILLA	6.9	N 00 E	4.95	MORELIA, MICH. ESC. LUZ ALOU
				V	4.06	
				N 90 E	6.37	
SICC7903	04/03/1998	S.N	7	N 00 E	264.28	L.C. MICH. SICARTSA 100M DE PLANTA ACERACION
				V	-66.79	
				N 90 W	307.21	
SMR28904	25/03/1998	ROCA	6.3	S 90 E	127.29	ESC. PRIM. A 7 KM DE SAN MARCOS, GUERRERO
				V	132.07	
				S 00 E	-175.14	
SUCH8509	12/03/1998	ROCA	6.8	V	49.623	TALLER MECANICO EN SUCHIL, GERRREO
				S 90 W	-81.44	
				S 00 W	-103.12	

Para realizar los análisis paso a paso de las ayudas de diseño que se presentan en los capítulos 3 y 4, se seleccionó, para cada uno de los eventos presentados en la *tabla 1*, el registro en la dirección horizontal que presenta la mayor aceleración del terreno. Posteriormente, los acelerogramas se escalaron linealmente a 500 gals (*tabla 2*), que tiende a

ser la aceleración máxima del terreno prevista para suelo duro (tipo I) en la zona de mayor actividad sísmica del país, de acuerdo con el nuevo “MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES DISEÑO POR SISMO” (CFE, 2008).

Para $T=0$ la Seudo aceleración $S_a=0.5$

Para el escalamiento se utilizara la siguiente expresión

$$Fe = \frac{Sa}{A_{max}} \quad [2.0]$$

Donde: Fe _____ Factor de escala

S_a _____ Seudo aceleración (para nuestro caso $S_a=500$ gals)

A_{max} ____ Aceleración máxima absoluta presente en el registro

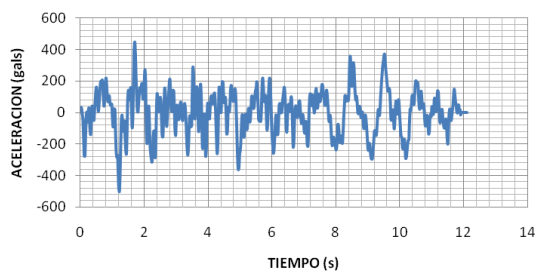
SISMO	FAC. DE ESCALAMIENTO
APAT7903	8.036
APAT8509	6.151
AZIH8509	3.248
CALE8509.	3.554
CALE9701	1.262
CHI18509	2.669
COPL9310	1.825
LZ019510	37.622
LZ019701	2.541
MZ019510	1.290

SISMO	FAC. DE ESCALAMIENTO
OCTT8904	2.486
PAPN8509	2.060
PARS8509	1.055
PETA9607	2.726
PTSU9701	1.608
RIML9701	78.493
SICC7903	1.628
SMR28904	2.855
SUCH8509	4.849
UNIO8509	3.025

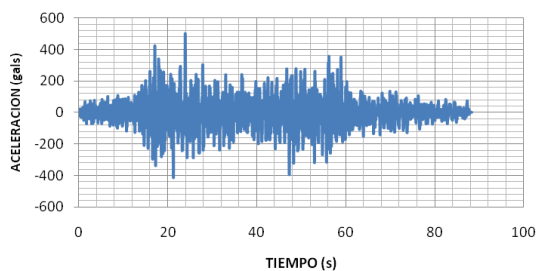
Tabla 2.- Factores de escala que se emplearán en los registros sísmicos para el desarrollo de los análisis paso a paso.

A continuación se presentan los acelerogramas escalados de los 20 eventos sísmicos a utilizar en el estudio paramétrico del capítulo 3 y 4, *figura 15*.

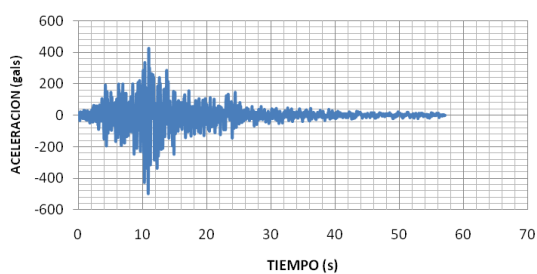
APAT7903



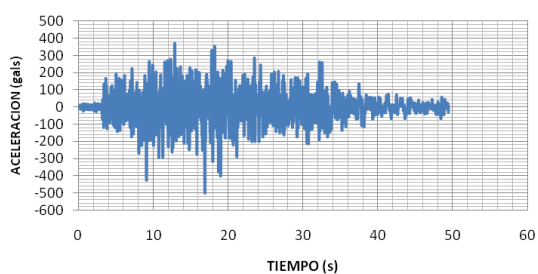
APAT8509



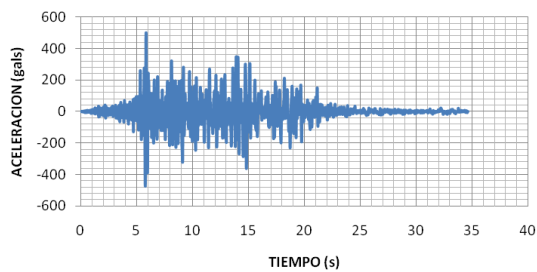
AZIH8509



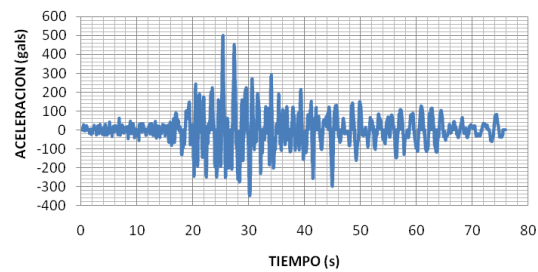
CALE8509.



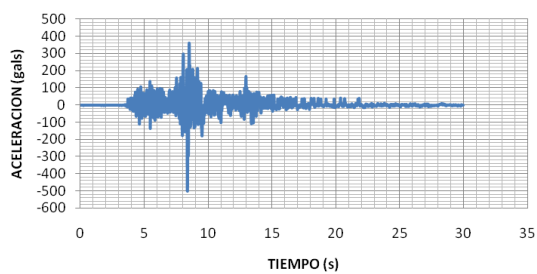
CALE9701



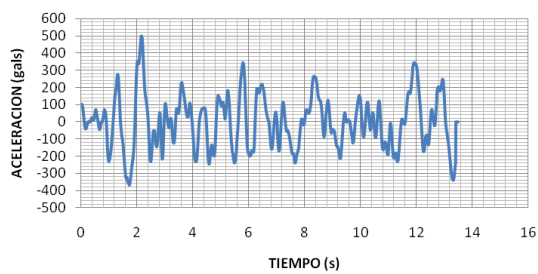
CHI18509



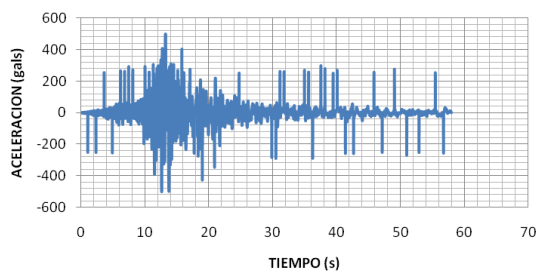
COPL9310



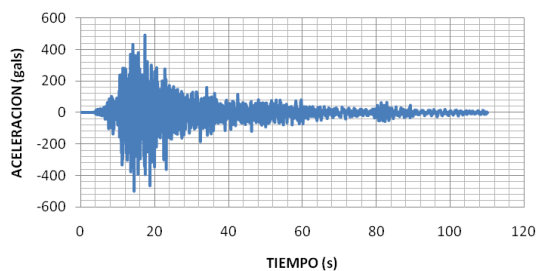
LZ019510



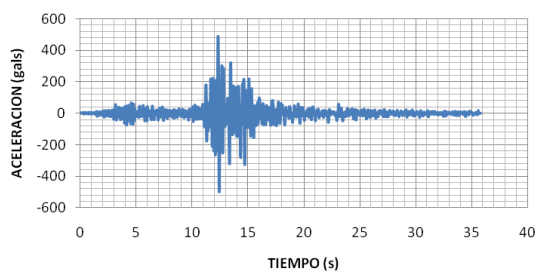
LZ019701



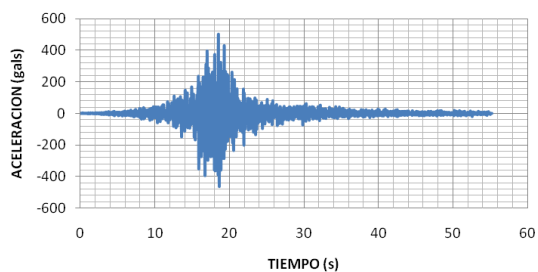
MZ019510



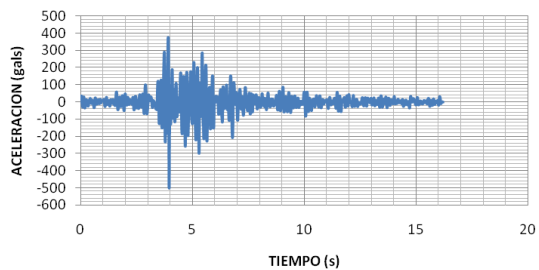
OCTT8904



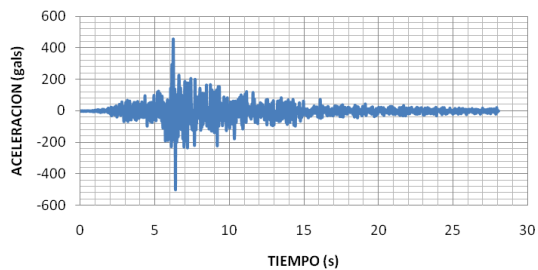
PAPN8509



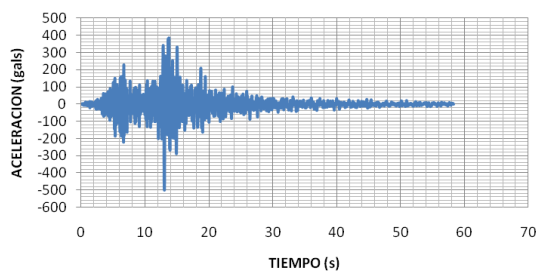
PARS8509



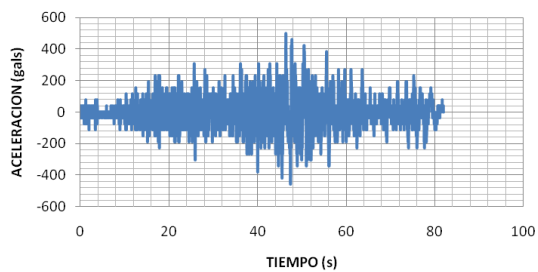
PETA9607



PTSU9701



RIML9701



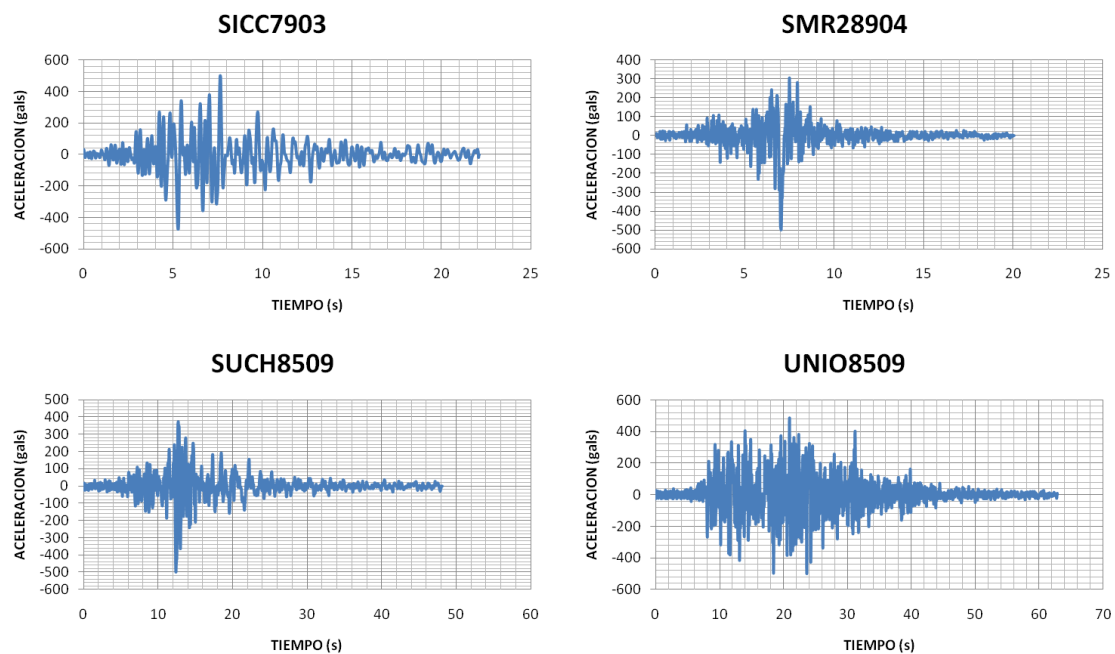


Figura 15.- Acelerogramas escalados de los 20 eventos sísmicos para el estudio paramétrico.

Capítulo 3).- Estudio paramétrico para sistemas de un grado de libertad.

3.1.- Modelo analítico.

La metodología a desarrollarse será la utilizada por Jerónimo y Guerreiro (2002). La evaluación sísmica de puentes se basa en un estudio paramétrico de análisis dinámico no lineal de modelos simplificados de puentes. Los resultados serán analizados en términos de máximo desplazamiento, velocidad y aceleración del tablero así como la máxima fuerza en el amortiguador y la subestructura.

El estudio paramétrico se realizará por medio de un modelo simplificado, que consiste en un sistema de un grado de libertad con *masa unitaria* el cual representará el desplazamiento longitudinal de la superestructura, las propiedades modelo serán asignadas de acuerdo a los requerimientos del estudio.

Ecuaciones empleadas para obtener las dimensiones de la columna utilizada en el modelo simplificado que se utilizara en la elaboración de las ayudas de diseño.

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad \text{Periodo (s)} \quad [3.11]$$

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad \text{Frecuencia (hrz)} \quad [3.12]$$

$$K = \frac{3EI}{L^3} \quad \text{Rigidez (kN/m)} \quad [3.13]$$

$$I = \frac{BH^3}{12} \quad \text{Momento de inercia de una sección rectangular (m⁴)} [3.14]$$

Proceso para obtener la dimensión de la columna (sección cuadrada)

Como $B = H$ por ser una sección cuadrada por lo que:

$$I = \frac{B^4}{12}$$

Sustituyendo la inercia (ecuación 3.14) en la rigidez (ecuación 3.13)

$$K = \frac{3 E \left(\frac{B^4}{12}\right)}{L^3} \quad \text{Por lo que} \quad K = \frac{E B^4}{4L^3}$$

Sustituyendo la frecuencia (ecuación 3.12) en el periodo (ecuación 3.11)

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{K}{m}}}$$

$$\sqrt{\frac{K}{m}} = \frac{2\pi}{T}$$

$$\frac{K}{m} = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2$$

$$\frac{E B^4}{4L^3} = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 m$$

$$B = \sqrt[4]{\frac{4L^3 \left(\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 m\right)}{E}}$$

Para el desarrollo se tomaron los siguientes datos como constantes:

$$M = 1.00 \quad \text{kN}$$

$$\text{Longitud de la pila} = 1.00 \quad \text{m}$$

$$f_c = 3.4323 \quad \text{kN} / \text{m}^2$$

$$E = 14000 \sqrt{f_c} \quad \text{Dato obtenido NTC del DF cap. 1.5.1 pág. 104}$$

Las dimensiones se obtendrán para los siguientes periodos:

$$T = 0.50 \text{ s.}$$

$$T = 0.75 \text{ s.}$$

$$T = 1.00 \text{ s.}$$

$$T = 1.25 \text{ s.}$$

$$T = 1.50 \text{ s.}$$

$$T = 1.75 \text{ s.}$$

$$T = 2.00 \text{ s.}$$

Por lo que se procederá a calcular dichas dimensiones (tabla3).

$$\begin{aligned}
 F^C &= \frac{3.4323}{1.00} \text{ kN/m}^2 \\
 L &= \frac{1.00}{1.00} \text{ m} \\
 M &= \frac{1.00}{2.59E+08} \text{ kN-s}^2/\text{m} \\
 E &= \frac{2.59E+08}{0.05} \text{ kN/m}^2 \\
 \xi &= \frac{0.05}{0.05}
 \end{aligned}$$

PERIODOS (s)	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00
DIMENSIO (Cm)	3.95	3.23	2.79	2.5	2.28	2.11	1.98

Tabla 3.- Dimensiones de columna en función del periodo.

3.2.- Respuesta para periodos de 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00 segundos.

En la elaboración del presente estudio se seleccionaron los amortiguadores viscosos como dispositivos disipadores de energía, los amortiguadores se modelan en el programa **SAP 2000** por medio de los elementos link, en particular los elementos llamados *damper*.

A los elementos damper se le pueden especificar propiedades en cada uno de los seis grados de libertad. El elemento está basado en el modelo de Maxwell (*figura 16*), es decir permite simular el comportamiento de dispositivos viscoelásticos compuesto por un amortiguador y un resorte conectados en serie. La ley constitutiva del elemento está dada por

$$f = kd_k = cd_c^n$$

En donde k es la rigidez elástica del elemento (constante del amortiguador), c coeficiente de amortiguamiento, n es un exponente positivo que caracteriza la no linealidad del amortiguador, d_k es la deformación a través del resorte y d_c es la tasa de deformación (velocidad) a través del amortiguador. La suma de la deformaciones del resorte y del amortiguador proporcionan la deformación total interna.

$$d = d_k + d_c$$

Para lograr el comportamiento puramente viscoso, la deformación del resorte se hace despreciable si este se hace suficiente mente rígido.

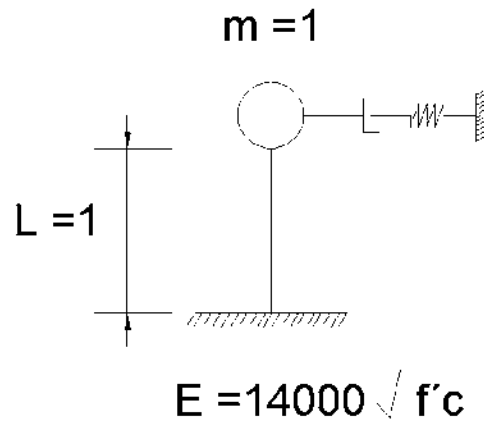


Figura 16.- Sistema de un grado de libertad

La forma en que se colocaran los amortiguadores será en los extremos del puente uniendo el tablero con los apoyos, estos elementos se pueden utilizar en conjunto con otro tipo de dispositivos tal y como se observa en la figura 17.

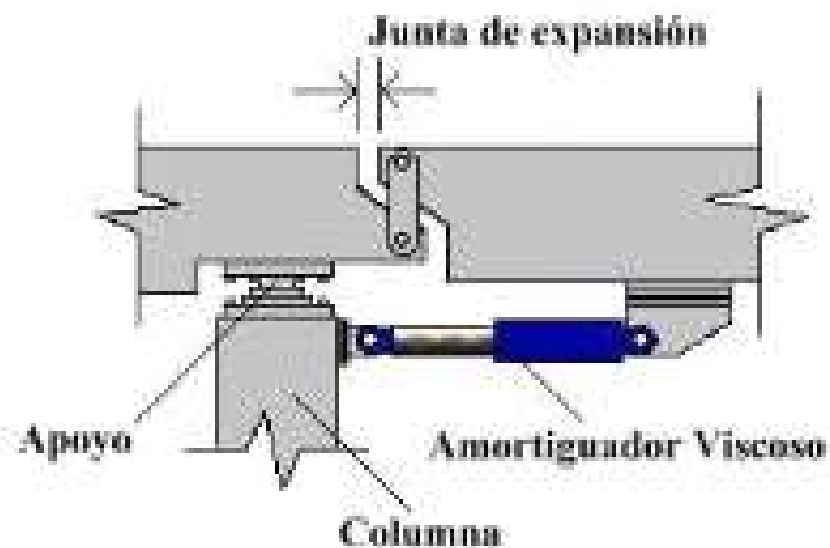


Figura 17.- Colocación del amortiguador del tablero con una pila

Los análisis del estudio paramétrico se realizarán utilizando el programa SAP 2000 v11, los análisis realizados en el sistema de un grado de libertad utilizando el sistema de disipación de energía “amortiguadores viscosos”, obtenemos la respuesta ante cada acción sísmica obteniendo resultados tanto en función de aceleraciones, desplazamientos, fuerzas y velocidades.

Con la finalidad de mostrar de manera más detallada el procedimiento seguido para cada alternativa a continuación se muestran los máximos resultados obtenidos en función de aceleración, desplazamiento, fuerza y velocidad al proponer un tipo de amortiguador viscoso en un sistema de un grado de libertad las cuales corresponden a un solo evento sísmico (APAT7903), para el cual se utilizó una constante de amortiguamiento de $4.0 \text{ MN}/(\text{m/s})^n$ y un exponente de 0.5, y los periodos de 0.50, 0.75, 1.0, 1.25, 1.50, 1.75 y 2.0 segundos.

Respuesta para una estructura con un periodo de 0.50s colocando un amortiguador viscoso, el cual tiene una constante de amortiguamiento de 4.0 kN/(m/s)ⁿ y un exponente n= 0.5 para la acción sísmica APAT7903.

