

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**“COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DE UN PUENTE CURVO Y  
RECTO, CON DISIPADORES SÍSMICOS, EN LA LOCALIDAD DE CAJAMARCA”**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**

**PRESENTADO POR:**

**BACH. HAROLD EDWIN RONALD VILLANUEVA TERÁN**

**ASESOR:**

**ING. MARCOS MENDOZA LINARES**

**CAJAMARCA – PERÚ**

**2024**

## CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

### FACULTAD DE INGENIERÍA

1. Investigador: Harold Edwin Ronald Villanueva Terán  
DNI: 72882507  
Escuela Profesional: Ingeniería Civil
2. Asesor: Ing. Marcos Mendoza Linares  
Facultad: Ingeniería
3. Grado académico o título profesional  
 Bachiller       Título profesional       Segunda especialidad  
 Maestro       Doctor
4. Tipo de Investigación:  
 Tesis       Trabajo de investigación       Trabajo de suficiencia profesional  
 Trabajo académico
5. Título de Trabajo de Investigación:  
"COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DE UN PUENTE CURVO Y RECTO, CON DISIPADORES SÍSMICOS, EN LA LOCALIDAD DE CAJAMARCA"
6. Fecha de evaluación: 19/11/2024
7. Software antiplagio:       TURNITIN       URKUND (OURIGINAL) (\*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: 13 %
9. Código Documento: oid:3117:407293382
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:  
 APROBADO    PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 20/11/2024



**FIRMA DEL ASESOR**

**Nombres y Apellidos: Marcos Mendoza Linares,**

**DNI: 26612819**



Firmado digitalmente por:

BAZAN DIAZ Laura Sofia

FAU 20148258601 soft

Motivo: En señal de  
conformidad

Fecha: 20/11/2024 19:15:22-0500

**UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI**

COPYRIGHT © 2024  
HAROLD EDWIN RONALD VILLANUEVA TERÁN  
Todos los derechos reservados  
Universidad Nacional de Cajamarca

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por concederme la vida y permitirme alcanzar mis metas bajo Su guía y bendición.

A mis padres, José y Ana, por su apoyo incondicional en cada momento y circunstancia de mi vida escolar y universitaria; por ser mi pilar y fortaleza en este camino.

A mis amigos y familiares, quienes de una u otra forma me brindaron su apoyo y compañía en este recorrido; gracias por estar siempre ahí, en las buenas y en las malas.

Al ingeniero Marcos Mendoza Linares, mi asesor, por guiarme con paciencia y sabiduría hacia la culminación de este proyecto; su orientación fue fundamental para lograr este objetivo.

A los ingenieros Christian Gonzalo Salcedo Malaver y Francisco Martos Salas, amigos y maestros, cuya valiosa enseñanza y orientación no solo enriquecieron mi formación académica, sino que también despertaron en mí la curiosidad que dio origen a esta investigación. Sin su apoyo y dedicación, este trabajo no habría sido posible. Y finalmente a todos los docentes de la Universidad Nacional de Cajamarca que comparten su conocimiento a través de la enseñanza, la cual deja una huella imborrable en la vida profesional de cada estudiante; debido a su dedicación y entrega son un ejemplo por seguir.

## CONTENIDO

AGRADECIMIENTO .....	iii
CONTENIDO .....	iv
ÍNDICE DE TABLAS .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
RESUMEN .....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	1
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3 HIPOTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.4 VARIABLES .....	3
1.5 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....	3
1.6 ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.7 LIMITACIONES .....	5
1.8 OBJETIVOS .....	5
1.9 DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO .....	6
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO .....	8
2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	8
2.2 BASES TEÓRICAS.....	12
2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS .....	51
CAPITULO III: MATERIALES Y MÉTODOS .....	55
3.1 UBICACIÓN DONDE SE REALIZÓ LA INVESTIGACIÓN .....	55
3.2 MATERIALES .....	56
3.3 METODOLOGÍA.....	57
3.4 POBLACION DE ESTUDIO .....	58
3.5 MUESTRA .....	58

3.6	UNIDAD DE ANÁLISIS .....	58
3.7	PROCEDIMIENTO.....	58
3.8	TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.....	95
CAPITULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....		133
4.1	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	133
4.2	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	138
4.3	CORROBORACIÓN DE HIPÓTESIS.....	139
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		141
5.1	CONCLUSIONES .....	141
5.2	RECOMENDACIONES.....	142
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		143
APÉNDICE.....		151
ANEXOS .....		165

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características principales de los diferentes tipos de puentes. ....	13
Tabla 2 Valores mínimos permitidos de SRA y SRV.....	26
Tabla 3 Niveles de desempeño sísmico. ....	30
Tabla 4 Rankin de terremotos más destructivos a nivel mundial desde 1900. ....	42
Tabla 5 Coordenadas del puente. ....	56
Tabla 6 Resumen de parámetros de diseño vial.....	59
Tabla 7 Resumen de parámetros para los puentes que serán analizados. ....	60
Tabla 8 Registros sísmicos.....	68
Tabla 9 Parámetros del espectro de diseño. ....	76
Tabla 10 Señales sísmicas usadas en el estudio.....	77
Tabla 11 Parámetros de la estructura del puente. ....	82
Tabla 12 Parámetros del disipador.....	83
Tabla 13 Porcentaje de incremento por cargas dinámicas (IM). ....	85
Tabla 14 Factor de presencia múltiple. ....	87
Tabla 15 Definición de los estados límites aplicados al puente.....	89
Tabla 16 Cuadro de factores de carga.....	91
Tabla 17 Cuadro de resumen. ....	91
Tabla 18 Cuadro de resumen. ....	91
Tabla 19 Cuadro de factores de cargas permanentes. ....	92
Tabla 20 Cuadro de resumen factor modificado de carga. ....	94
Tabla 21 Análisis modal, periodos y frecuencias con disipador sísmico. ....	100
Tabla 22 Análisis modal, periodos y frecuencias con disipador sísmico. ....	101
Tabla 23 Análisis modal, periodos y frecuencias con disipador sísmico. ....	101
Tabla 24 Análisis modal, periodos y frecuencias con disipador sísmico. ....	102
Tabla 25 Análisis modal, periodos y frecuencias con disipador sísmico. ....	103
Tabla 26 Análisis modal, periodos y frecuencias con disipador sísmico. ....	103