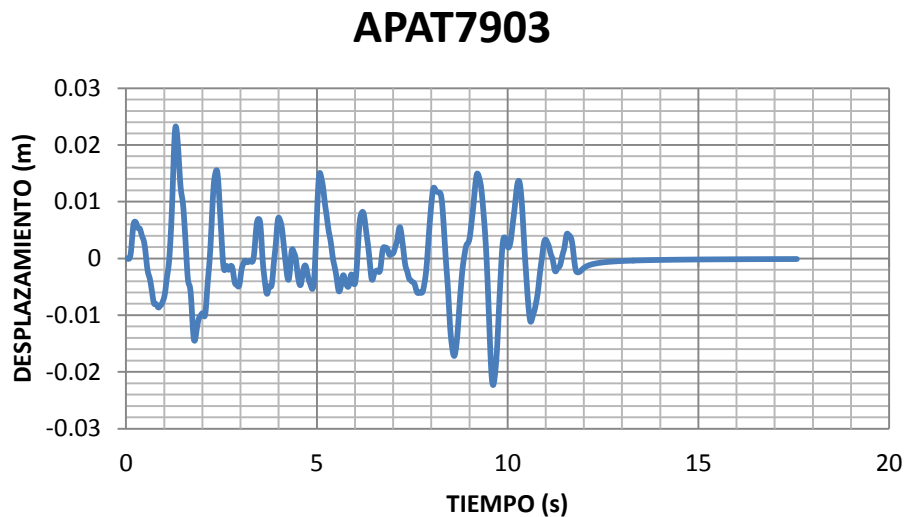


Figura 18.- Historia de desplazamientos para la acción sísmica APAT7903 con amortiguador, $C = 4.0 \text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^n$ y $n = 0.5$.

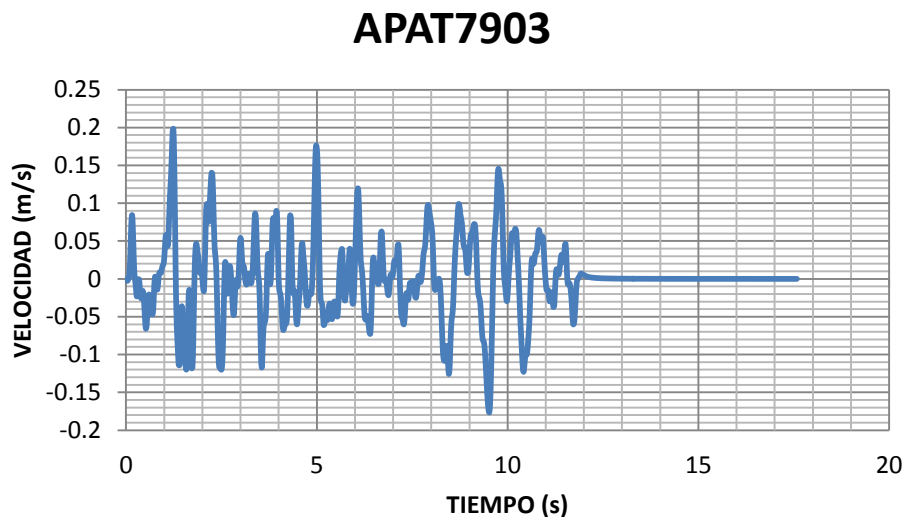


Figura 19.- Historia de velocidades para la acción sísmica APAT7903 con amortiguador, $C = 4.0 \text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^n$ y $n = 0.5$.

APAT7903

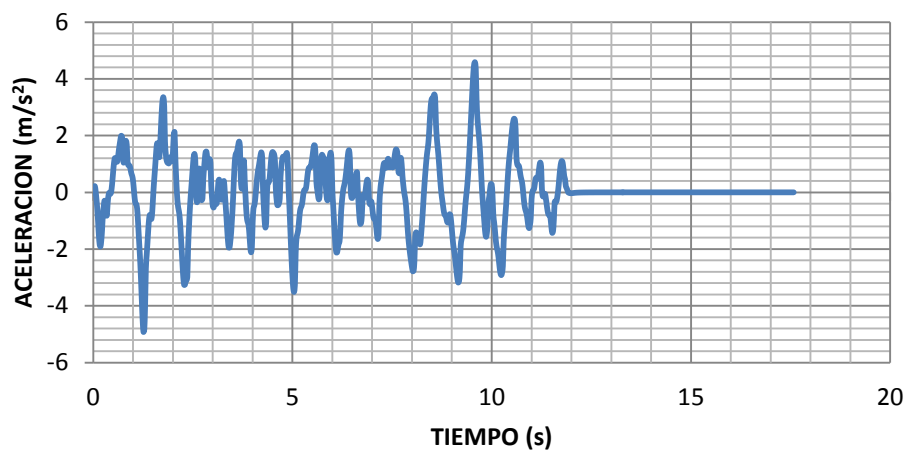


Figura 20.- Historia de aceleraciones para la acción sísmica APAT7903 con amortiguador, $C = 4.0 \text{ kN}/(\text{m/s})^n$ y $n = 0.5$.

APAT7903

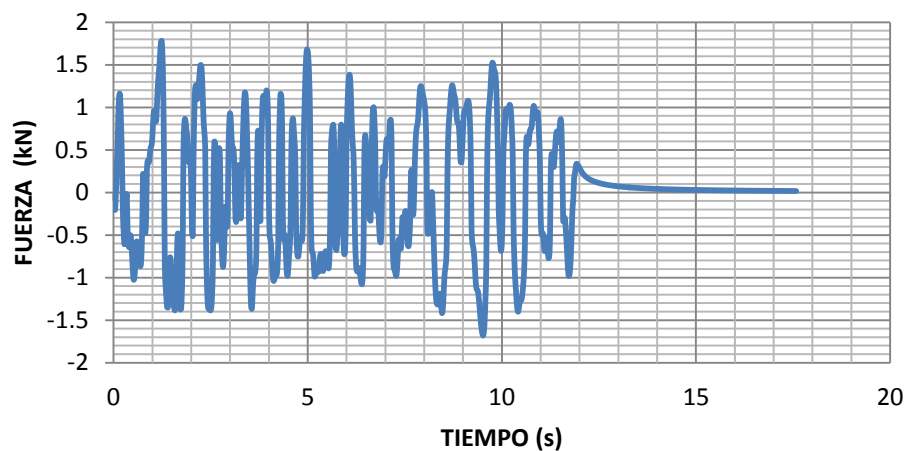


Figura 21.- Historia de fuerzas para la acción sísmica APAT7903 con amortiguador, $C = 4.0 \text{ kN}/(\text{m/s})^n$ y $n = 0.5$.

Respuesta para una estructura con un periodo de 0.75s colocando un amortiguador viscoso, el cual tiene una constante de amortiguamiento de $4.0 \text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^n$ y un exponente $n=0.5$ para la acción sísmica APAT7903.

APAT7903

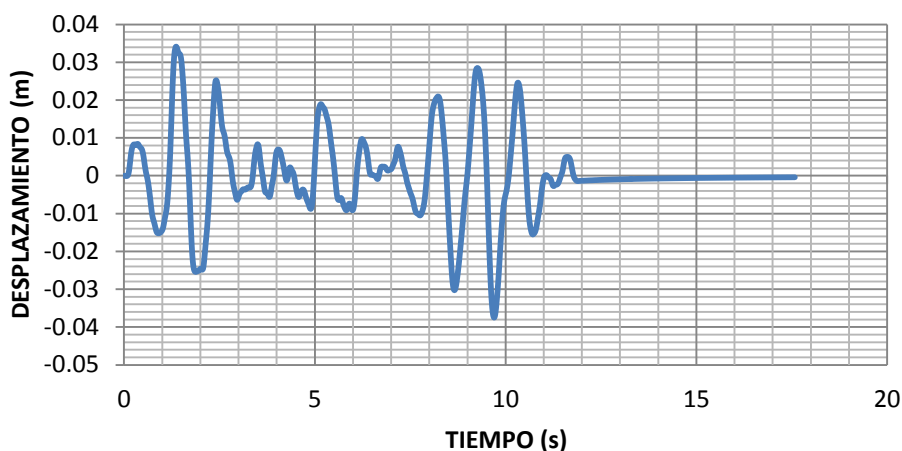


Figura 22.- Historia de desplazamientos para la acción sísmica APAT7903 con amortiguador, $C=4.0 \text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^n$ y $n=0.5$.

APAT7903

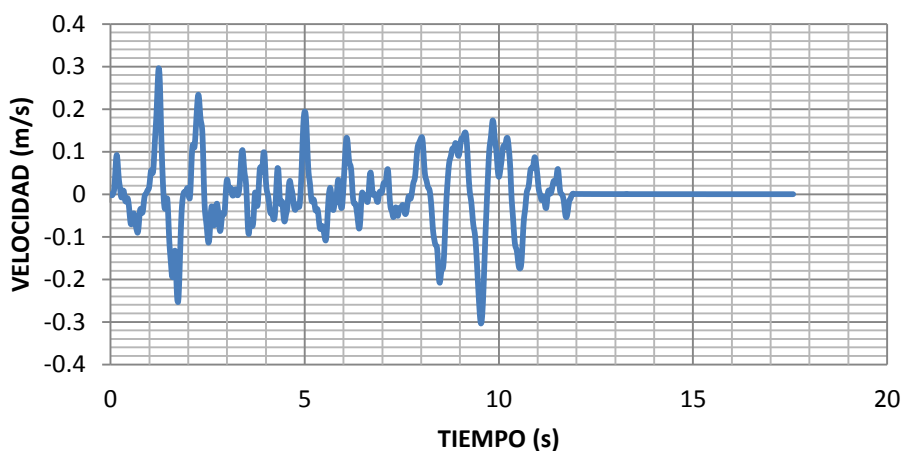


Figura 23.- Historia de velocidades para la acción sísmica APAT7903 con amortiguador, $C=4.0 \text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^n$ y $n=0.5$.

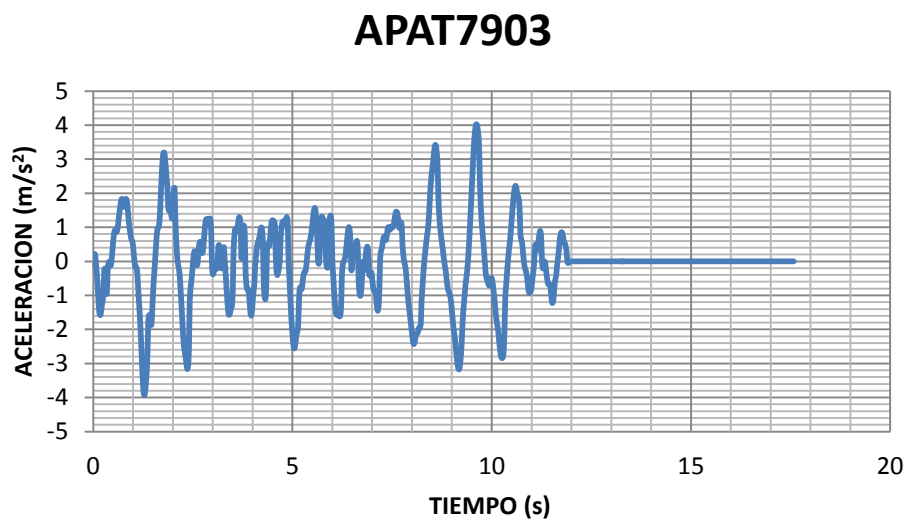


Figura 24.- Historia de aceleraciones para la acción sísmica APAT7903 con amortiguador, $C = 4.0 \text{ kN}/(\text{m/s})^n$ y $n = 0.5$.

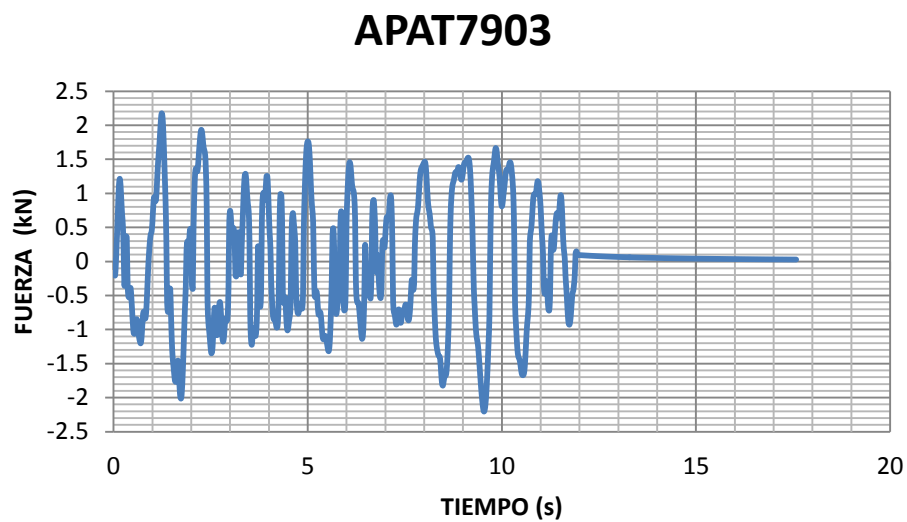


Figura 25.- Historia de fuerzas para la acción sísmica APAT7903 con amortiguador, $C = 4.0 \text{ kN}/(\text{m/s})^n$ y $n = 0.5$.

Respuesta para una estructura con un periodo de 1.00s colocando un amortiguador viscoso, el cual tiene una constante de amortiguamiento de 4.0 kN/(m/s)ⁿ y un exponente n= 0.5 para la acción sísmica APAT7903.

APAT7903

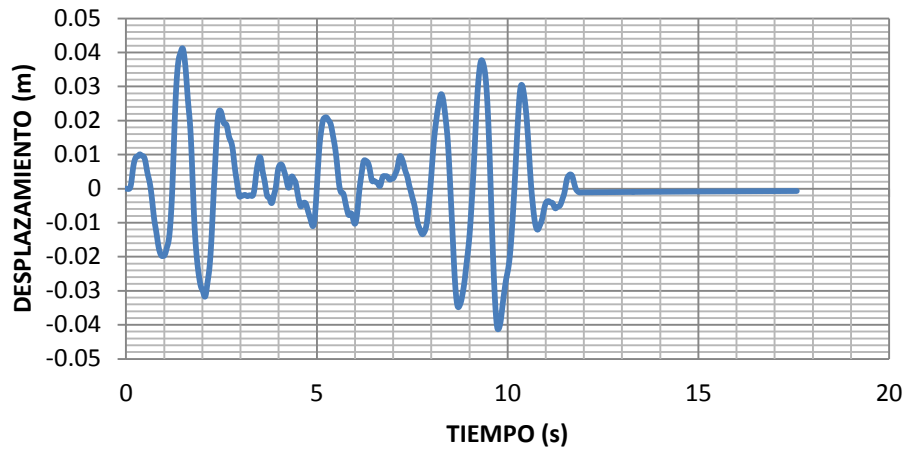


Figura 26.- Historia de desplazamientos para la acción sísmica APAT7903 con amortiguador, $C = 4.0 \text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^n$ y $n = 0.5$.

APAT7903

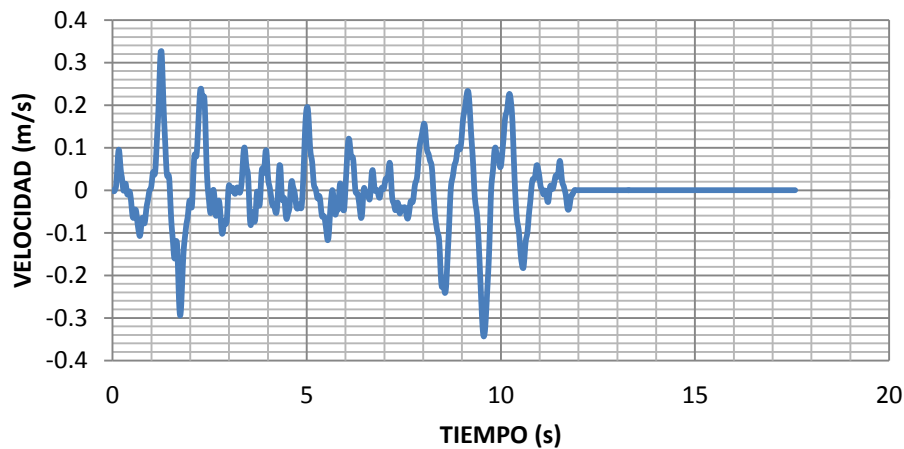


Figura 27.- Historia de velocidades para la acción sísmica APAT7903 con amortiguador, $C = 4.0 \text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^n$ y $n = 0.5$.

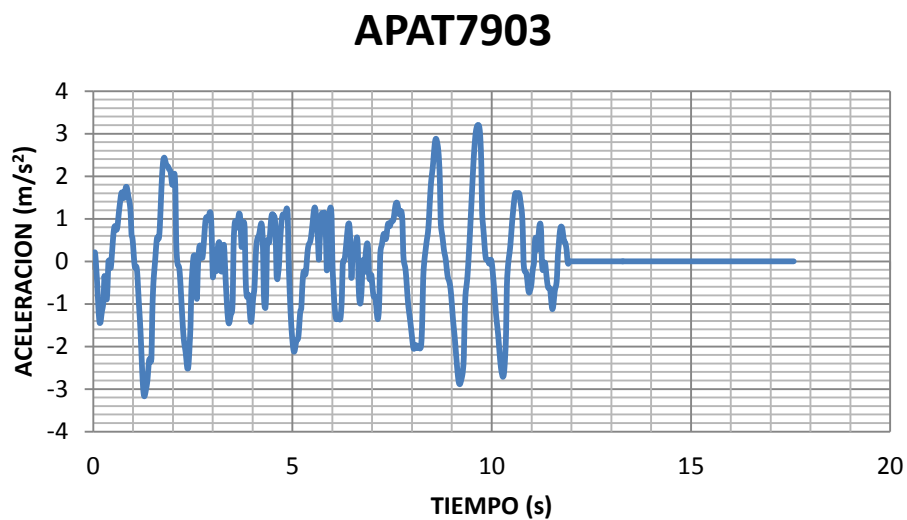


Figura 28.- Historia de aceleraciones para la acción sísmica APAT7903 con amortiguador, $C = 4.0 \text{ kN}/(\text{m/s})^n$ y $n = 0.5$.

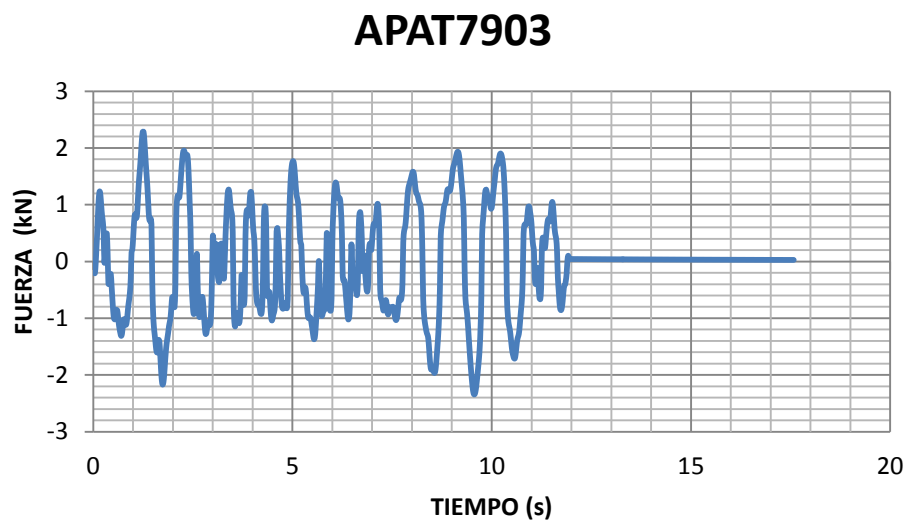


Figura 29.- Historia de fuerzas para la acción sísmica APAT7903 con amortiguador, $C = 4.0 \text{ kN}/(\text{m/s})^n$ y $n = 0.5$.

Respuesta para una estructura con un periodo de 1.25s colocando un amortiguador viscoso, el cual tiene una constante de amortiguamiento de $4.0 \text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^n$ y un exponente $n= 0.5$ para la acción sísmica APAT7903.

APAT7903

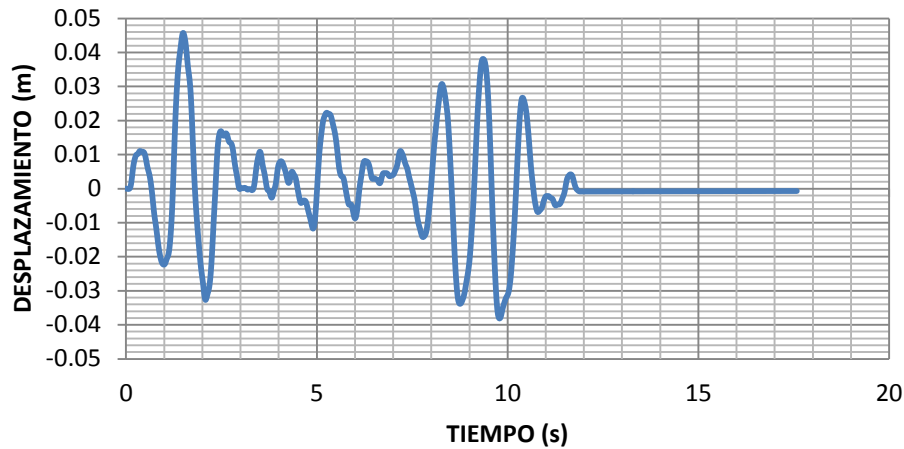


Figura 30.- Historia de desplazamientos para la acción sísmica APAT7903 con amortiguador, $C= 4.0 \text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^n$ y $n= 0.5$.

APAT7903

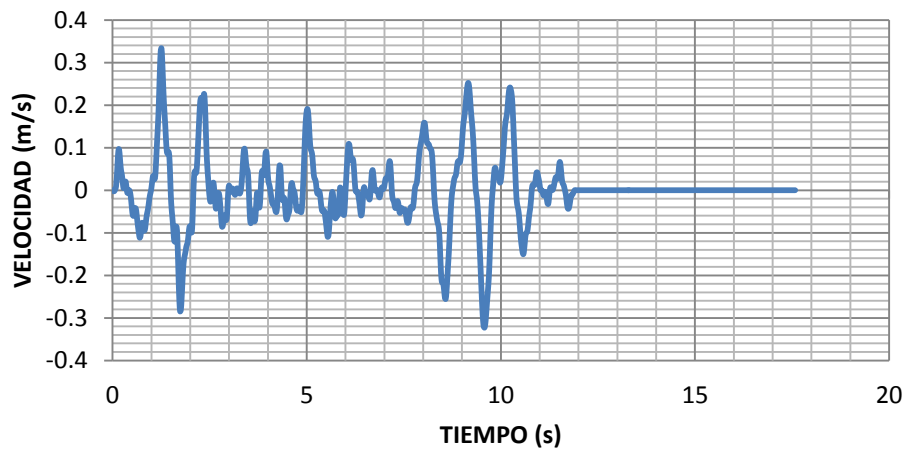


Figura 31.- Historia de velocidades para la acción sísmica APAT7903 con amortiguador, $C= 4.0 \text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^n$ y $n= 0.5$.

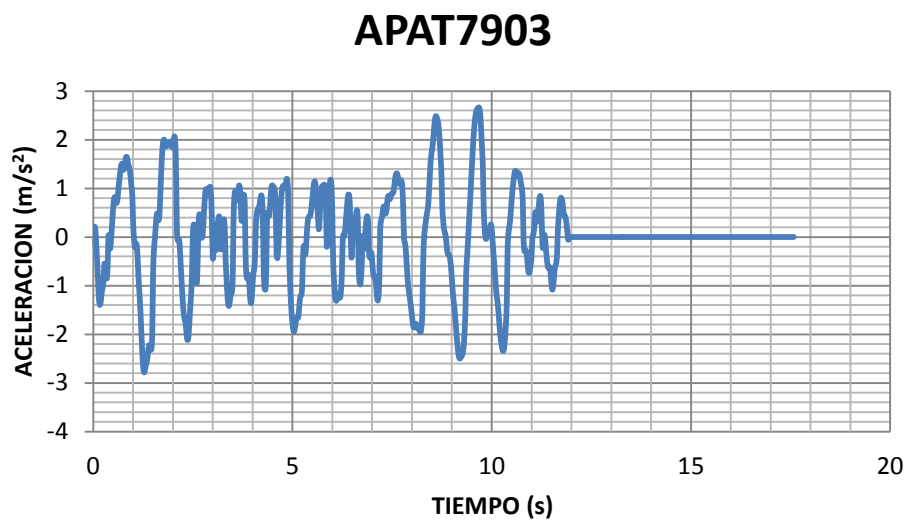


Figura 32.- Historia de aceleraciones para la acción sísmica APAT7903 con amortiguador, $C = 4.0 \text{ kN}/(\text{m/s})^n$ y $n = 0.5$.

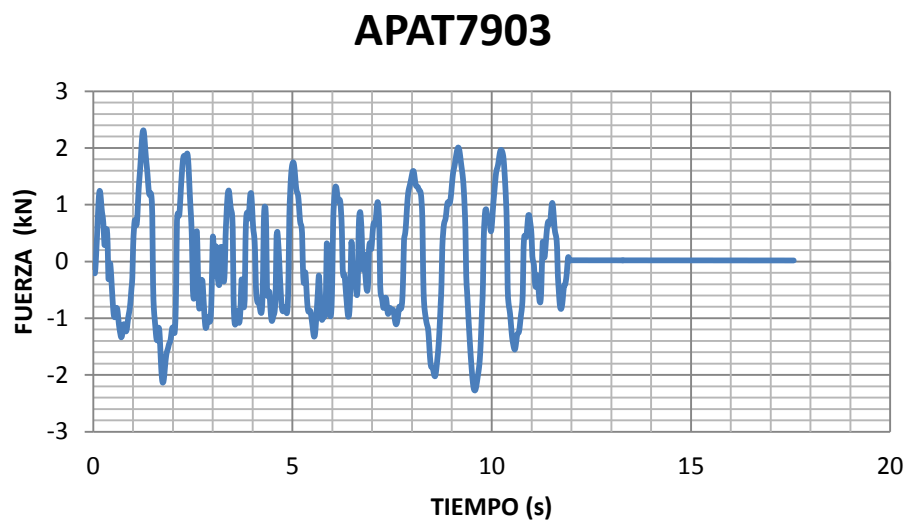


Figura 33.- Historia de fuerzas para la acción sísmica APAT7903 con amortiguador, $C = 4.0 \text{ kN}/(\text{m/s})^n$ y $n = 0.5$.

Respuesta para una estructura con un periodo de 1.50s colocando un amortiguador viscoso, el cual tiene una constante de amortiguamiento de 4.0 kN/(m/s)ⁿ y un exponente n= 0.5 para la acción sísmica APAT7903.

APAT7903

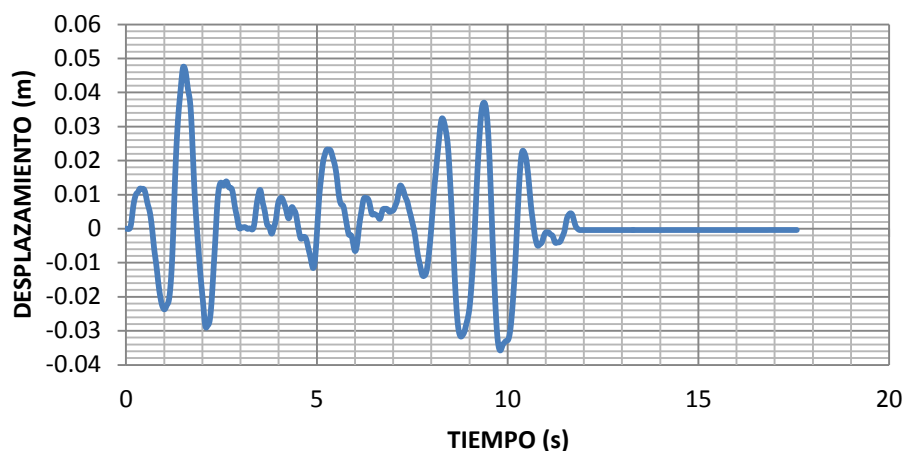


Figura 34.- Historia de desplazamientos para la acción sísmica APAT7903 con amortiguador, $C = 4.0 \text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^n$ y $n = 0.5$.

APAT7903

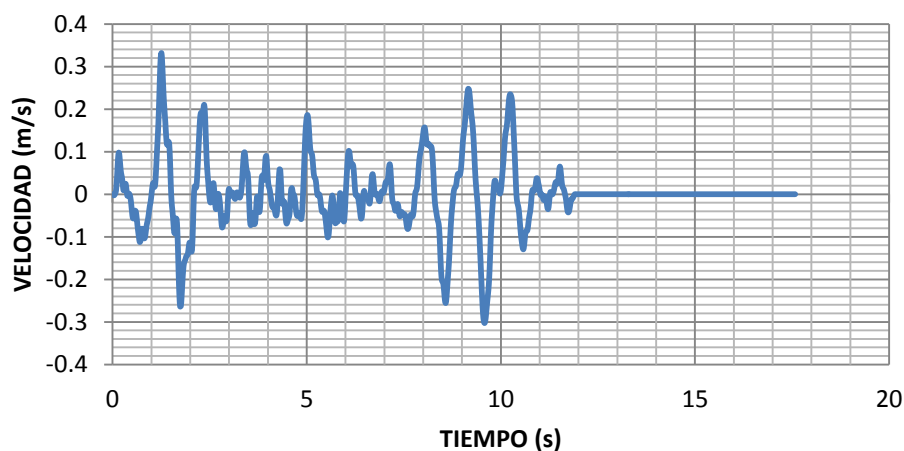


Figura 35.- Historia de velocidades para la acción sísmica APAT7903 con amortiguador, $C = 4.0 \text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^n$ y $n = 0.5$.

APAT7903

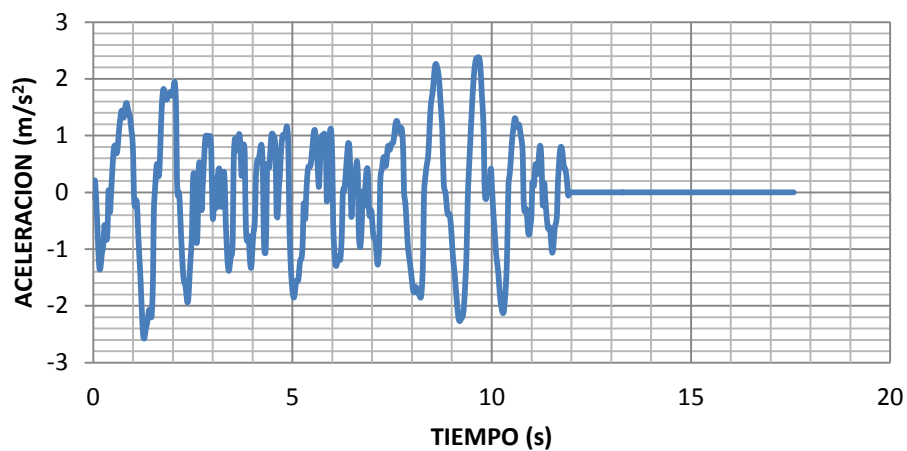


Figura 36.- Historia de aceleraciones para la acción sísmica APAT7903 con amortiguador, $C = 4.0 \text{ kN}/(\text{m/s})^n$ y $n = 0.5$.

APAT7903

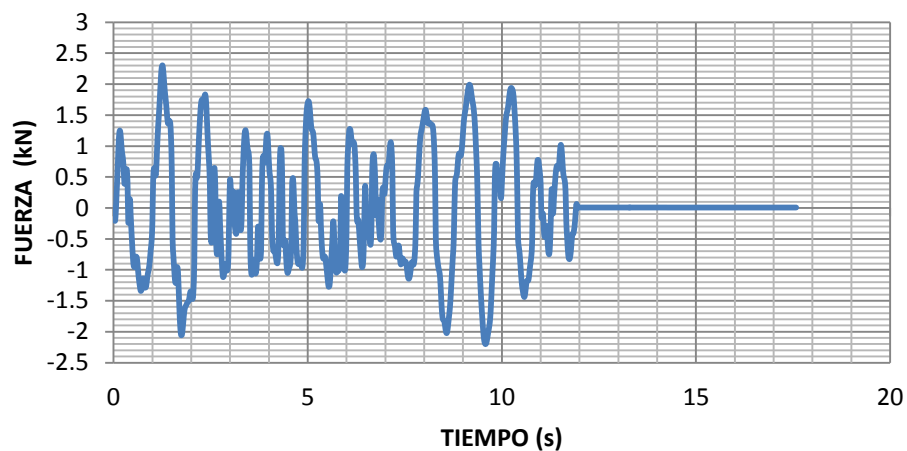


Figura 37.- Historia de fuerzas para la acción sísmica APAT7903 con amortiguador, $C = 4.0 \text{ kN}/(\text{m/s})^n$ y $n = 0.5$.

Respuesta para una estructura con un periodo de 1.75s colocando un amortiguador viscoso, el cual tiene una constante de amortiguamiento de $4.0 \text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^n$ y un exponente $n=0.5$ para la acción sísmica APAT7903.

APAT7903

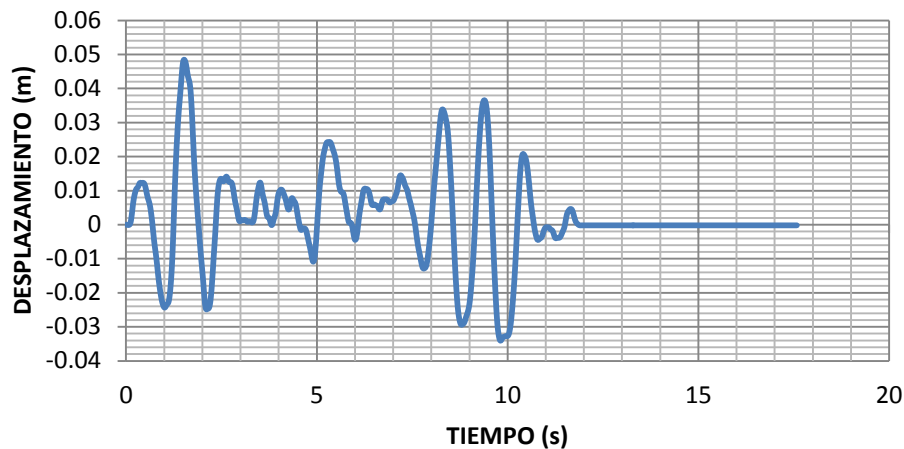


Figura 38.- Historia de desplazamientos para la acción sísmica APAT7903 con amortiguador, $C=4.0 \text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^n$ y $n=0.5$.

APAT7903

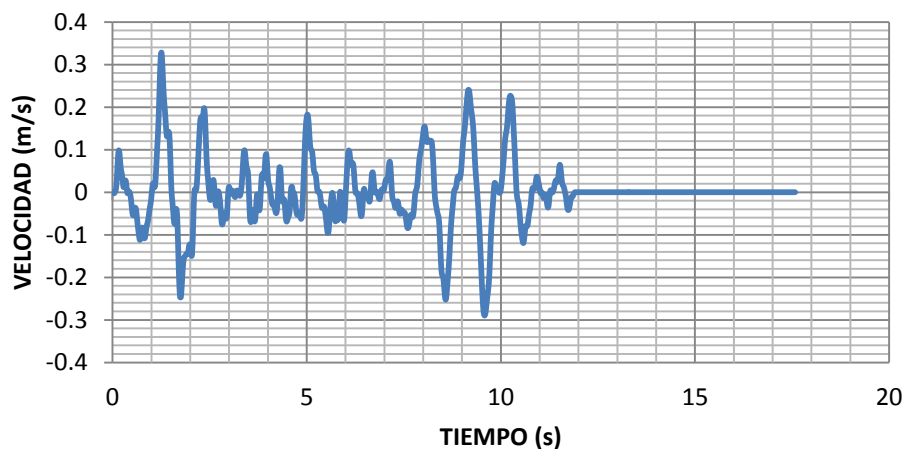


Figura 39.- Historia de velocidades para la acción sísmica APAT7903 con amortiguador, $C=4.0 \text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^n$ y $n=0.5$.

APAT7903

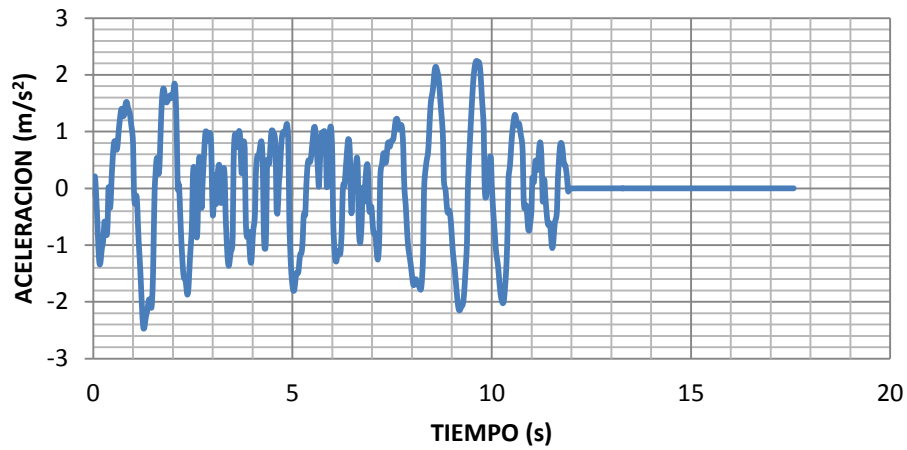


Figura 40.- Historia de aceleraciones para la acción sísmica APAT7903 con amortiguador, $C = 4.0 \text{ kN}/(\text{m/s})^n$ y $n = 0.5$.

APAT7903

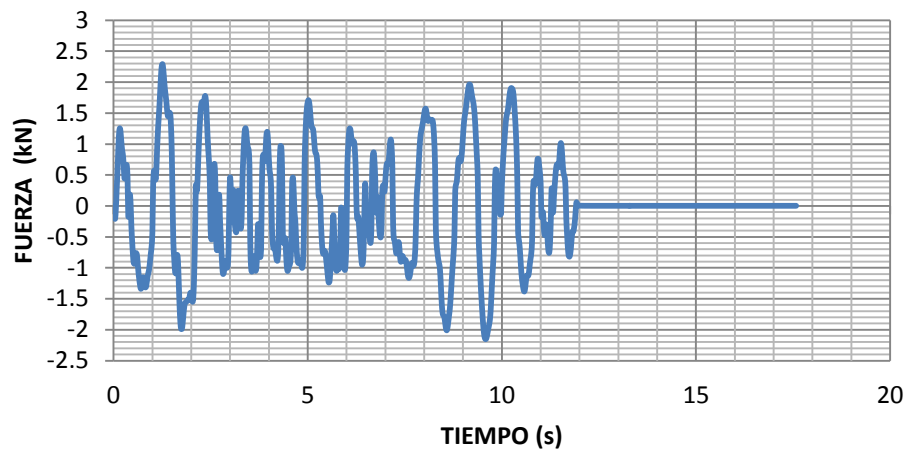


Figura 41.- Historia de fuerzas para la acción sísmica APAT7903 con amortiguador, $C = 4.0 \text{ kN}/(\text{m/s})^n$ y $n = 0.5$.

Respuesta para una estructura con un periodo de 2.00s colocando un amortiguador viscoso, el cual tiene una constante de amortiguamiento de 4.0 kN/(m/s)ⁿ y un exponente n= 0.5 para la acción sísmica APAT7903.

APAT7903

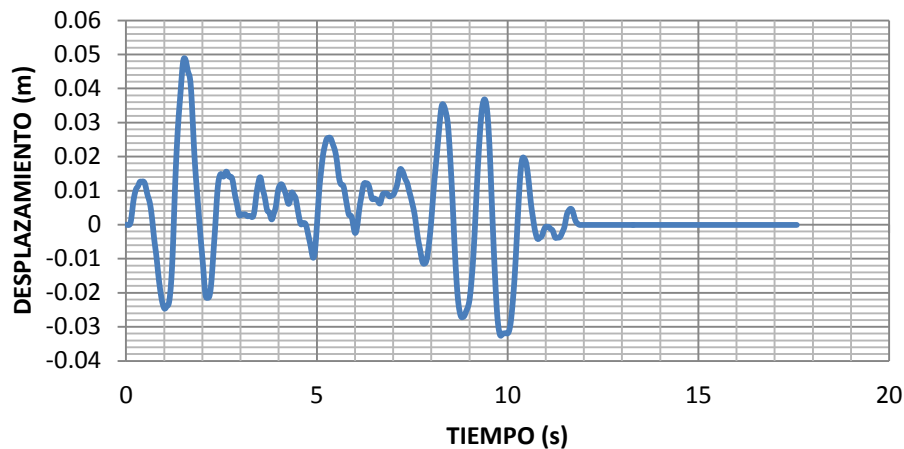


Figura 42.- Historia de desplazamientos para la acción sísmica APAT7903 con amortiguador, $C = 4.0 \text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^n$ y $n = 0.5$.

APAT7903

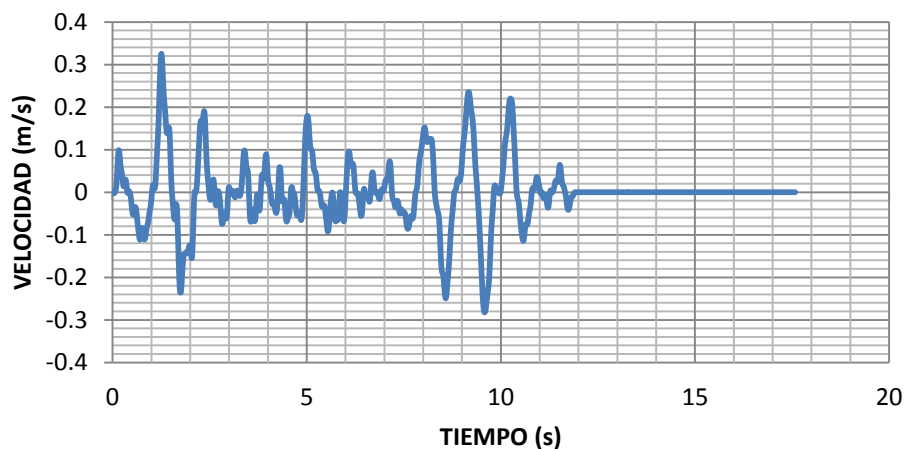


Figura 43.- Historia de velocidades para la acción sísmica APAT7903 con amortiguador, $C = 4.0 \text{ kN}/(\text{m}/\text{s})^n$ y $n = 0.5$.