Tabla 27 Rangos para determinar el nivel de incidencia de los disipadores. ....	130
Tabla 28 Puntos de desempeño para cada tipología de puente con y sin disipadores. ....	131



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Sección transversal de puente típico con vigas .....	13
Figura 2 Inventarios de puentes de la red vial nacional.....	14
Figura 3 Tipología metálica. ....	15
Figura 4 Dimensiones de una viga tipo I típica. ....	16
Figura 5 Señal en el tiempo para analizar por el método de Fourier. ....	18
Figura 6 Análisis de tratamientos de señales en el tiempo método de Fourier.....	18
Figura 7 Espectro de respuesta de la pseudo - aceleración para la señal sísmica "El Centro", $\zeta=0,2,5,7,10,20$ .....	21
Figura 8 Espectro de respuesta de la deformación para la señal sísmica "El Centro", $\zeta=0,2,5,10,20\%$ . ....	22
Figura 9 Espectro de respuesta de diseño según AASHTO LRFD 2014. ....	23
Figura 10 Espectro de diseño horizontal.....	24
Figura 11 Determinación del punto de desempeño de prueba. ....	27
Figura 12 Determinación del punto de desempeño.....	27
Figura 13 Análisis de desempeño - capacidad de desplazamiento local. ....	28
Figura 14 Curva de capacidad, niveles de desempeño y límites de daños. ....	29
Figura 15 Ciclo de histéresis característico de un disipador activado por velocidad. ....	32
Figura 16 Aplicación de amortiguamiento viscoso en apoyo de puente de concreto. ....	33
Figura 17 Aplicación de amortiguamiento viscoso en puente metálico (Puente Amolanas - Chile). ....	33
Figura 18 Modelos clásicos de materiales viscoelásticos. ....	34
Figura 19 Disipador viscoelástico.....	38
Figura 20 Elemento enlace para el disipador. ....	38
Figura 21 Respuesta sísmica con diferentes amortiguamientos. ....	40
Figura 22 Rotulas plásticas asignadas en la viga de un puente.....	43
Figura 23 Momento curvatura del material mediante una sección I.....	48
Figura 24 Momento curvatura típicos para una sección I de acero. ....	48

Figura 25 Ubicación política del estudio. ....	55
Figura 26 Vista satelital del sitio de estudio. ....	56
Figura 27 Puente curvo con vigas metálicas. ....	59
Figura 28 Puente curvo con vigas metálicas. ....	60
Figura 29 Diagrama de flujo del procedimiento de diseño y evaluación por desempeño. ....	65
Figura 30 Registro sísmico PGA, PGV y PGD corregido en la dirección EW. ....	69
Figura 31 Registro sísmico corregido PGA, PGV y PGD corregido en la dirección NS. ....	69
Figura 32 Registro sísmico corregido PGA, PGV y PGD corregido en la dirección EW. ....	70
Figura 33 Registro sísmico corregido PGA, PGV y PGD corregido en la dirección NS. ....	70
Figura 34 Registro sísmico corregido PGA, PGV y PGD corregido en la dirección EW. ....	71
Figura 35 Registro sísmico corregido PGA, PGV y PGD corregido en la dirección NS. ....	71
Figura 36 Registro sísmico corregido PGA, PGV y PGD corregido en la dirección EW. ....	72
Figura 37 Registro sísmico corregido PGA, PGV y PGD corregido en la dirección NS. ....	72
Figura 38 Registro sísmico corregido PGA, PGV y PGD corregido en la dirección EW. ....	73
Figura 39 Registro sísmico corregido PGA, PGV y PGD corregido en la dirección NS. ....	73
Figura 40 Registro sísmico corregido PGA, PGV y PGD corregido en la dirección EW. ....	74
Figura 41 Registro sísmico corregido PGA, PGV y PGD corregido en la dirección NS. ....	74
Figura 42 Registro sísmico corregido PGA, PGV y PGD corregido en la dirección EW. ....	75
Figura 43 Registro sísmico corregido PGA, PGV y PGD corregido en la dirección NS. ....	75
Figura 44 Espectro de diseño elástico y reducido para la ciudad de Cajamarca. ....	77
Figura 45 Espectros originales en la historia del tiempo. ....	78
Figura 46 Emparejamiento de señales sísmicas. ....	78
Figura 47 Señales sísmicas iniciales en el espectro de diseño para la ciudad de Cajamarca. ....	79
Figura 48 Señales sísmicas escaladas en el espectro de diseño para la ciudad de Cajamarca. ....	80
Figura 49 Diagrama de predimensionamiento de componentes de puente. ....	80