APAT7903

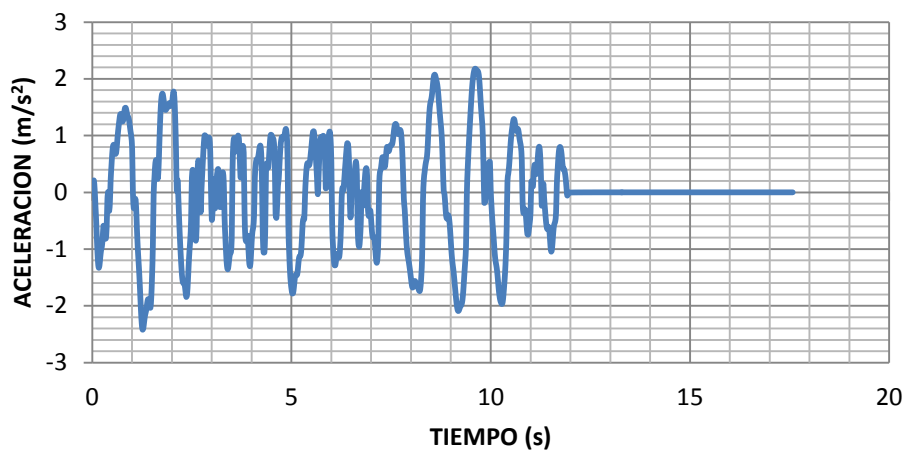


Figura 44.- Historia de aceleraciones para la acción sísmica APAT7903 con amortiguador, $C = 4.0 \text{ kN}/(\text{m/s})^n$ y $n = 0.5$.

APAT7903

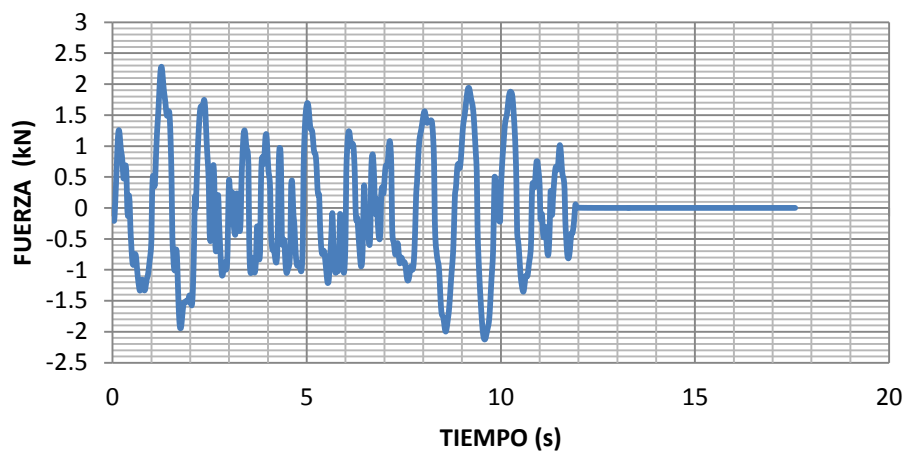


Figura 45.- Historia de fuerzas para la acción sísmica APAT7903 con amortiguador, $C = 4.0 \text{ kN}/(\text{m/s})^n$ y $n = 0.5$.

Con los resultados que arrojaron las graficas anteriores (*figuras 18 a 45*) se obtuvo la *tabla 4* con los valores máximos de desplazamiento, velocidad, aceleración y fuerza del amortiguador para los diferentes periodos a la que fue sometida la acción sísmica APAT7903 con un amortiguador viscoso que tiene las características de $C=4.0 \text{ kN}/(\text{m/s})^n$ y $n=0.5$.

<i>PERIODO (s)</i>	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00
DESPLAZAMIENTO (m)	0.02327	0.03751	0.04127	0.04576	0.04756	0.04848	0.04888
VELOCIDAD (m/s)	0.19797	0.30388	0.34372	0.33358	0.33184	0.32838	0.32539
ACELERACION (m/s²)	4.92435	4.02962	3.20765	2.78542	2.57753	2.47047	2.41826
FUERZA (kN)	1.77981	2.20499	2.34506	2.31028	2.30423	2.29216	2.2817

Tabla 4.- tabla con desplazamiento, velocidad, aceleración y fuerza del amortiguador máximos de las graficas anteriores.

Las *figuras 18 a 45* representan la acción de un solo evento sísmico (APAT7903), los análisis del sistema de un grado de libertad (sistema simplificado) se analizó con un total de 20 registros.

Capítulo 4).- Ayudas de diseño.

4.1.- Desarrollo.

Antes de presentar las ayudas de diseño, se plantea un ejemplo en el que se observa la diferencia que hay entre usar o no un amortiguador viscoso.

Para esto se escogió como acción sísmica, el registro MZ019510 (*tabla 1*) y un periodo $T=1.0s$; el amortiguador tiene una constante de amortiguamiento $C=1.0 \text{ kN}/(\text{m/s})^{0.1}$ y un exponente $n=0.1$.

En las siguientes figuras se observa la diferencia que hay entre utilizar y no un amortiguador viscoso para la acción sísmica MZ019510.

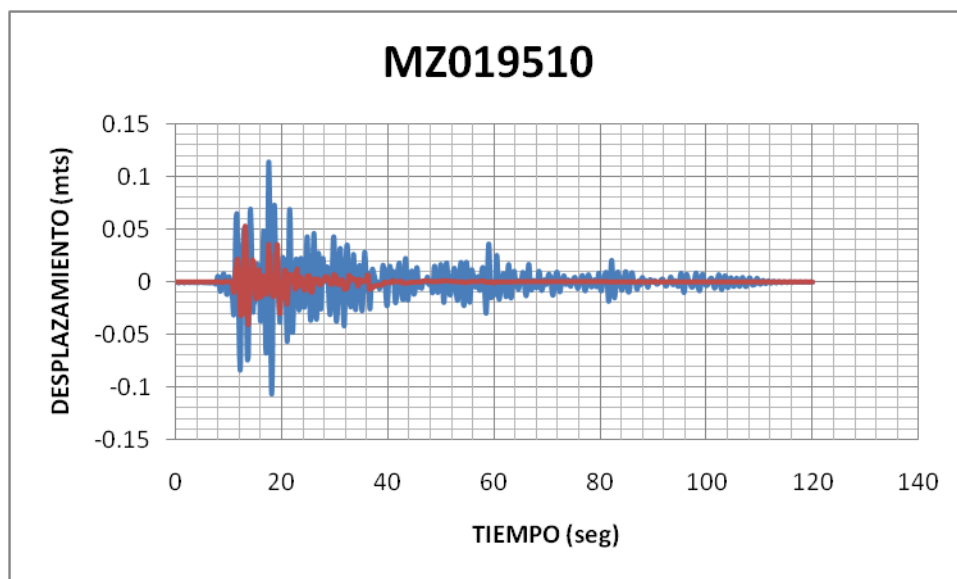


Figura 46.- Historia de desplazamientos para un puente sin amortiguador (línea azul) y con amortiguador (línea roja).

En la *figura 46* se observar la reducción significativa de desplazamientos al utilizar el amortiguador; el desplazamiento máximo, que fue de 11.4 cm para el modelo sin amortiguador, se redujo a 5.3 cm cuando se incorporo dicho dispositivo.

La *figura 47 y 48* muestran la reducción de la respuesta de velocidad y aceleración en la superestructura.

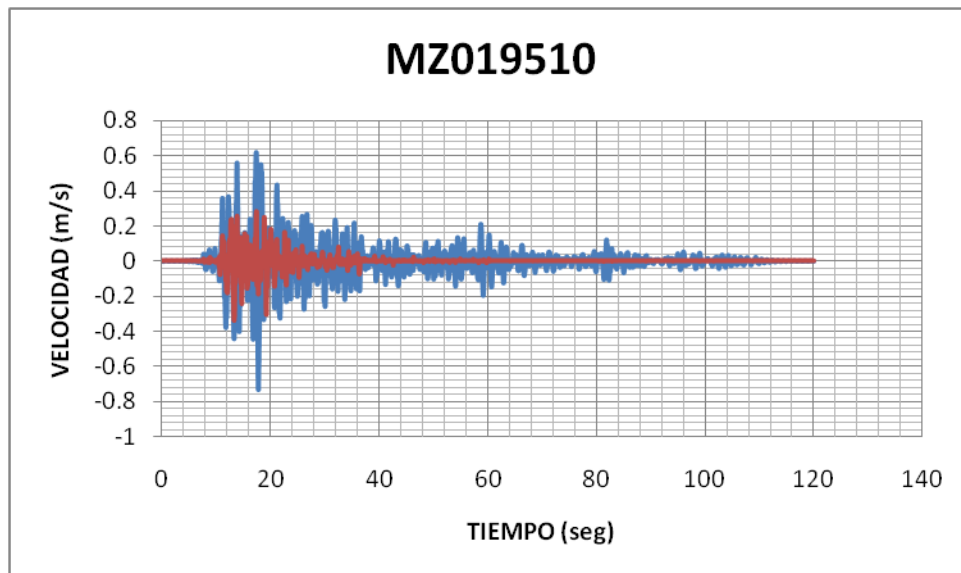


Figura 47.- Historia de velocidades para un puente sin amortiguador (línea azul) y con amortiguador (línea roja).

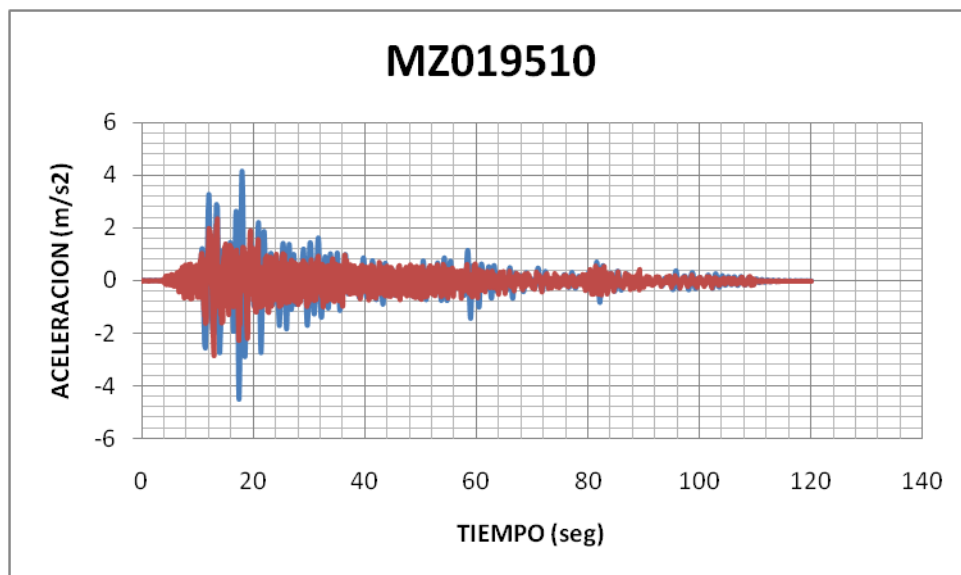


Figura 48.- Historia de aceleraciones para un puente sin amortiguador (línea azul) y con amortiguador (línea roja).

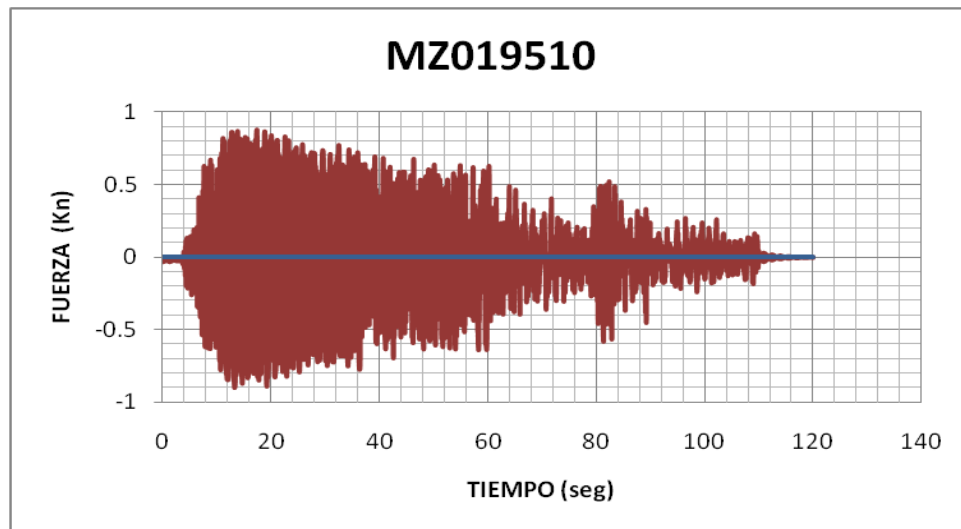


Figura 49.- Historia de fuerzas para un puente con amortiguador (línea roja).

En la *figura 49* se observa la variación de la fuerza que se genera en el disipador de energía (línea roja), que alcanza un máximo de 0.897 kN.

Las *figuras 46 a 49* representan la respuesta de un caso particular ante un solo evento sísmico (el MZ019510, tabla 1). En los análisis del sistema de un grado de libertad (sistema simplificado) se consideraron un total de 20 registros, para los cuales se obtuvieron los máximos valores de aceleración, fuerza en el amortiguador, velocidad y desplazamiento y se obtuvo un promedio de esos máximos que están representados en la *figura 50 a 77*. Con esos máximos se obtuvieron curvas de ajuste que dan como resultado las ayudas que permiten al diseñador seleccionar cuál de las opciones es la más conveniente o viable.

Las curvas de ajuste que se presentan en las ayudas de diseño, se elaboraron con dos tipos de ecuaciones para tener una mejor correlación; Exponenciales utilizadas en los desplazamientos y velocidades máximas y Ecuaciones de segundo grado utilizadas en aceleración y fuerzas máximas.

Se puede observar que en las *figuras 50 a 77* el valor de R^2 (correlación) es muy próximo a 1.0, esto quiere decir que las curvas de ajuste para las gráficas son muy aproximadas a los valores máximos.

Como se observa en las ayudas de diseño los valores máximos los tiene cuando el valor de $C=0.0 \text{ kN}/(\text{m/s})^n$ que corresponde a un modelo sin amortiguador viscoso, ya que los movimientos son libre.

Ayudas de diseño para $T= 0.50$ segundos.

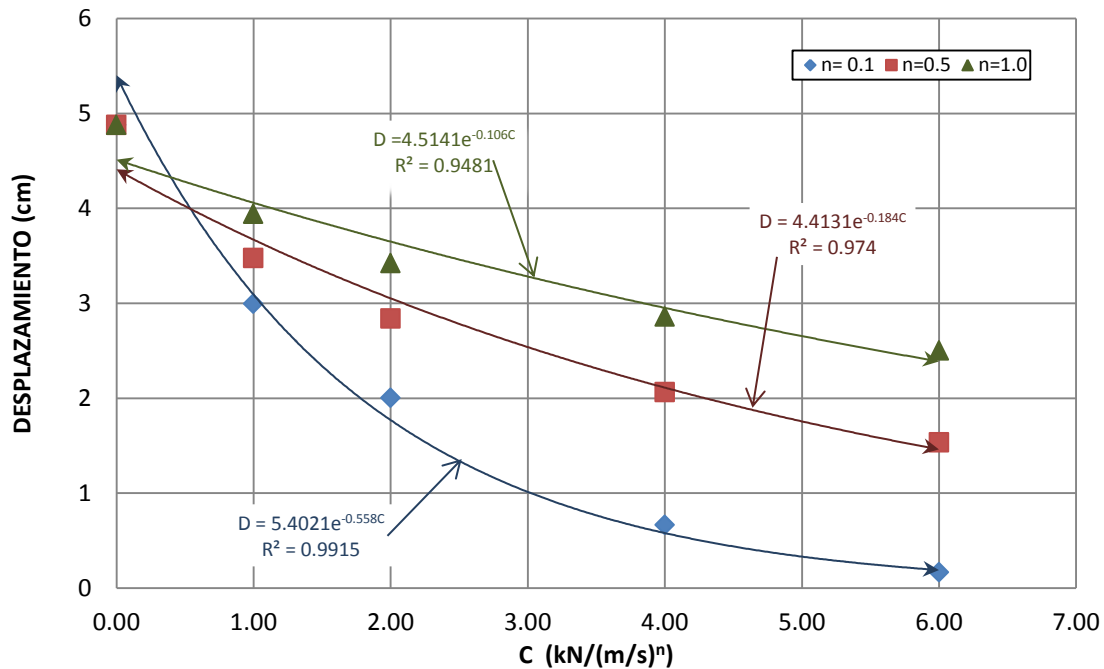


Figura 50.- Desplazamientos máximos promedio y curvas de diseño para $T= 0.5s$.

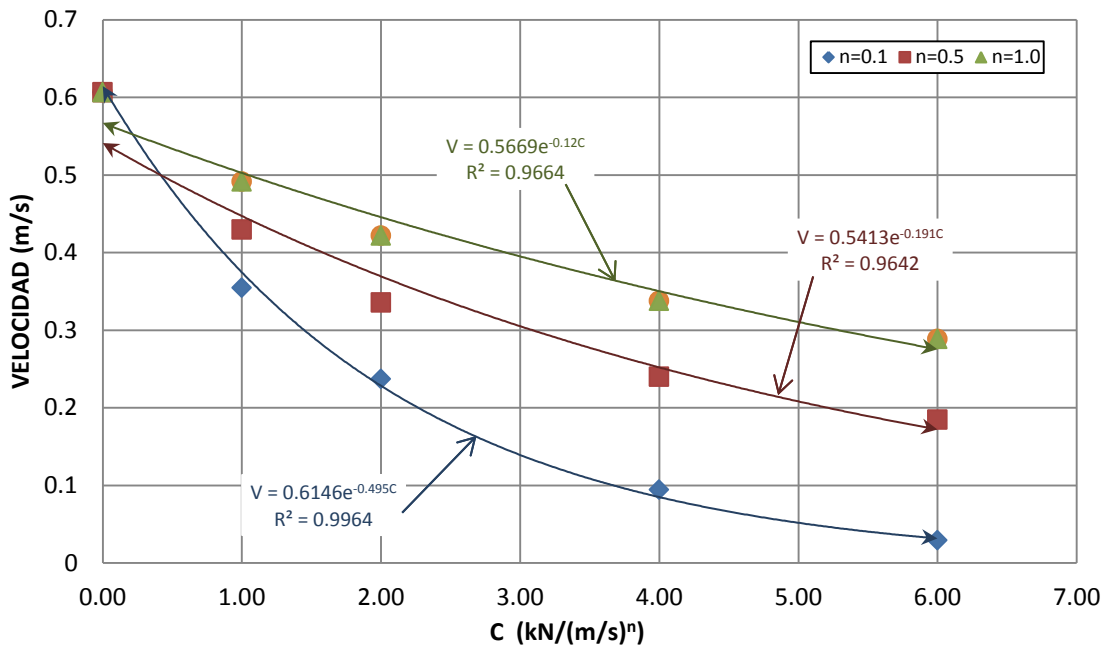


Figura 51.- Velocidades máximas promedio y curvas de diseño para $T= 0.5s$.

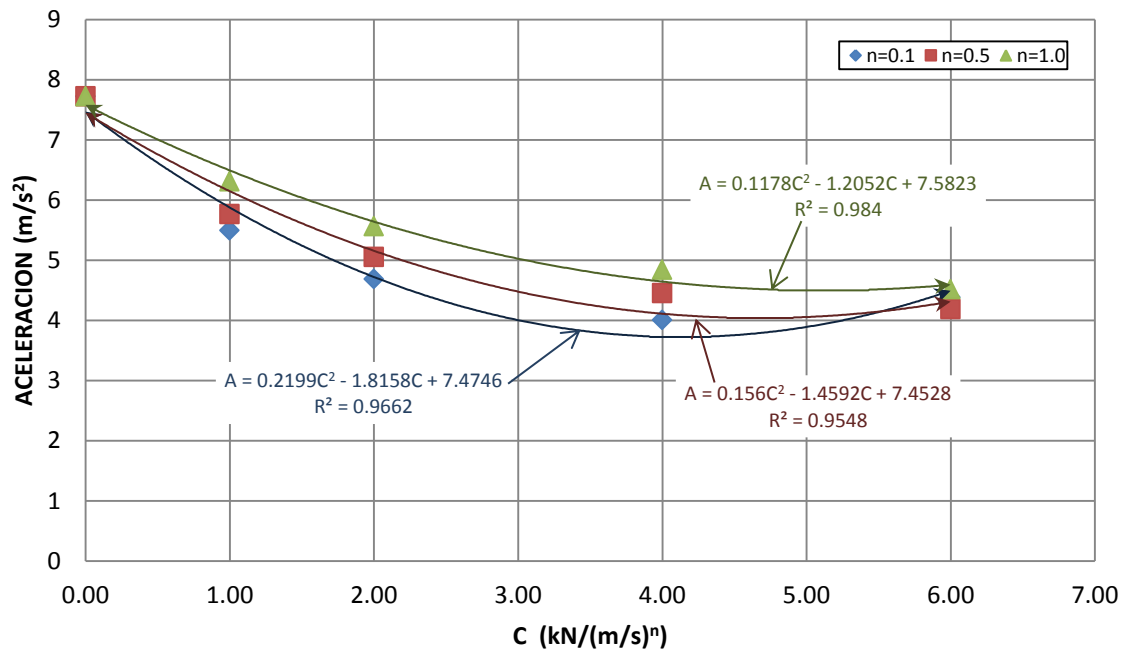


Figura 52.- Aceleraciones máximas promedio y curvas de diseño para $T = 0.5s$.