Figura 50 Predimensionamiento para la luz equivalente. ....	81
Figura 51 Numero de vigas de acuerdo con la luz.....	82
Figura 52 Sección típica predimensionada del puente.....	83
Figura 53 Representación matemática de disipador. ....	84
Figura 54 Camión de diseño HL-93.....	84
Figura 55 Tándem de diseño HL-93TDM. ....	84
Figura 56 Definición de elementos de apoyo fijo (Izq.) y Apoyo Móvil (Der.).....	89
Figura 57 Deformación de puente recto.....	96
Figura 58 Deformación de puente recto mediante la envolvente en la dirección X. ....	97
Figura 59 Deformación de puente recto mediante la envolvente en la dirección Y. ....	97
Figura 60 Deformación de puente recto mediante la envolvente en la dirección Z. ....	98
Figura 61 Deformación de puente curvo. ....	98
Figura 62 Deformación de puente curvo mediante la envolvente en la dirección X.....	99
Figura 63 Deformación de puente curvo mediante la envolvente en la dirección Y.....	99
Figura 64 Deformación de puente curvo mediante la envolvente en la dirección Z. ....	100
Figura 65 Resultado de esfuerzos para la viga crítica del puente recto con y sin disipadores. ....	104
Figura 66 Resultado de esfuerzos para la viga crítica del puente curvo con y sin disipadores. ....	105
Figura 67 Desplazamientos de puente recto con y sin disipadores.....	106
Figura 68 Desplazamientos de puente curvo con y sin disipadores.....	107
Figura 69 Desplazamiento en la historia del tiempo del puente recto con disipadores y sin disipadores en las coordenadas X e Y. Obtenido mediante Midas Civil. ....	108
Figura 70 Desplazamiento en la historia del tiempo del puente curvo con disipadores y sin disipadores en las coordenadas X e Y. Obtenido mediante Midas Civil. ....	109
Figura 71 Energía disipada por los disipadores sísmicos incorporados en el puente recto. ....	110
Figura 72 Energía disipada por los disipadores sísmicos incorporados en el puente curvo. ....	111

Figura 73 Diagrama esfuerzo – deformación.....	112
Figura 74 Diagrama esfuerzo – deformación para diferentes casos de estudio para el puente recto con y sin disipadores. ....	113
Figura 75 Diagrama esfuerzo – deformación para diferentes casos de estudio para el puente curvo con y sin disipadores. ....	114
Figura 76 Diagrama momento – curvatura. ....	115
Figura 77 Diagrama momento – curvatura para diferentes espectros con y sin disipadores para el puente recto. ....	116
Figura 78 Diagrama momento – curvatura para diferentes espectros con y sin disipadores para el puente curvo. ....	117
Figura 79 Verificación de rótulas del sismo EQ 1 de acuerdo con la normativa FEMA 440. ....	118
Figura 80 Verificación de rótulas del sismo EQ 2 de acuerdo con la normativa FEMA 440. ....	118
Figura 81 Verificación de rótulas del sismo EQ 3 de acuerdo con la normativa FEMA 440. ....	119
Figura 82 Verificación de rótulas del sismo EQ 4 de acuerdo con la normativa FEMA 440. ....	119
Figura 83 Verificación de rótulas del sismo EQ 5 de acuerdo con la normativa FEMA 440. ....	120
Figura 84 Verificación de rótulas del sismo EQ 6 de acuerdo con la normativa FEMA 440. ....	120
Figura 85 Verificación de rótulas del sismo EQ 7 de acuerdo con la normativa FEMA 440. ....	121
Figura 86 Verificación de rótulas del sismo EQ 1 de acuerdo con la normativa FEMA 440. ....	121
Figura 87 Verificación de rótulas del sismo EQ 2 de acuerdo con la normativa FEMA 440. ....	122
Figura 88 Verificación de rótulas del sismo EQ 3 de acuerdo con la normativa FEMA 440. ....	122
Figura 89 Verificación de rótulas del sismo EQ 4 de acuerdo con la normativa FEMA 440. ....	123
Figura 90 Verificación de rótulas del sismo EQ 5 de acuerdo con la normativa FEMA 440. ....	123

Figura 91 Verificación de rótulas del sismo EQ 6 de acuerdo con la normativa FEMA 440. ....	124
Figura 92 Verificación de rótulas del sismo EQ 7 de acuerdo con la normativa FEMA 440. ....	124
Figura 93 Puntos resaltantes para identificación y análisis del comportamiento de las rotulas en la estructura. ....	125
Figura 94 Puntos de acuerdo con el FEMA 440 para la gráfica de momento curvatura. ....	126
Figura 95 Espectros de amenaza de acuerdo con FEMA 440. ....	127
Figura 96 Punto de desempeño para el puente recto sin disipadores sísmicos por el método de capacidad de acuerdo con el FEMA 440. ....	128
Figura 97 Punto de desempeño para el puente recto con aisladores sísmicos por el método de capacidad de acuerdo con el FEMA 440. ....	128
Figura 98 Punto de desempeño para el puente curvo sin aisladores sísmicos por el método de capacidad de acuerdo con el FEMA 440. ....	129
Figura 99 Punto de desempeño para el puente curvo con aisladores sísmicos por el método de capacidad, de acuerdo con FEMA 440. ....	129
Figura 100 Comparación del punto de desempeño para las tipologías de puente recto y puente curvo. ....	132
Figura 101 Comparación del punto de desempeño para los casos de sin disipadores y con disipadores. ....	132
Figura 102 Punto de desempeño para el puente recto por el método de capacidad de acuerdo con el FEMA 440. ....	134
Figura 103 Punto de desempeño para el puente curvo por el método de capacidad de acuerdo con el FEMA 440. ....	137