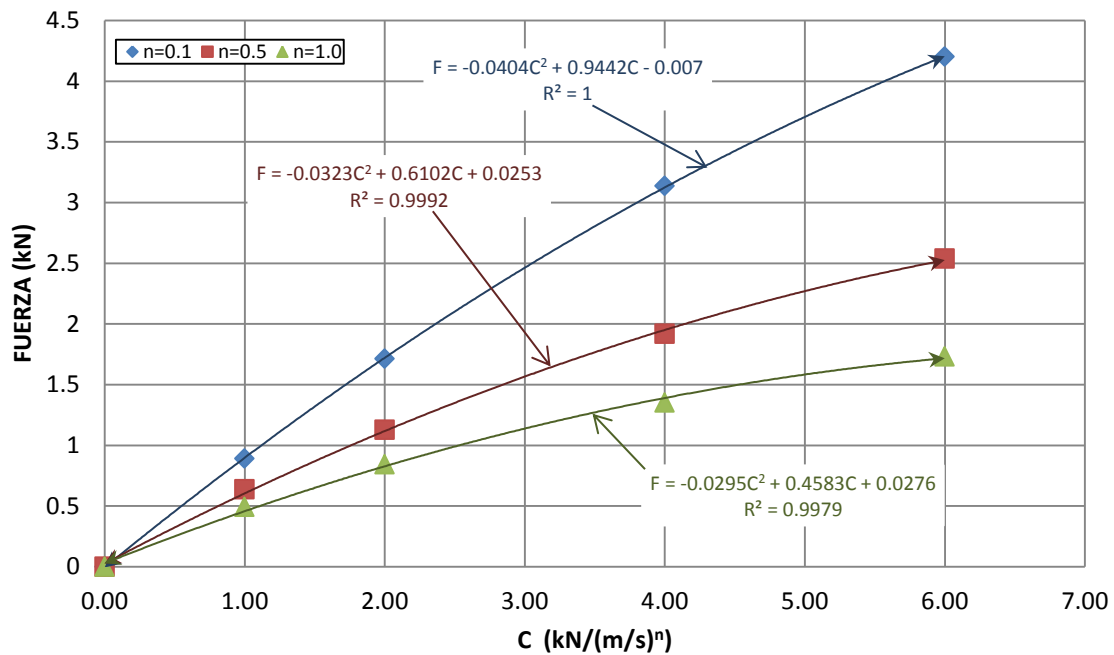


Figura 53.- Fuerzas máximas promedio y curvas de diseño para $T = 0.5s$.

Ayudas de diseño para $T= 0.75$ segundos.

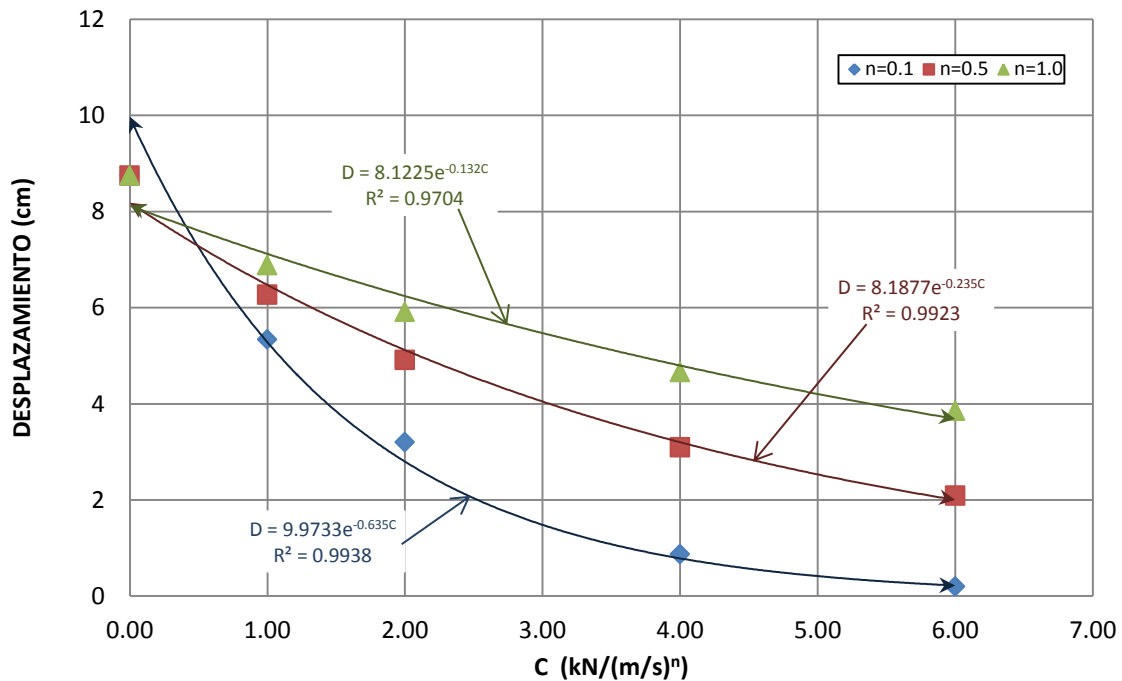


Figura 54.- Desplazamientos máximos promedio y curvas de diseño para $T= 0.75$ s.

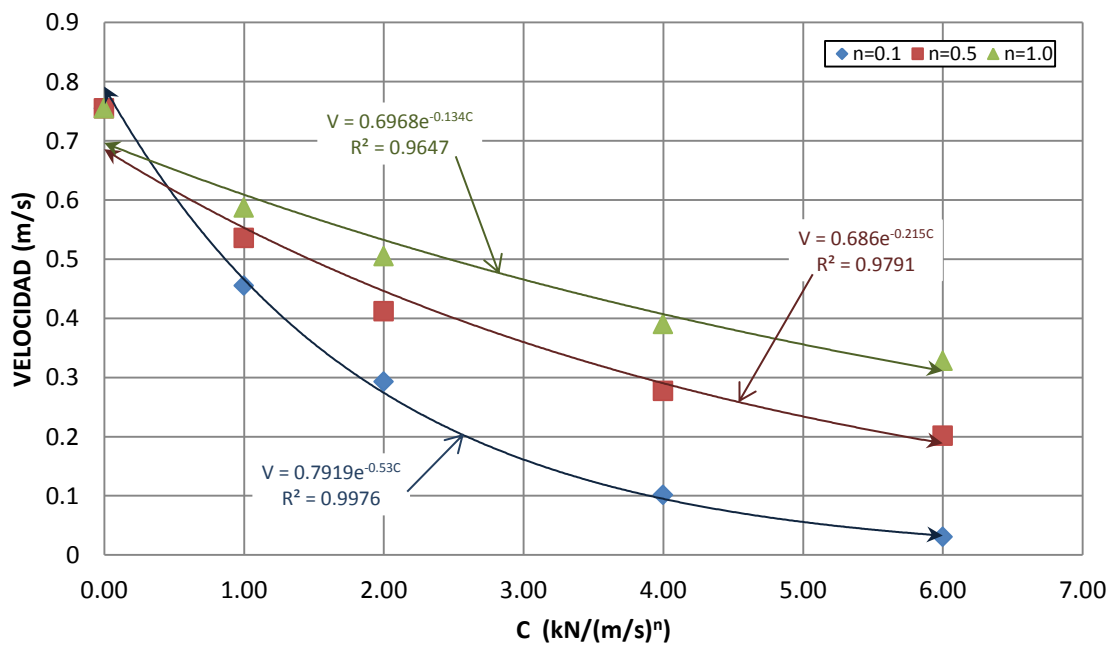


Figura 55.- Velocidades máximas promedio y curvas de diseño para $T= 0.75$ s.

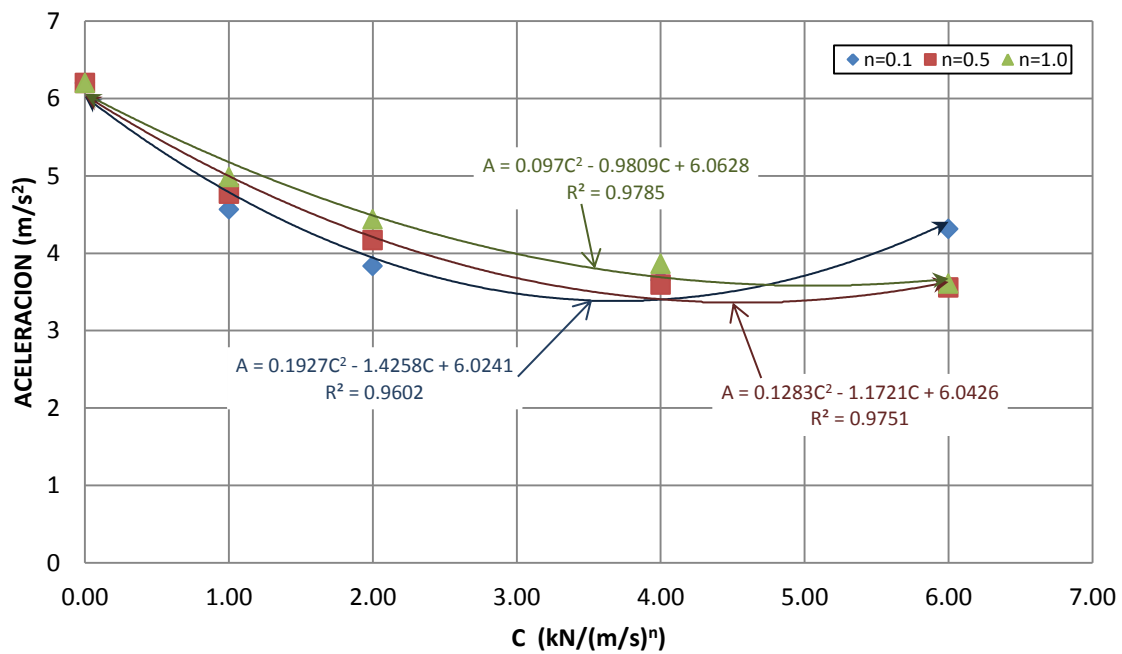


Figura 56.- Aceleraciones máximas promedio y curvas de diseño para $T = 0.75s$.

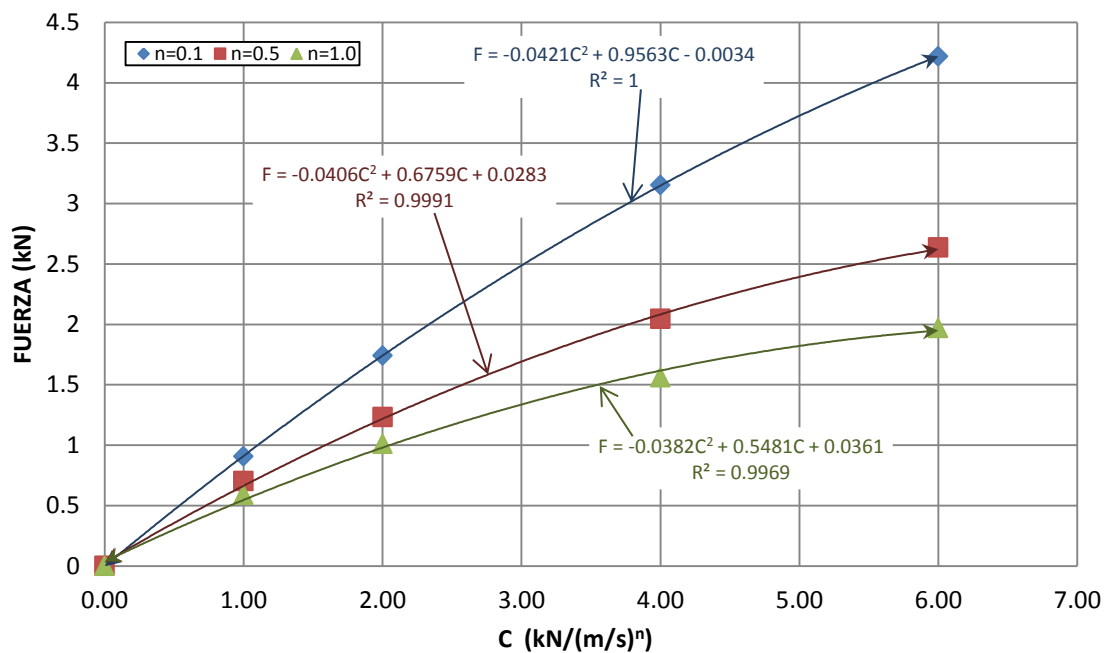


Figura 57.- Fuerzas máximas promedio y curvas de diseño para $T = 0.75s$.

Ayudas de diseño para T= 1.00 segundos.

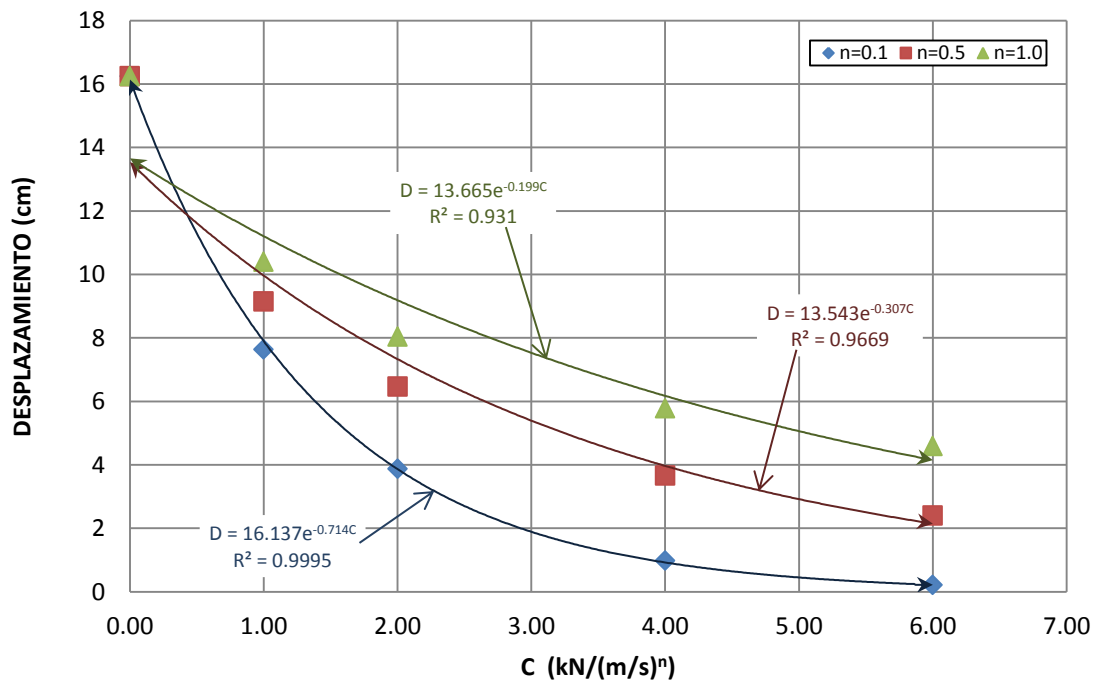


Figura 58.- Desplazamientos máximos promedio y curvas de diseño para T= 1.00s.

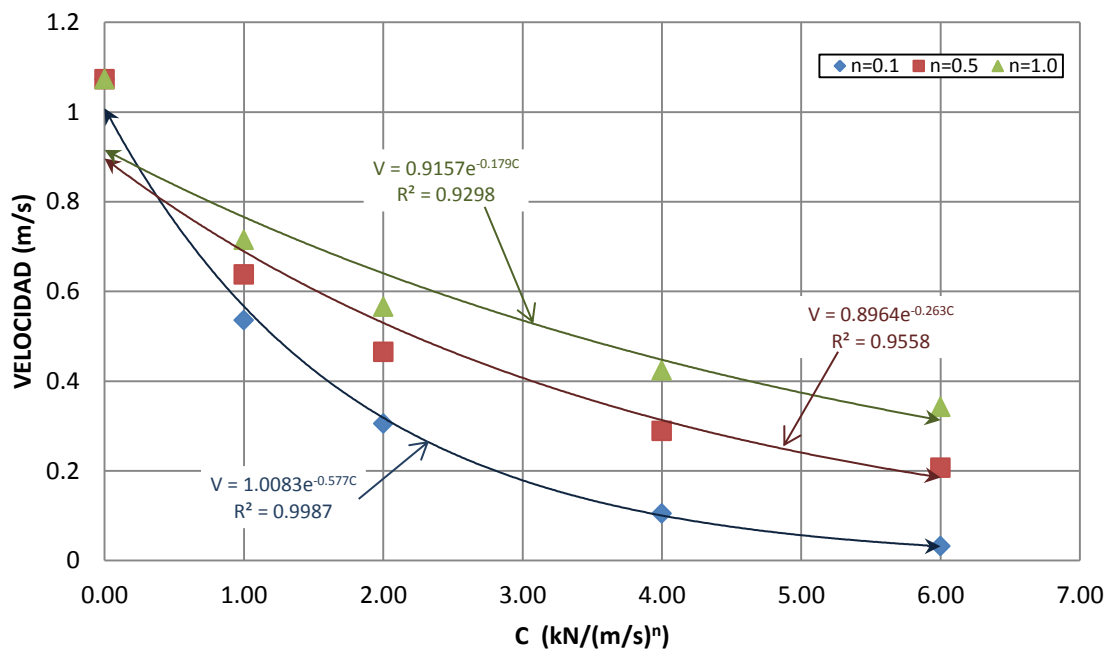


Figura 59.- Velocidades máximas promedio y curvas de diseño para T= 1.00s.

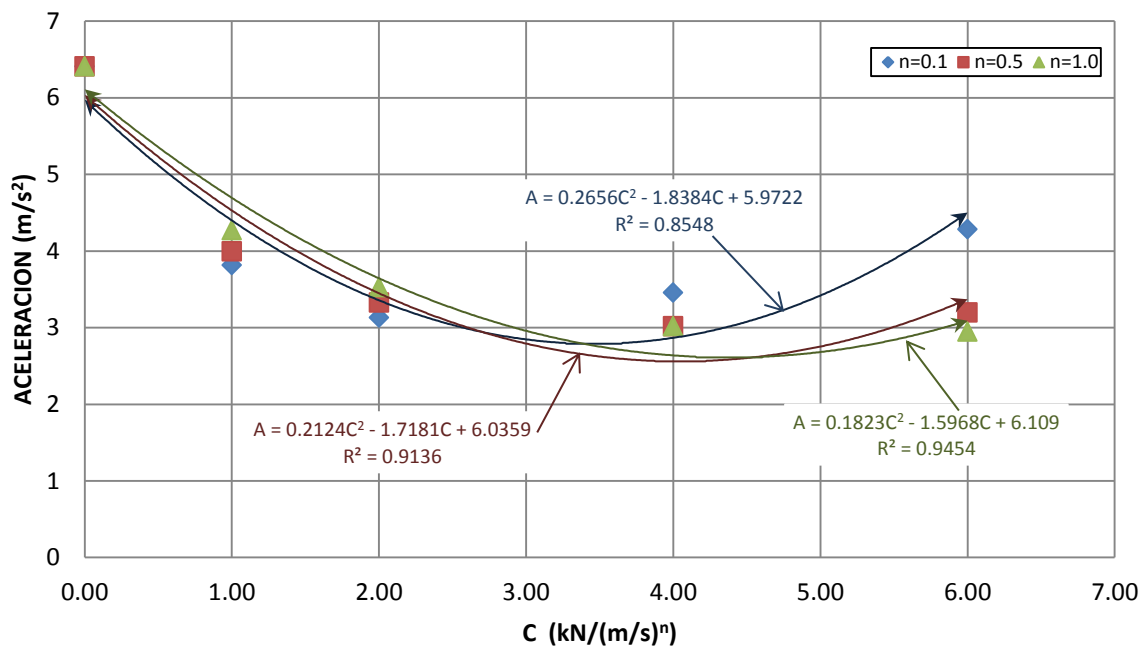


Figura 60.- Aceleraciones máximas promedio y curvas de diseño para $T= 1.00s$.

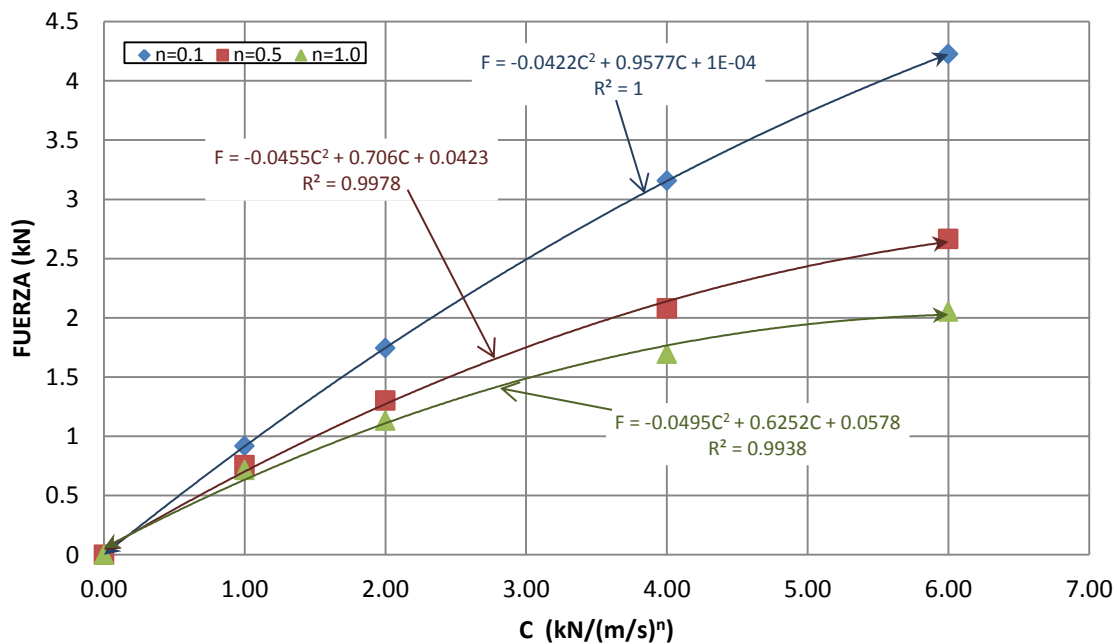


Figura 61.- Fuerzas máximas promedio y curvas de diseño para $T= 1.00s$.