## RESUMEN

En la infraestructura vial de Cajamarca se observa la presencia de vibraciones que, en caso de un sismo fuerte, podrían amplificarse y perjudicar la estabilidad de las estructuras viales. Es por lo que esta investigación aborda el problema de mejorar el desempeño sísmico de puentes curvos y rectos, con y sin disipadores sísmicos, para evaluar la eficacia de estos dispositivos en la reducción de daños estructurales en presencia de vibraciones o sismos. El objetivo principal es determinar si los disipadores mejoran significativamente la operatividad de los puentes durante y después de un evento sísmico. Para ello, se modelaron ambas estructuras utilizando el software Midas Civil v2022, aplicando un análisis dinámico no lineal para evaluar fuerzas internas, deformaciones y desplazamientos. Los resultados indicaron que, con disipadores, el desplazamiento espectral se redujo en un 91,22% para el puente curvo y en un 90,23% para el puente recto, mientras que la aceleración espectral disminuyó en un 11,72% y un 8,88%, respectivamente. La rigidez estructural aumentó, con un incremento de la frecuencia fundamental del 17,6% en el puente curvo y del 13,6% en el puente recto. Por ello, se concluye que la incorporación de disipadores sísmicos mejora significativamente la resistencia y funcionalidad de los puentes en zonas sísmicas, especialmente en puentes curvos, que son más vulnerables por su complejidad geométrica. Estos hallazgos destacan la necesidad de implementar disipadores como una estrategia efectiva para reducir el riesgo de daños y aumentar la resiliencia de la infraestructura vial en Cajamarca.

**Palabras clave:** *Puentes, puente metálico, puente curvo, puente recto, desempeño sísmico, disipadores sísmicos, análisis dinámico no lineal.*

## ABSTRACT

Vibrations are observed in the road infrastructure of Cajamarca, which, in the event of a strong earthquake, could be amplified and compromise the stability of road structures. Therefore, this research addresses the problem of improving the seismic performance of curved and straight bridges, with and without seismic dampers, to evaluate the effectiveness of these devices in reducing structural damage in the presence of vibrations or earthquakes. The main objective is to determine whether dampers significantly improve the operability of the bridges during and after a seismic event. To this end, both structures were modelled using Midas Civil v2022 software, applying a non-linear dynamic analysis to evaluate internal forces, deformations, and displacements. The results indicated that, with dampers, the spectral displacement was reduced by 91.22% for the curved bridge and by 90.23% for the straight bridge, while the spectral acceleration decreased by 11.72% and 8.88%, respectively. Structural stiffness increased, with an increment of the fundamental frequency by 17.6% in the curved bridge and by 13.6% in the straight bridge. Therefore, it is concluded that the incorporation of seismic dampers significantly improves the resistance and functionality of bridges in seismic zones, especially in curved bridges, which are more vulnerable due to their geometric complexity. These findings highlight the need to implement dampers as an effective strategy to reduce the risk of damage and increase the resilience of road infrastructure in Cajamarca.

**Keywords:** *Bridges, metallic bridge, curved bridge, straight bridge, seismic performance, seismic dampers, nonlinear dynamic analysis.*

## CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente una de las principales preocupaciones de la ingeniería estructural aplicada a los puentes, es el análisis y diseño de estructuras seguras, eficientes y capaces de soportar cargas estáticas y dinámicas a las que estarán sometidas durante su vida útil (Rodríguez Serquén, 2022), para lo cual se vienen desarrollando un conjunto de tecnologías que permitan mejorar las características estructurales de los puentes para el control de vibraciones, cargas de impacto, etc., entre las cuales podemos mencionar a los disipadores sísmicos de fluido viscoso, disipadores viscoelásticos, disipadores metálicos, aisladores elastómeros con y sin núcleo de plomo, estos tienen por función proteger la estructura durante y después de un evento sísmico, garantizando la integridad y alargando la vida útil de la estructura (Agrawal & Amjadian, 2022). Para analizar adecuadamente el comportamiento de estos dispositivos, instituciones como el FEMA (Federal Emergency Management Agency) y ATC (Applied Technology Council), propone guías como la del FEMA 440 (Improvement Of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures) que establece un análisis con un enfoque de desempeño sísmico el cual se fundamenta en un conjunto de criterios estructurales que debe cumplir la estructura analizada, garantizando de este modo su óptimo nivel de desempeño (Ger & Lau, 2022). Diferentes autores recomiendan aplicar este tipo de enfoque a áreas sísmicamente activas (Vagelis, Georgia, & Yasin, 2017).

El Perú es un país ubicado en una región con una alta incidencia de eventos sísmicos y que además por su orografía accidentada requiere establecer una infraestructura vial que permita la conectividad entre sus regiones (Das, y otros, 2020), esto se ve reflejado en un alto índice de construcción de 120 a 130 puentes por año de acuerdo con el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) los cuales se diseñan de manera tal que puedan resistir ciertas cargas denominado LRFD (Load and Resistance Factor Design), siendo un diseño



ampliamente usado, pero en la actualidad ya se tienen modernos avances en cuanto a las metodologías y filosofías de diseño (Reis & Olivera Pedro, 2019).

En este contexto se ha identificado una deficiencia en la aplicación de metodologías y conceptos modernos en el análisis y diseño de puentes, que podría estar causando vibraciones y posibles fallas ante sismos fuertes en los puentes, especialmente en estructuras esenciales expuestas a condiciones sísmicas perjudiciales (Zhao & Tonia, 2017). Es esencial tener en cuenta que los métodos tradicionales son conservadores que no garantizan un desempeño plenamente operativo durante eventos sísmicos rigurosos, así como la fatiga de los materiales ante vibraciones producto de vehículos o sismos (Huamán Santos & Rojas Ramos, 2023) es por ello por lo que la investigación desarrolla una evaluación en diferentes casos de estudio con diferentes señales sísmicas para determinar un desempeño operacional (Reis & Olivera Pedro, 2019).

Debido a la ubicación geográfica de la región Cajamarca, siendo un factor clave a nivel de diseño estructural, es necesario implementar dispositivos de protección sísmica como los disipadores que mejoran la capacidad operativa de los puentes esenciales. Este estudio, titulado “Comparación del desempeño sísmico de un puente curvo y recto, con disipadores sísmicos, en la localidad de Cajamarca”, se centra en analizar el comportamiento de dichos dispositivos en un puente recto y curvo; propone incorporar disipadores sísmicos y aplicar metodologías modernas para el control de desplazamientos y vibraciones para asegurar que los puentes mantengan su operatividad ante sismos de gran magnitud.

## **1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Cuál es el nivel de desempeño sísmico de un puente curvo y recto con y sin disipadores sísmicos en la Localidad de Cajamarca?

### **1.3 HIPOTESIS DE LA INVESTIGACIÓN**

El nivel de desempeño sísmico de un puente curvo y recto en la localidad de Cajamarca es significativamente mejorado mediante el uso de disipadores sísmicos.

### **1.4 VARIABLES**

#### **1.4.1 Variable Independiente**

- Puente curvo con y sin disipadores sísmicos
- Puente recto con y sin disipadores sísmicos.

#### **1.4.2 Variable Dependiente**

- Desempeño sísmico.

### **1.5 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

La importancia de la investigación radica en establecer lineamientos base para el análisis por desempeño sísmico en puentes curvos y rectos, incorporando disipadores sísmicos, garantizando su correcto comportamiento estructural durante y después de un evento sísmico, así como establecer la importancia de incorporar disipadores sísmicos en la configuración geométrica de los puentes, los cuales reducen el desplazamiento generado por los eventos sísmicos y las fallas producidas por las fuerzas internas de los elementos estructurales.

Desde un enfoque teórico-práctico, la investigación no solo aportará recomendaciones específicas sobre la tipología más adecuada para distintos escenarios sísmicos, sino que también contribuirá a la mejora de la infraestructura vial en el país. Además, ofrece un aporte significativo a nivel de ingeniería estructural, al promover la adopción de tecnologías innovadoras en el análisis estructural de puentes. Asegurar la operatividad de estas infraestructuras tras un sismo fuerte no solo es esencial para la seguridad pública, sino también

para garantizar la conectividad y funcionalidad de las redes viales en regiones vulnerables, como Cajamarca, favoreciendo el desarrollo de estas zonas.

## 1.6 ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación, desarrollo el análisis de un puente metálico de 30 m de longitud de un solo tramo y losa de concreto, con vigas metálicas de alma llena, se planteando un puente curvo y un puente recto, equipado con disipadores sísmicos en la localidad de Cajamarca.

La funcionalidad continua, es un parámetro fundamental de la investigación, comparando los cuatro escenarios y su respuesta estructural, para los elementos comparativos se determinaron los siguientes componentes:

- ✓ Puente recto, establecido como un puente con plataforma recta y vigas metálicas rectas de alma llena, perfiles de forma W conformados, tiene una longitud de 30m, así como un ancho de 9m, arriostrada con perfiles de ángulos y vigas diafragma de perfil I.
- ✓ Puente curvo, establecido como un puente con plataforma curva y vigas metálicas rectas de alma llena, perfiles de forma I conformados, tiene una longitud de 30m, así como un ancho de 9m, un radio de giro de 25m con peralte de 8%, arriostrada con perfiles de ángulos y vigas diafragma de perfil I.
- ✓ Disipador de energía de tipo fluido viscoso, establecido como un cilindro hidráulico, el cual tiene como material principal el acero y el fluido viscoso, funcionando de manera tal que disipe energía por medio de la velocidad en ambos casos para el puente (Curvo y recto).

La determinación del desempeño se realizó mediante el análisis dinámico tiempo historia, adaptando metodologías establecidas en el ASHTO LRFD 2020 y FEMA 440, la

determinación de los resultados obtenidos fue mediante el software de Midas Civil 2020, donde se limitó a la superestructura.

## **1.7 LIMITACIONES**

La principal limitación del estudio es el ensayo propuesto por la norma E031 para los disipadores, que implica evaluar sus propiedades físicas y mecánicas, especialmente la rigidez efectiva. Debido a la falta de disponibilidad para realizar este ensayo, se optará por una solución matemática utilizando una ecuación empírica propuesta por especialistas en el tema.

Otra limitación es la hipótesis de movimiento sísmico uniforme, dado que la longitud de ambos apoyos es de 30 m, lo cual restringe el análisis. Además, existe la falta de estudios geológicos y geotécnicos básicos para determinar el perfil estratigráfico de la zona, así como de estudios geofísicos avanzados que incluyan perforación con diamantina para definir los parámetros del sitio. En ausencia de estos datos, se adaptarán los valores según el manual de puentes y los mapas de isoaceleraciones disponibles.