Ayudas de diseño para T= 1.25 segundos.

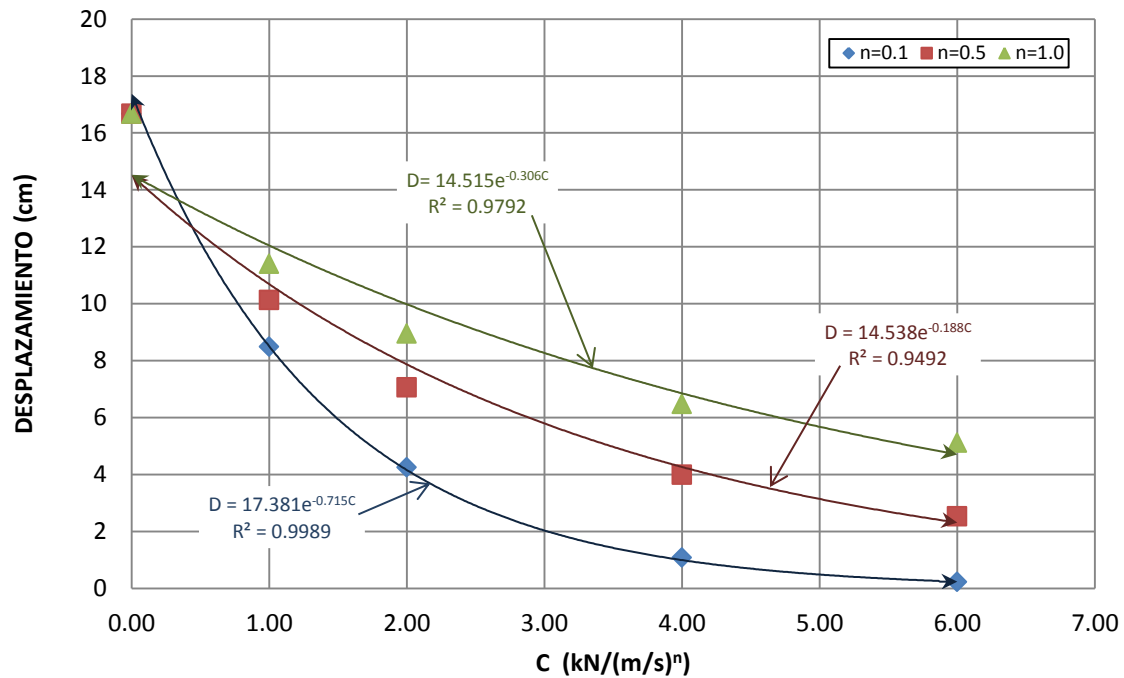


Figura 62.- Desplazamientos máximos promedio y curvas de diseño para T= 1.25s.

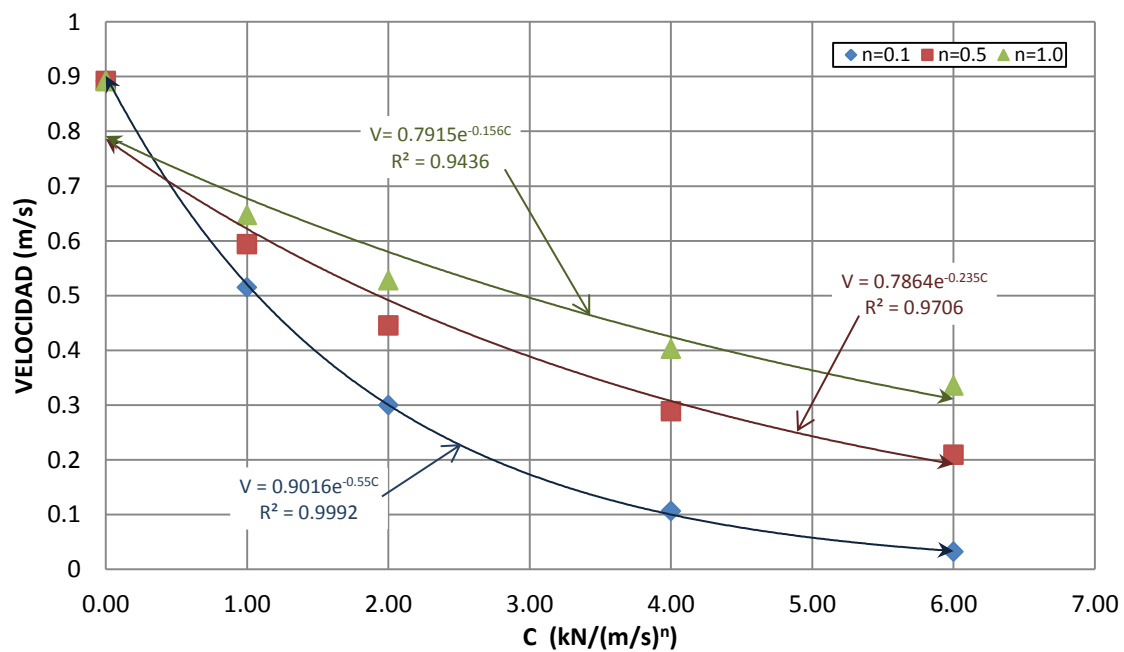


Figura 63.- Velocidades máximas promedio y curvas de diseño para T= 1.25s.

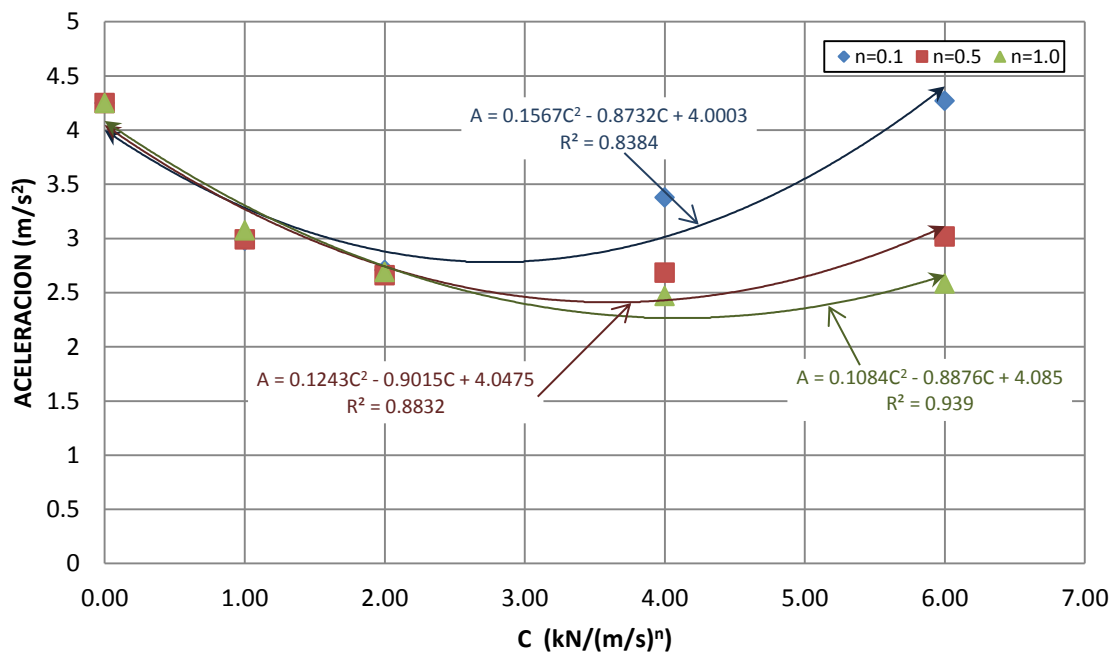


Figura 64.- Aceleraciones máximas promedio y curvas de diseño para $T= 1.25s$.

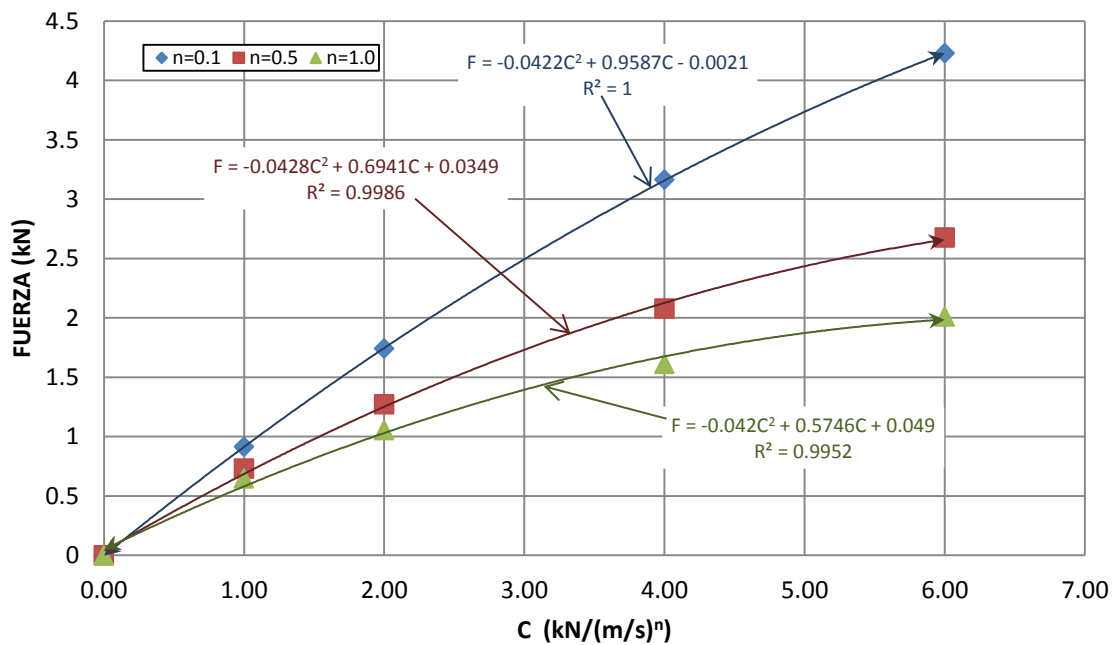


Figura 65.- Fuerzas máximas promedio y curvas de diseño para $T= 1.25s$.

Ayudas de diseño para T= 1.50 segundos.

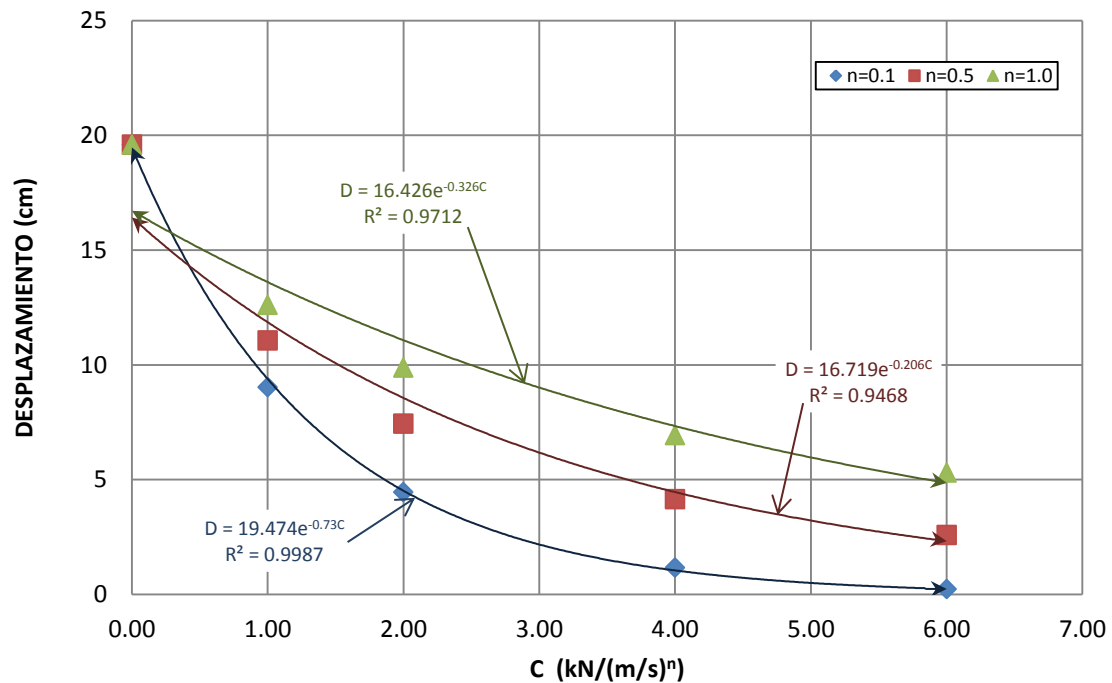


Figura 66.- Desplazamientos máximos promedio y curvas de diseño para T= 1.50s.

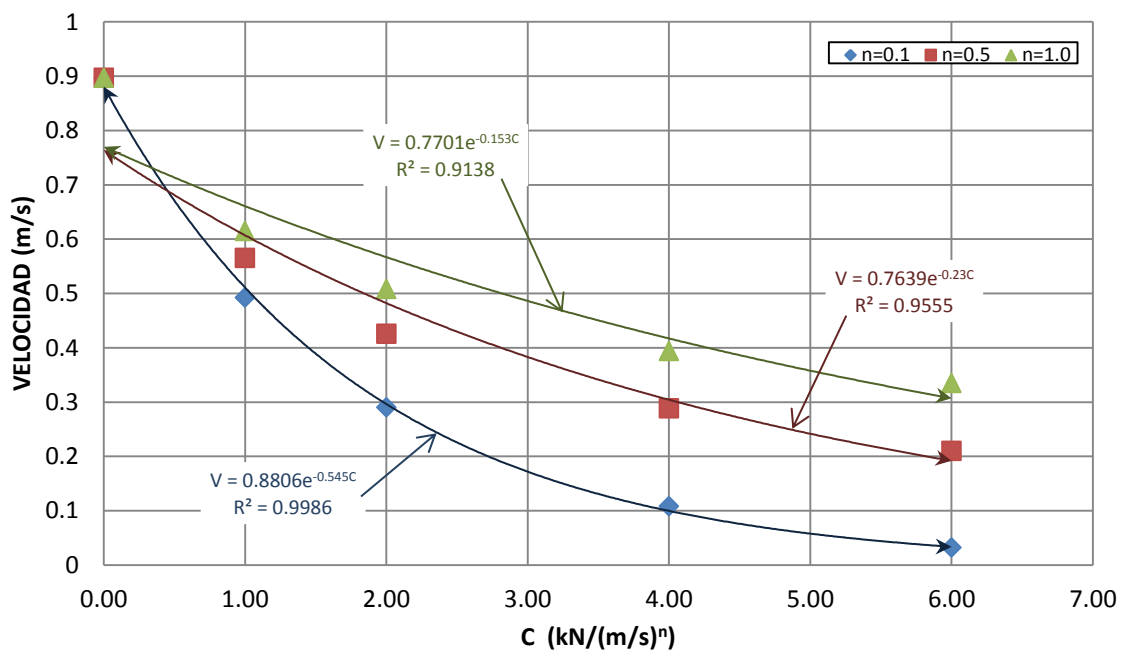


Figura 67.- Velocidades máximas promedio y curvas de diseño para T= 1.50s.

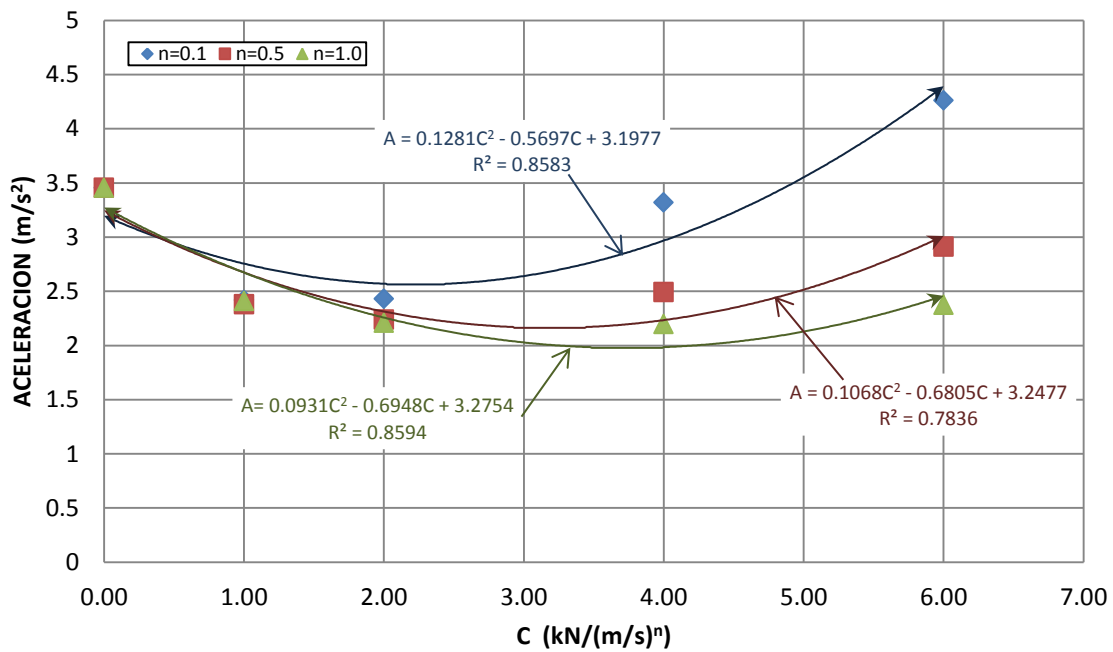


Figura 68.- Aceleraciones máximas promedio y curvas de diseño para $T= 1.50s$.

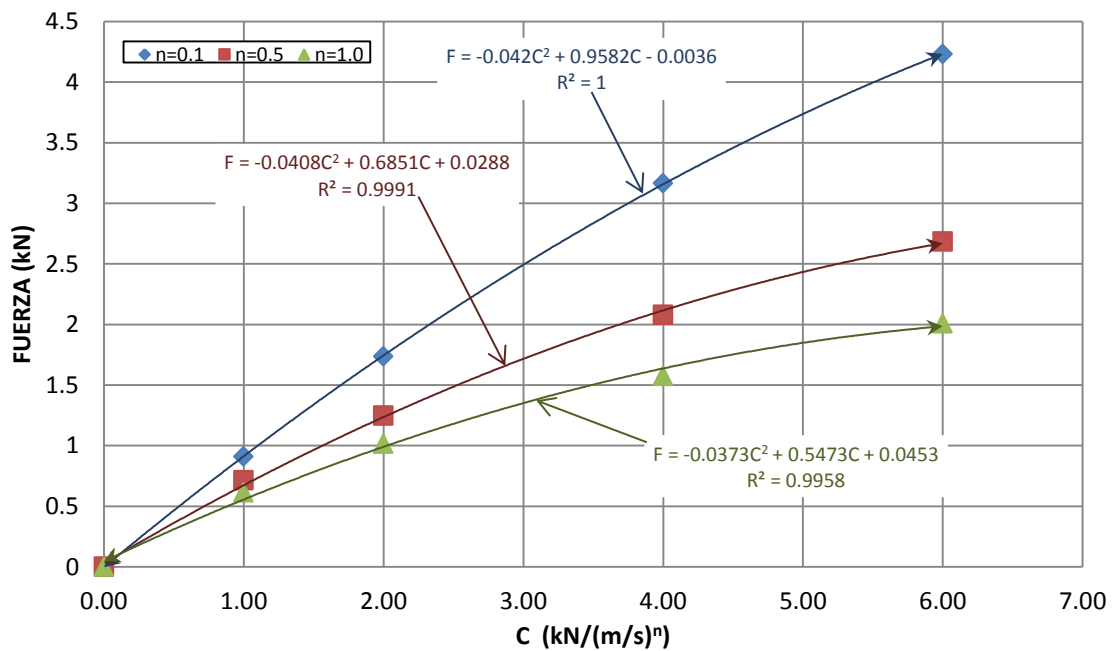


Figura 69.- Fuerzas máximas promedio y curvas de diseño para $T= 1.50s$.

Ayudas de diseño para $T= 1.75$ segundos.

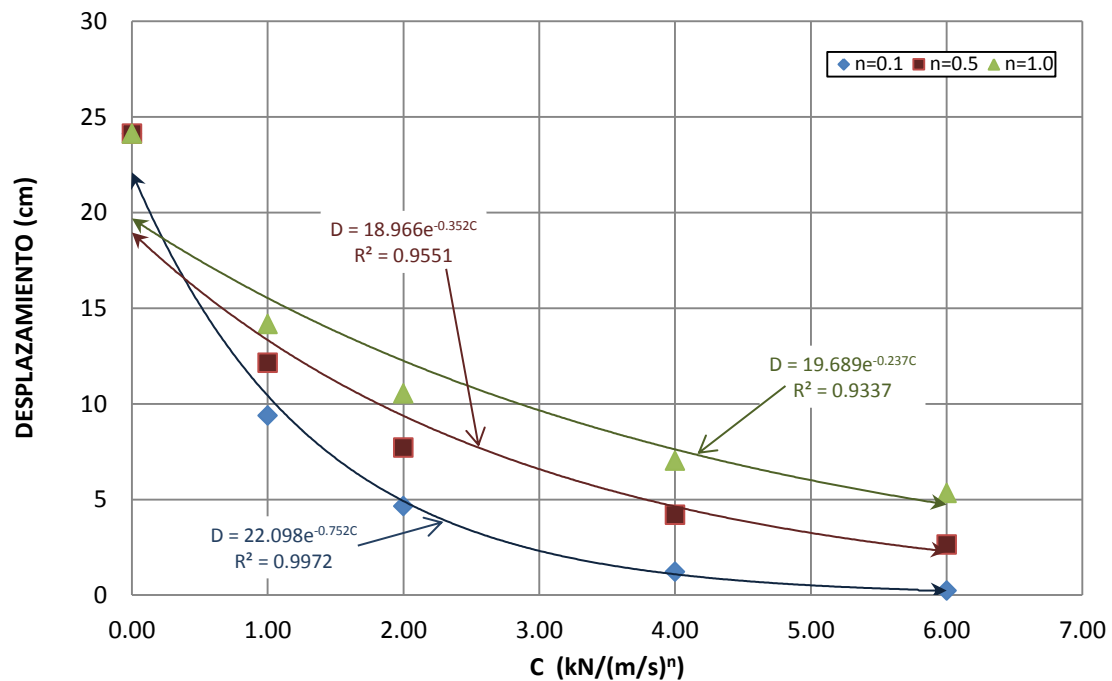


Figura 70.- Desplazamientos máximos promedio y curvas de diseño para $T= 1.75$ s.

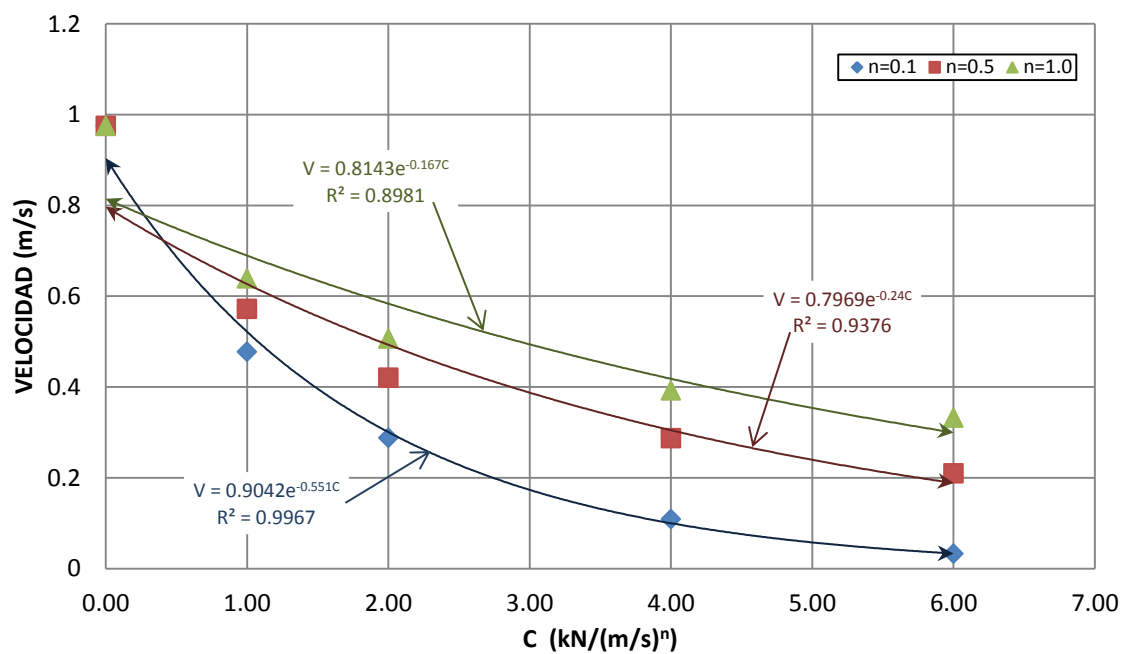


Figura 71.- Velocidades máximas promedio y curvas de diseño para $T= 1.75$ s.

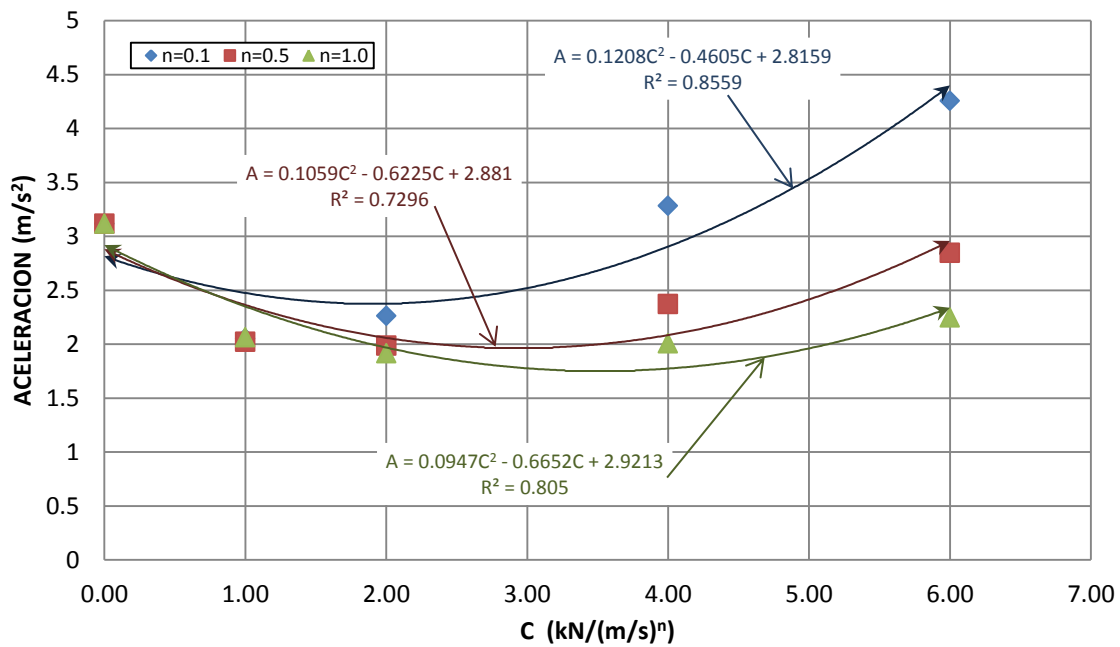


Figura 72.- Aceleraciones máximas promedio y curvas de diseño para $T= 1.75s$.

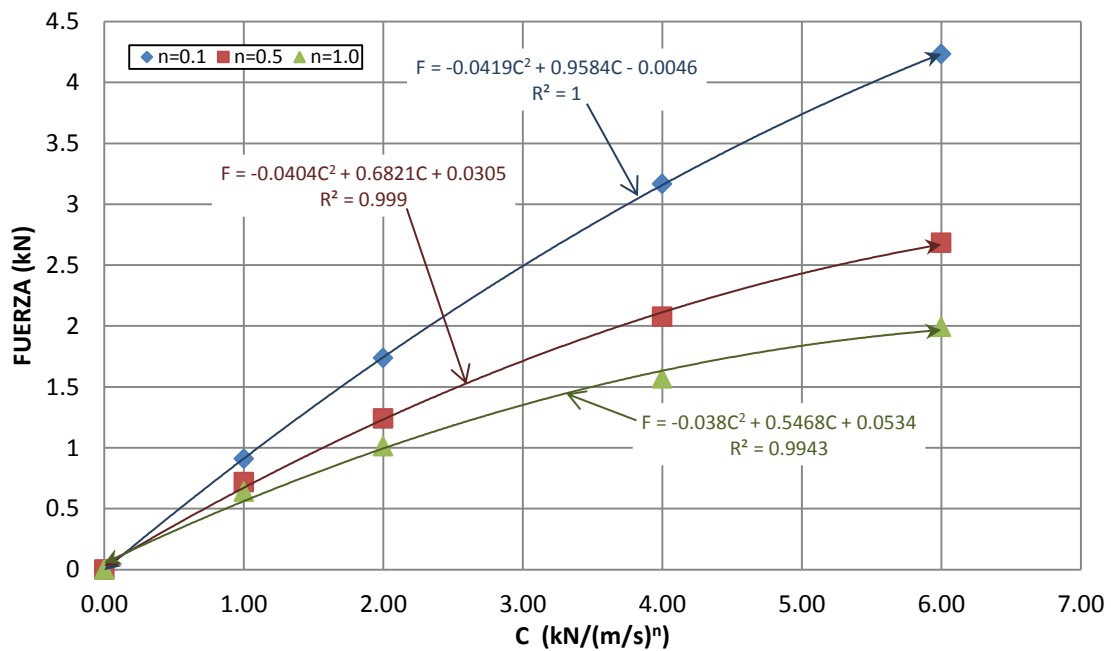


Figura 73.- Fuerzas máximas promedio y curvas de diseño para $T= 1.75s$.

Ayudas de diseño para T= 2.00 segundos.

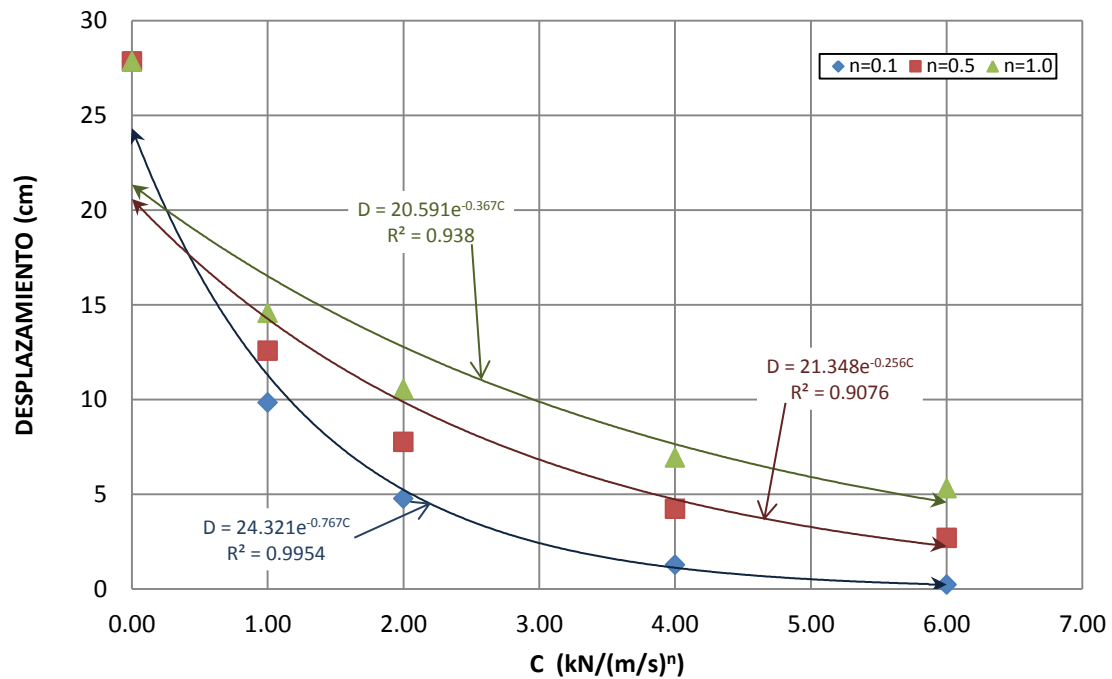


Figura 74.- Desplazamientos máximos promedio y curvas de diseño para T= 2.00s.

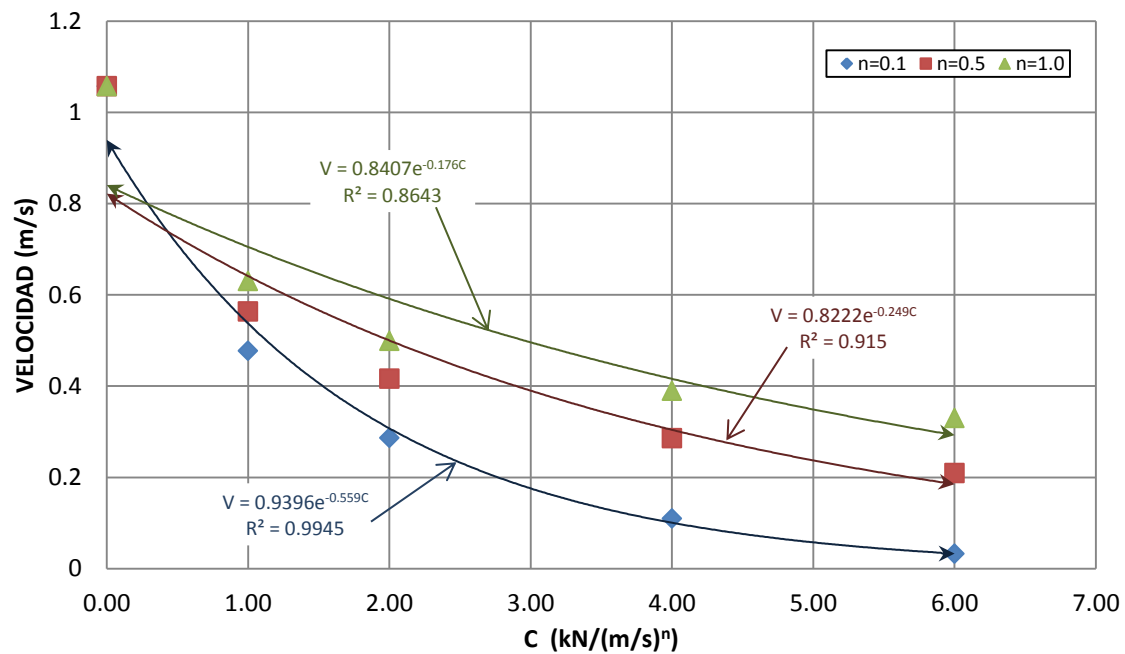


Figura 75.- Velocidades máximas promedio y curvas de diseño para T= 2.00s.

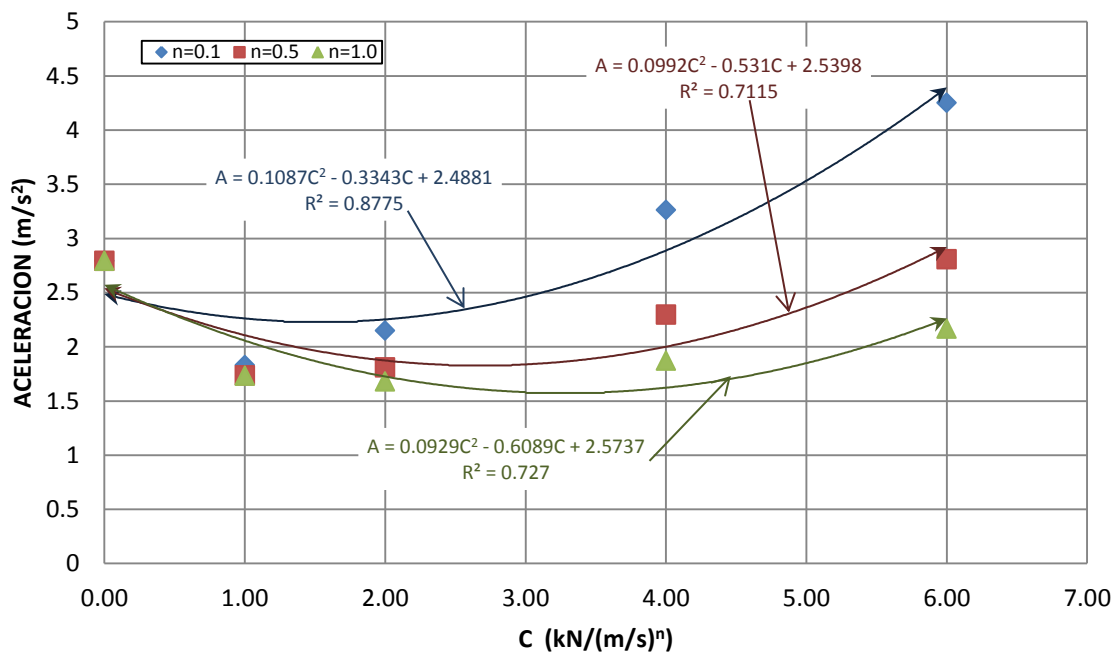


Figura 76.- Aceleraciones máximas promedio y curvas de diseño para $T= 2.00s$.

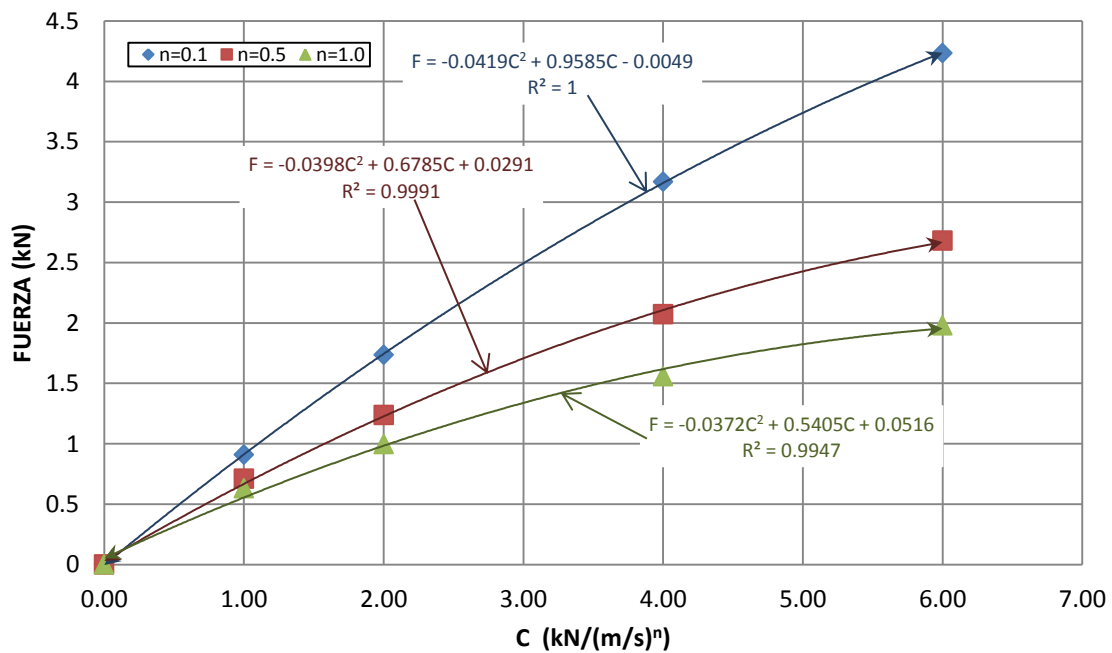


Figura 77.- Fuerzas máximas promedio y curvas de diseño para $T= 2.00s$.

Observaciones:

Del estudio anterior se puede concluir que para diferentes combinaciones de la constante del amortiguador C y de la exponente n se obtienen resultados similares en términos de desplazamientos los cuales serán medidos en la parte superior de la columna de la estructura. Con lo que representan una gran diversidad de posibilidades en la selección de este tipo de dispositivo disipador de energía, limitado únicamente por el costo de éste ya que al desarrollar mayor fuerza, mayor será su costo.

En las ayudas de diseño (figura 50 a 77) se observa que éstas están en función del periodo fundamental que presente el puente, ya que de esto dependen los desplazamientos, velocidades, fuerza en el amortiguador y aceleraciones

De lo que se puede observar de la estructura sin amortiguamiento se destaca:

- La aceleración disminuye con el aumento del periodo.
- Los desplazamientos así como las velocidades crecen con el aumento del periodo.

En cuanto al empleo de los amortiguadores en la estructura se observa:

- El empleo de la constante C con valores grandes proporcionan una buena respuesta ante los efectos que se desean lograr (disminución de desplazamientos y velocidades), pero esto puede llegar a cambiar al combinarlo con algunos valores de n , se pueden presentar desplazamientos muy cercanos a cero y disminuir las velocidades pero presentan un efecto característico de estos que aceleran a la estructura, dichas aceleraciones que se pueden presentar en algunos casos pueden andar del orden de dos veces la aceleración de la estructura sin el empleo de este tipo de dispositivo, por otra parte estas combinaciones demandan una mayor fuerza del amortiguador por lo que encarece este tipo de dispositivo.

4.2.- Verificación.

Para el análisis de los modelos del puente que a continuación se muestra (La Chuta) al igual que en los modelos simplificados se utilizó el programa SAP 2000 V11.

Del análisis modal del puente se obtienen las características dinámicas (periodo y masa modal efectiva) del primer modo longitudinal de vibrar, datos necesarios para la determinación de las características de los amortiguadores haciendo uso de las ayudas de diseño.