## **1.8 OBJETIVOS**

### **1.8.1 Objetivo general**

Comparar el nivel de desempeño sísmico de un puente curvo y recto con y sin disipadores sísmicos en la Localidad de Cajamarca.

### **1.8.2 Objetivos Específicos**

- Determinar el desempeño sísmico de un puente recto sin disipadores sísmicos en la Localidad de Cajamarca.
- Determinar el desempeño sísmico de un puente curvo sin disipadores sísmicos en la Localidad de Cajamarca.

- Determinar el desempeño sísmico de un puente recto con disipadores sísmicos en la Localidad de Cajamarca.
- Determinar el desempeño sísmico de un puente curvo con disipadores sísmicos en la Localidad de Cajamarca.

## **1.9 DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO**

La siguiente investigación consta de los siguientes capítulos, de los que se describirá su contenido.

### **CAPITULO I: INTRODUCCIÓN**

Este capítulo define el marco general del estudio, planteando el problema, hipótesis, objetivos, alcances y limitaciones. Proporciona el contexto y relevancia del análisis de puentes sísmicos, y describe la estructura de los capítulos siguientes.

### **CAPITULO II: MARCO TEÓRICO**

Este capítulo presenta el marco conceptual y teórico, revisando teorías y estudios previos relevantes. Define conceptos clave y proporciona un contexto académico sólido, situando la investigación dentro del conocimiento existente y clarificando su enfoque.

### **CAPITULO III: MATERIALES Y MÉTODOS**

Este capítulo detalla el proceso de investigación, describiendo la ubicación del estudio, pasos metodológicos, recolección de datos y análisis, para asegurar la transparencia y reproducibilidad del estudio, proporcionando una guía clara para futuros investigadores.

### **CAPITULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

Este capítulo presenta los datos recopilados, junto con su análisis, interpretación y discusión crítica. Se conectan los hallazgos con los objetivos y preguntas de investigación, validando hipótesis y discutiendo implicaciones, comparándolos con estudios previos y evaluando su relevancia.

## **CAPITULO V: CONCLUSIONES RECOENDACIONES**

Este capítulo final resume los hallazgos clave, ofrece conclusiones por objetivo, y propone recomendaciones prácticas y teóricas para guiar futuras investigaciones y mejorar prácticas.

Concluye con una síntesis clara de la investigación, sus implicaciones y pasos futuros.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

## **ANEXOS**

## CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

#### 2.1.1 Antecedentes Internacionales

Joya, Laura (2016, págs. 93-94). En su tesis profesional “*Disipadores y Aisladores Sísmicos, Modelo de Puente Vehicular con Disipador y sin Disipador de Energía, Comparación de la Respuesta Sísmica*”, describe los aisladores y disipadores de energía, realizando un modelo matemático aplicando sistema de control pasivo que permite identificar las posibles ventajas, en desplazamientos y esfuerzos, al implementar estos sistemas, lo cual el uso de un sistema de disipación de energía en el modelo de un puente vehicular mostró una notable reducción en las fuerzas internas y desplazamientos, proporcionando una mayor estabilidad durante el análisis modal de un evento sísmico en Pereira. Se comprobó que estos sistemas disminuyen los tiempos entre oscilaciones, ya que el periodo del modelo con aislador aumentó en casi un 35% en comparación con el modelo convencional (0.9844 s-1 frente a 0.6624 s-1). Este incremento en el periodo, acompañado por una disminución en la frecuencia, demuestra que el modelo con disipador ofrece mayor seguridad y estabilidad. Además, las pilas del puente presentaron menor desplazamiento, con una reducción de hasta un 92% en los esfuerzos máximos (524,33 kN), lo que confirma la viabilidad de implementar tecnologías de protección sísmica.

Grases, José (2016, pág. 404), en el estudio “*Desempeño Sísmico de Puentes y Guía para Proyectos*”, se analizó una guía para proyectos que tengan relación con el desempeño de puentes, en una primera parte sintetiza la información referente al desempeño sísmico en puentes, presentando casos referidos al desplome de puentes por movimientos sísmicos, otros casos referidos a la protección de puentes sin verificación alguna. Mostrando en su estudio variedad de caso, en las que se muestran en conjuntos para determinar niveles de desempeño, o mayor probabilidad de fallar frente a un posible evento sísmico.

Shinsuke Yamazaki, Tsutomu Usami, Tetsuya Nonaka (2016), en su estudio “*Desarrollo de un nuevo amortiguador sísmico de tipo histerético (BRRP) para puentes de acero*”. Se han desarrollado nuevos amortiguadores sísmicos denominados BRRP (Buckling-Restrained Rippled Plate). Estos amortiguadores, similares a los BRB (Buckling-Restrained Brace), utilizan una placa ondulada 2D como elemento central. Los BRRP actúan como soportes elásticos en terremotos pequeños a moderados y como disipadores de energía en terremotos grandes. Diseñados para soportar terremotos significativamente grandes, han demostrado un mejor desempeño en deformación y fatiga de bajo ciclo en comparación con los BRB convencionales. Esto se ha verificado mediante pruebas de carga cíclica y análisis numéricos.

Héctor A. Sánchez-Sánchez, Luz María Juárez Sandoval, Armando Gallego Suarez (2019), en el estudio “*Comportamiento sísmico de puentes urbanos de concreto con dispositivos disipadores de energía*”, en esta investigación se estudian tres configuraciones de un puente de concreto con dispositivos disipadores de energía, cuyo objetivo es aumentar el periodo fundamental y el nivel de amortiguamiento. Se modelan numéricamente en 3D con apoyos continuos, articulados y con aislamiento, y se analizan sus periodos, frecuencias y formas modales. Se realizan análisis no lineales utilizando señales sísmicas reales del Pacífico mexicano y se varían la geometría de las columnas y dispositivos. Los resultados muestran la respuesta de las estructuras y los ciclos histeréticos de los disipadores, comparando los modelos con diferentes tipos de apoyos.

Ying-Xin, Long-Shan, Long-Shan, Ya-Jun, & Dong-Sheng (2023), en su investigación “*Mitigación sísmica de puentes de vigas continuas equipados con amortiguadores de acero inoxidable en forma de U bajo excitaciones sísmicas cercanas a fallas*”, desarrolla ensayos a los puentes cercanos a fallas sísmicas pueden sufrir daños severos durante terremotos. Para



mejorar el desempeño sísmico de puentes de vigas continuas, este estudio presenta un sistema combinado de disipación de energía (CEDDS), que incluye cojinetes de aislamiento y amortiguadores de acero inoxidable en forma de U. Estos amortiguadores están ubicados entre cada par de cojinetes y fijados a las vigas y tapas de doblado. El análisis numérico y experimental demuestra que los amortiguadores de acero en forma de U reducen eficazmente el desplazamiento relativo entre vigas y tapas, mejorando la capacidad de disipación de energía y reduciendo los riesgos de colapso.

### **2.1.2 Antecedentes Nacionales**

Barroso Sandoval, Jeick Engels Carrillo Huancajulca, José Luis (Sandoval & Huancajulca, 2020) en su estudio “*Análisis del desempeño sísmico mediante procedimientos no Lineales del Puente Chamán km 701 en el distrito de Chepén*” donde, se obtuvo el comportamiento real de la estructura, por lo tanto, se pueden predecir los daños que sufrirá el puente después de ocurrir un sismo, lo cual se evaluó el desplazamiento de capacidad del puente considerando las propiedades del concreto, el acero de refuerzo y la geometría del pilar. Para sismos raros ( $Tr = 475$  años), se determinó un desplazamiento de demanda de 0.36 cm en el eje transversal y 6.75 cm en el eje longitudinal, mientras que para sismos muy raros ( $Tr = 1000$  años), los valores fueron 0.43 cm y 7.76 cm, respectivamente. El desplazamiento de capacidad fue de 0.91 cm en el eje transversal y 6.68 cm en el eje longitudinal. Se concluyó que para un sismo con  $Tr = 475$  años, el puente Chamán estaría en un estado límite de prevención de colapso, con daños significativos no reparables. En caso de un sismo con  $Tr = 1000$  años, el puente entraría en un estado de colapso total, lo que implicaría que dejaría de funcionar completamente.

Ramos Pariona (2022), en su investigación “*Evaluación del desempeño sísmico de un puente curvo de concreto armado mediante un análisis estático no lineal – puente amazonas*”

en la ciudad de Huancayo, Junín – Perú”, lo cual se determinó que el desempeño sísmico del puente es adecuado, manteniéndose dentro de los niveles operacionales y funcionales sin exceder el de seguridad de vida para las demandas sísmicas propuestas. El puente puede desplazarse aproximadamente 35 cm en el eje X ante una fuerza de 3000 toneladas y 46.57 cm en el eje Y con una fuerza de 5672.85 toneladas. El mecanismo de falla se presenta principalmente por flexión en las partes superiores de las columnas cercanas al borde con mayor curvatura del puente.

Huerta Guzmán (2022), en su investigación “*Comparación del desempeño sísmico de un puente con aisladores y un puente con disipadores de fluido viscoso, para lo cual se tomó el caso de estudio del puente Quilca*”, Se evaluó el desempeño sísmico del puente Quilca frente a la demanda sísmica del Manual de Puentes del MTC 2017 mediante un análisis estático no lineal (push over) en las direcciones longitudinal y transversal. Se estudiaron tres casos: el puente en su estado actual, la inclusión de un sistema de aislamiento sísmico con dispositivos LRB (núcleo de plomo), y un sistema híbrido que combinaba aislamiento sísmico y disipadores de fluido viscoso. Se realizaron análisis modales espectrales y tiempo-historia no lineal para los tres casos, obteniendo datos de desplazamientos, fuerzas, momentos, periodos y amortiguamiento. Los resultados fueron discutidos y comparados gráficamente, identificando la opción con mejor comportamiento sísmico.

### **2.1.3 Antecedentes Locales**

Zambrano de la Cruz (2023), en su estudio “*Vulnerabilidad Sísmica del Puente Malcas-Condebamba-Cajabamba-Cajamarca*”, evalúa la vulnerabilidad sísmica del Puente Malcas mediante dos métodos: el índice de vulnerabilidad y el espectro de capacidad, considerando diferentes escenarios sísmicos. Para el índice de vulnerabilidad, se realizó una inspección visual técnica del puente, evaluando nueve parámetros para calcular dicho índice. En el método

del espectro de capacidad, se determinó el punto de desempeño de la estructura ante tres escenarios sísmicos mediante un análisis estático no lineal (Pushover) con el software CSI Bridge. Los resultados de ambos métodos fueron muy similares, lo cual sugiere que el método del índice de vulnerabilidad, por ser un análisis simplificado, es adecuado como primer filtro para identificar la vulnerabilidad de un puente, permitiendo posteriormente realizar estudios más detallados, como el análisis mediante el método de espectro de capacidad. Ante sismos con periodos de retorno de 500, 1000 y 2500 años, se concluyó que el puente presenta daños moderados, con daño estructural leve y no estructural moderado, recomendando la incorporación de dispositivos de protección sísmica y análisis con otros softwares como midas civiles.