Mediante las Ayudas de diseño obtenidas en el estudio paramétrico, nos auxiliaremos para determinar las características del amortiguador para lo cual fijaremos el desplazamiento máximo que se admitirá en el puente; para nuestro caso tomaremos los valores de altura de la pila contra nivel de daño, el cual será considerado de la menor pila ya que ésta es la que presenta un mayor cortante y por ser la menos flexible.

Las características del amortiguador se obtendrán con la siguiente expresión.

$$C' = M_x C F_m$$

DONDE:

C' --- Características del amortiguador

C --- Características del amortiguador definido por la masa unitaria (tomado de las ayudas de diseño).

M_x --- Masa modal asociada con el primer modo longitudinal del modelo.

F_m --- Factor de participación del primer modo longitudinal.

Para un mejor entendimiento de la función de las ayudas de diseño, a manera de ejemplo de verificación se presenta el análisis del “Puente la Chuta”.

El puente La Chuta se encuentra en la carretera Playa Azul – Manzanillo en el kilómetro 25+500 en el estado de Michoacán. Tiene una latitud de

18° 03' 03" norte y una longitud de 102° 33' 27" oeste. Es un puente en tangente y con superestructura continua sobre los apoyos de neopreno.

En las figuras 79, 80 y 81 se ilustra la geometría del puente. En la figura 82 se presenta el modelo del puente elaborado en el programa SAP2000.



Figura 78.- Puente la Chuta

Características geométricas del puente:

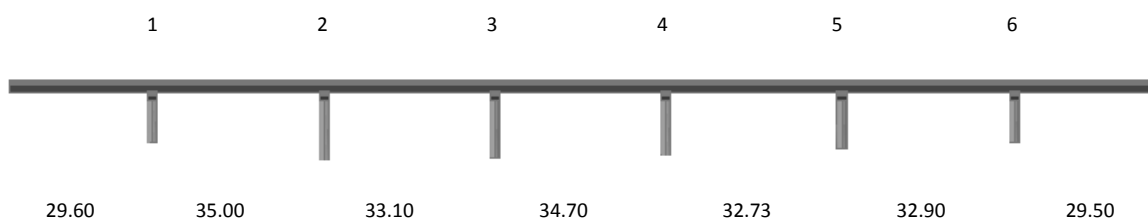
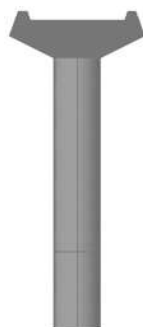


Figura 79.- Distribución de columnas.



pila	Longitud (m)
1	6.25
2	9.74
3	11.00
4	11.56
5	11.76
6	8.45

Figura 80.- Pilas del puente la chuta.

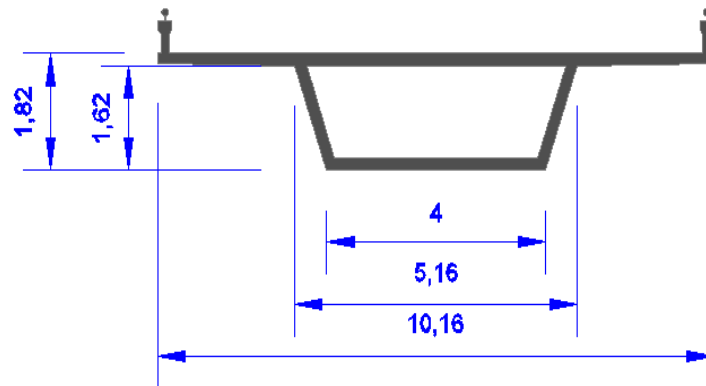


Figura 81.- Sección transversal de la superestructura.

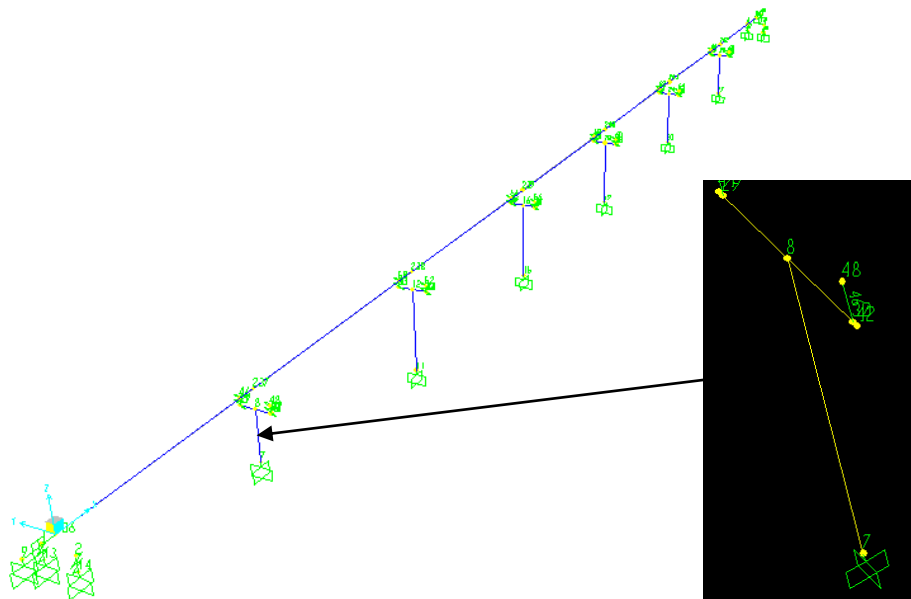


Figura 82.- Modelo del puente La Chuta incluyendo los amortiguadores viscosos.

En la *tabla 5* se presentan los periodos y los factores de participación de masa modal para los primeros treinta modos. Como se observa en la tabla, el primer modo longitudinal corresponde al modo 2, con un periodo de 1.77 segundos y una masa modal de 90.52%. el peso del puente es de 38,426.4 kN, por lo que su masa total es de 9,917.06 kN/(m/s²).

MODO	PERIODO (SEG)	FACTORES DE PARTICIPACION DE MASA MODAL		
		LONG.	TRANSV.	VERTICAL
1	1.951643	0	0.818265	0
2	1.77473	0.9052	0	9.933E-13
3	1.581144	0	0.000148	0
4	1.237757	0	0.089375	0
5	0.780358	1.441E-20	0.000001006	6.591E-17
6	0.468418	0	0.000297	0
7	0.322557	0	0.000326	1.418E-18
8	0.295586	0.014877	0	2.417E-14
9	0.290022	1.54E-20	0.009581	8.107E-17
10	0.288417	0.015728	1.557E-18	2.213E-11
11	0.274926	0	0.025623	1.448E-16
12	0.26857	0.016003	1.331E-20	7.288E-13
13	0.262129	0	0.006599	6.208E-20
14	0.243851	0	0.003654	5.542E-20
15	0.225028	0.01628	1.213E-18	2.765E-10
16	0.217924	0	0.01303	2.08E-17
17	0.200762	0	0.004886	1.665E-20
18	0.182705	0.016069	0	1.026E-08
19	0.174407	0	0.011315	8.519E-20
20	0.170285	0.000218	1.387E-20	0.000002963
21	0.117461	0.015624	1.764E-20	1.576E-08
22	0.116577	2.025E-19	0.013924	1.332E-19
23	0.090122	0.00000013	1.678E-16	0.000002274
24	0.074836	5.047E-12	6.418E-17	0.227997
25	0.074351	1.582E-10	6.058E-16	0.133793
26	0.073412	3.575E-10	8.476E-16	0.152424
27	0.071129	9.748E-13	2.715E-16	0.163812
28	0.066293	4.106E-11	3.162E-16	0.130423
29	0.065362	1.807E-09	1.074E-15	0.018722
30	0.061736	1.361E-10	1.09E-16	0.151111

Tabla 5.- Periodos y factores de participación de masas para el modelo tridimensional del Puente La Chuta.

Una medida para considerar el nivel del daño que pudiese presentarse en los elementos estructurales del puente, para nuestro caso las pilas, es mediante el desplazamiento que se presenta en dicho elemento.

Para el puente en cuestión los desplazamientos para los estados límite de servicio (Δ_{serv}), control de daño (Δ_{cd}) y último (Δ_u) fueron calculados por Sergio Iván Martínez. (2009) “ESTIMACION DEL NIVEL DE DAÑO EN PILAS DE CONCRETO EN PUENTES CON DISTINTAS CONDICIONES DE APOYO”

Pila	Lc (m)	Δ_u (m)	Δ_{cd} (m)	Δ_{serv} (m)
1	6.25	0.19069321	0.13245338	0.026047
2	9.74	0.38616651	0.27212424	0.063782
3	11.00	0.4716936	0.33365865	0.081501
4	11.56	0.51257258	0.36310716	0.090072
5	11.76	0.52752006	0.37388584	0.093237
6	8.45	0.3057953	0.21456258	0.047896

Tabla 6.- Desplazamientos de servicio, control de daños y últimos para las columnas del Puente La Chuta.

Como se desea limitar el desplazamiento para que la estructura no presente daños se tomará un desplazamiento menor al desplazamiento de carga de servicio para la pila más corta, que para nuestro caso tomaremos como punto de control el 8 que se encuentra ubicado en la parte superior de la pila 1 mostrada en la figura 82, para este caso el desplazamiento se tomo de 2.5cm.

Para obtener la constante C tendremos que utilizar las ayudas de diseño, la cual se escoge con el periodo que tiene la estructura y el desplazamiento que se busca, para este caso se tiene un periodo de 1.77s y se pretende que la estructura tenga un desplazamiento máximo de 2.5cm.

Ya que no se tienen ayudas de diseño exactamente para ese periodo, se deberá de trabajar con el periodo más cercano a éste el cual es 1.75s.

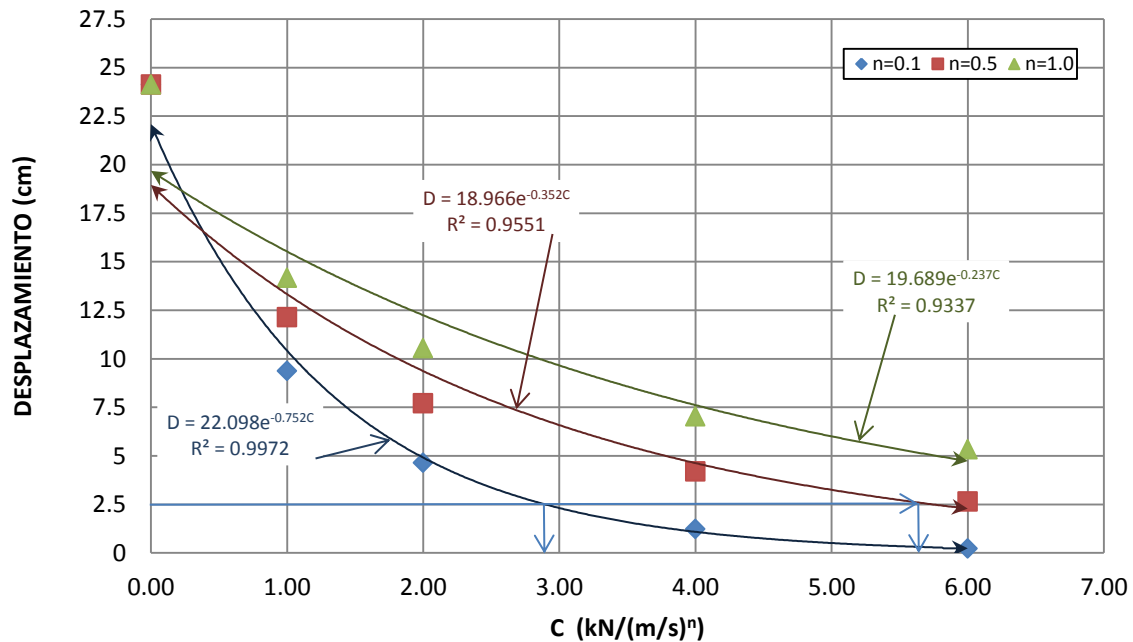


Figura 70.- Desplazamiento para T= 1.75 segundos.

Como se observa en la *figura 70*, existen dos posibles soluciones para el desplazamiento de 2.5 cm: para $n=0.1$ y para $n=0.5$.

Para poder obtener los valores de C se utilizaron las ecuaciones exponenciales que aparecen en la *figura 70*.

Para $n=0.1$:

Se tiene la ecuación: $y = 22.098e^{-0.752x}$, despejando " x " de la ecuación y sustituyendo el valor de 2.5 cm en " y " que es el desplazamiento que se busca, encontramos que el valor de $C = 2.897889 \frac{\text{KN}}{\text{m}} \frac{\text{s}}{\text{s}^2}$.

Para limitar el desplazamiento al valor preestablecido, se debe de calcular el valor de C' a emplear en los amortiguadores del puente.

Para calcular el valor de C' se utilizará la siguiente ecuación:

$$C' = m * c_p * C$$

Donde:

m = Masa total del puente.

C_p = Coeficiente de participación de masa modal en el sentido longitudinal.

C = coeficiente de amortiguamiento.

Sustituyendo los valores en la ecuación encontramos:

$$C' = 3,917.06 \frac{\text{kN}}{\frac{\text{m}}{\text{s}^2}} * 0.9052 * 2.897889 \frac{\text{kN}}{\frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$$

$$C' = 10,274.95 \frac{\text{kN}}{\frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$$

El valor de C' es el total que se necesita para limitar el desplazamiento de 2.5 cm que es el objetivo para que la estructura permanezca en el intervalo elástico, pero como se colocarán dispositivos en ambos extremos del puente este deberá ser la mitad de su valor para cada amortiguador es decir $C'/2$.

$$\frac{C'}{2} = \frac{10,274.95}{2} = 5,137.48 \frac{\text{KN}}{\frac{\text{m}}{\text{s}^2}}$$

Para verificar estos resultados proporcionados por la ayuda de diseño, el valor calculado de C' es el que se introduce en el modelo elaborado en el programa SAP 2000 para poder calcular el desplazamiento que tendrá el puente La Chuta con los amortiguadores viscosos.

Resultados para $n=0.1$:

Desplazamiento objetivo= 2.5cm.

Desplazamiento obtenido en el modelo 3D= 2.64cm.

Diferencia= 0.14cm

Diferencia en %= 5.6%

Para n=0.5:

Se tiene la ecuación: $y = 18.966e-0.352x$, despejando “x” de la ecuación y sustituyendo el valor de 2.5 cm en “y” que es el desplazamiento que se busca, encontramos que el valor de $C = 5,75677522 \frac{KN}{s^2}$.

Para n= 0.5 se seguirá el mismo procedimiento que se utilizo en n=0.1 con lo cual dio el siguiente resultado.

$$C' = 3,917.06 \frac{KN}{s^2} * 0.9052 * 5.75677522 \frac{KN}{s^2} = 20,411.62 \frac{KN}{s^2}$$

$$\frac{C'}{2} = \frac{20,411.62}{2} = 10,205.81 \frac{KN}{s^2}$$

Desplazamiento requerido= 2.5cm.

Desplazamiento en el modelo 3D= 2.62cm.

Diferencia= 0.12cm

Diferencia en %= 4.8%

Los valores presentados son el promedio de los valores máximos obtenidos de los análisis de los modelos sometidos a las diferentes acciones sísmicas.

Como puede observarse los resultados que se muestran para n= 0.1 y n=0.5 tienen una buena aproximación, comparando con los desplazamientos obtenidos del modelo en 3D y el desplazamiento requerido.

Capítulo 5).- Conclusiones.

5.1.- Comentarios finales y conclusiones.

Las Ayudas de Diseño elaboradas en este trabajo son de gran ayuda para los ingenieros civiles o cualquier persona que esté relacionada con el diseño y construcción de puentes ya que con ellas se facilita el proceso de selección del amortiguador viscoso más conveniente, se elaboraron para que la persona que las utilice tenga varias opciones para elegir un amortiguador viscoso, ya que se tiene como variante la constante y la exponente de amortiguamiento.

Esto significa a que si se necesitan un amortiguador con ciertas características como desplazamiento, velocidad, aceleración y fuerza tener varias opciones, donde el determinante puede ser el más económico pero con la misma eficacia que el amortiguador viscoso más caro.

El resultado de la verificación que se realizó para las Ayudas de Diseño muestra un buen comportamiento del modelo simplificado con respecto al modelo en 3D realizado en el programa SAP 2000 del puente La Chuta, ya que la variación que se encontró en el desplazamiento del modelo en 3D con respecto al desplazamiento que se buscó por medio de las Ayudas de Diseño fue mínimo, por lo tanto se puede concluir a que las ayudas de diseño se pueden utilizar para la selección de los amortiguadores viscosos utilizados en puentes.

Con las Ayudas de Diseño realizadas en este trabajo se evita realizar el estudio analítico, que se realizaba para poder saber que amortiguador viscoso era el más conveniente y que cumplía con las características necesarias para tener desplazamientos pequeños.

5.2.- Investigaciones futuras.

- 1.- Ampliar el estudio paramétrico para las diferentes aceleraciones del terreno que hay en la Republica Mexicana, el análisis mostrado anteriormente fue en la zona con mayor sismicidad por lo cual se realizó utilizando una aceleración para el terreno de 500 gals.
- 2.- Estudiar el movimiento transversal que se ocasiona en los puentes para poder así aplicar un tipo de disipador de energía y reducir los desplazamientos transversales y poder evitar daños en la superestructura.
- 3.- Elaborar el estudio paramétrico de un grado de libertad con otros tipos de amortiguadores como puede ser los amortiguadores con exponente de velocidad (n) extra-bajo para tener una mayor gama de posibilidades y que así se pueda aplicar el más conveniente.

Bibliografía

- JERÓNIMO E. Y GUERREIRO L. (2002). "SEISMIC DISPLACEMENT ANALYSIS OF BRIDGES WITH VISCOUS DAMPERS". MEMORIAS DE LAS 12TH EUROPEAN CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING, LONDON, UNITED KINGDOM, ARTICULO NO. 373 (CD ROM).
- WANG Z. HU S. Y GAN L. "ANALITICAL INVESTIGATION OF DE RESPONSE OF BRIDGES WITH ADDED VISCOUS DAMPERS". DEPARMENT OF BRIDGE ENGINEENIRING, TONGJI UNIVERSITY, SHANGHAI, CHINA.
- SERENO J. J. (2004), "RESPUESTA SISMICA DE PUENTES ARCO EMPLEANDO AMORTIGUAMIENTO VISCOS SUPLEMENTARIO" TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA.
- PLIESTLEY, F. SEIBLE Y G.M. CALVI (1996), "SEISMIC DESINGN AND RETROFIT OF BRIDGES", CAP. 4 MODELING AND ANALYSIS, 1996.
- T.T SOONG G.F. DARGUSH (1997), "PASSIVE ENERGY DISSIPATION SYSTEMS IN STRUCTURAL ENGINEERING" CAP. 6 VISCOUS FLUID DAMPERS
- M.J. VELETZOS, J.I. RESTREPO "POST SEISMIC INSPECTION AND CAPACITY ASSESSMENT OF REINFORCED CONCRETE BRIDGE COLUMNS"
- SERGIO IVÁN MARTÍNEZ. (2009), "ESTIMACIÓN DEL NIVEL DE DAÑO EN PILAS DE CONCRETO EN PUENTES CON DISTINTAS CONDICIONES DE APOYO" CAP. 5 TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO POR LA UNIVERSIDAD MICHOACANA.
- COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD (CFE) (2008), "MANUAL DE DISEÑO DE OBRAS CIVILES, DISEÑO POR SISMOS", MÉXICO.
- BOITEL P. Y DE LA FUENTE C. (1998), "ASEISMIC DEVICES FOR BRIDGES", MEMORIAS DEL 13TH FIP CONGRESS, AMSTERDAM, PP. 105-109.

- DATRY J.-B., MARRACCI L., KRIEF A. Y NEANT C. (1998), "PARA-SEISMIC PROTECTION USING VISCO-ELASTIC DAMPING DEVICES. THE SAINT ANDRÉ VIADUCT (A43 HIGHWAY)", MEMORIAS DEL 13TH FIP CONGRESS, AMSTERDAM, PP. 153- 161.
- MEDINA S. I. (2009), "ESTIMACIÓN DEL NIVEL DE DAÑO EN PILAS DE CONCRETO DE PUENTES CON DISTINTAS CONDICIONES DE APOYO", TESIS DE MAESTRÍA (ESTRUCTURAS), UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO, MÉXICO.
- SOCIEDAD MEXICANA DE INGENIERÍA SÍSMICA, A. C. (SMIS, 2000), "BASE MEXICANA DE SISMOS FUERTES", VOL.2, CD-ROM.
- TAYLOR DEVICES INC. (2002), "TAYLOR DEVICES SEISMIC DAMPERS AND SEISMIC PROTECTION PRODUCTS", URL: [HTTP://WWW.TAYLORDEVICES.COM/3SEISMIC.HTM].
- RODRÍGUEZ S. E INGHAM T. J. (1996), "SEISMIC PROTECTIVE SYSTEMS FOR THE STIFFENING TRUSS OF THE GOLDEN GATE BRIDGE", MEMORIAS DE LA 11TH WORLD CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING, ACAPULCO, MÉXICO, ARTÍCULO NO. 1333 (CD-ROM).
- TEYSSANDIER J.-P., COMBAULT J. Y MORAND P. (2000), "THE RION ANTIRION BRIDGE DESIGN AND CONSTRUCTION", MEMORIAS DE LA 12TH WORLD CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING, AUCKLAND, NEW ZEALAND, ARTÍCULO NO. 1115 (CD-ROM).