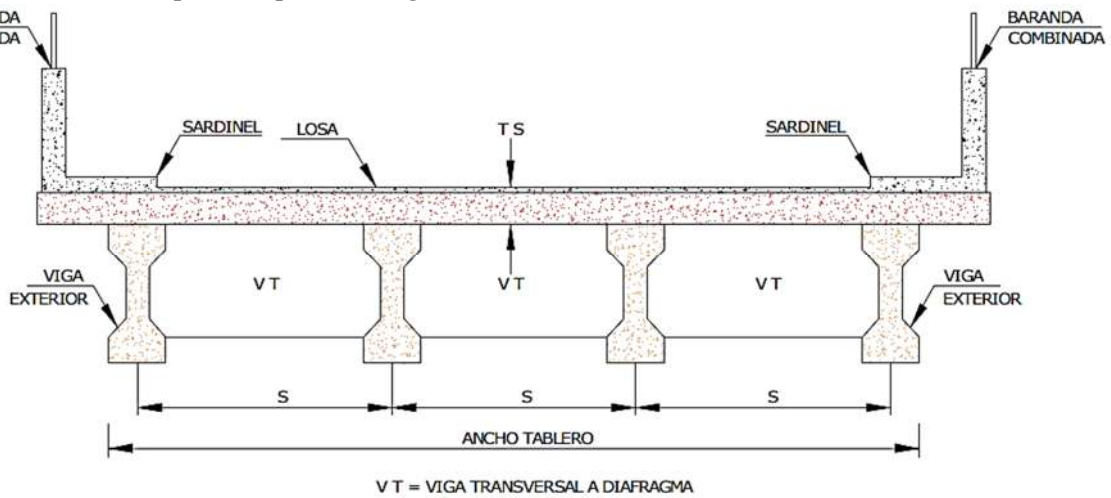
## **2.2 BASES TEÓRICAS**

Conforman la base teórica que sustenta los principales planteamientos que respaldan el problema de investigación.

### **2.2.1 Puente**

El manual de Puentes (MTC, 2018) define un puente como una estructura que salva un accidente geográfico o un obstáculo, ya sea natural (río, valle) o artificial (carretera, ferrocarril), con una luz libre mínima de 6.00 m (20 pies). Es un componente clave de la infraestructura vial, ya que permite la continuidad del tránsito, mejorando la conectividad y seguridad. Los puentes pueden ubicarse tanto sobre como por debajo de una carretera, dependiendo del diseño y necesidades del terreno. Su construcción requiere materiales específicos y técnicas de ingeniería que garanticen la resistencia a cargas y condiciones ambientales adversas, asegurando la durabilidad de la estructura y su contribución al desarrollo económico de la región donde se encuentran (MTC, 2018).

Figura 1  
Sección transversal de puente típico con vigas



Fuente: Imagen tomada del Manual de Puentes (2018).

El manual de Puentes (MTC, 2018), existen una gran cantidad de variaciones de los puentes, desde su invención en la prehistoria realizado quizá por la composición de un árbol colocado en un desnivel, hasta la actualizada que existen puentes atirantados siendo los más complejos, las tipologías descritas en la tabla 1, determinan ciertos criterios como la composición de transferencia de esfuerzos pueden ser viga – losa, cables, péndolas de acero.

Tabla 1  
Características principales de los diferentes tipos de puentes.

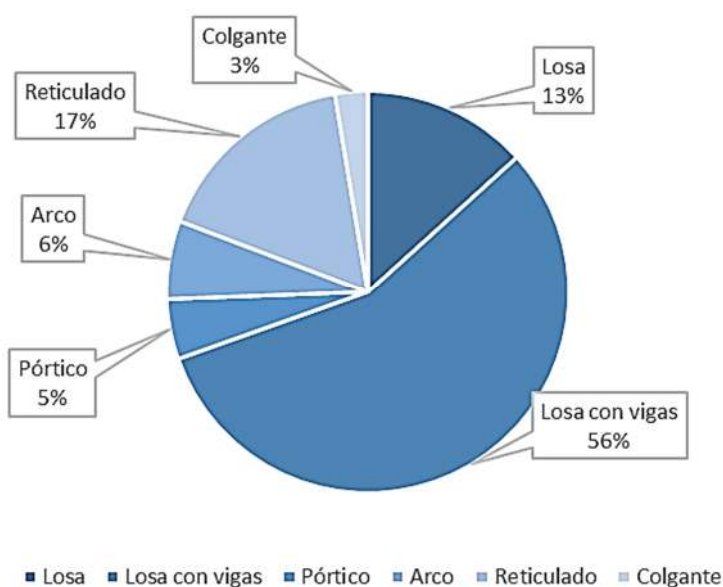
Tipo de puente	Características material		Condiciones bordes	Sección transversal	Peralte h	Ubicación tablero	Geometría plana
Losa	Concreto armado,	concreto Pretensado	Simp. Apoyado continuo	Losa sólida losa nervada losa celular	Constante variable	Tablero superior	Recto enviajado curvo
Losa con vigas	Viga conc. Armado, Viga conc. Pretensado, viga acero		Simp. Apoyado continuo gerber	Viga recta viga i Viga cajón	Constante variable	Tablero superior	Recto enviajado curvo
Pórtico	Concreto armado, Concreto Pretensado, acero		Articulado empotrado con volados atirantados	Viga recta viga i Viga cajón	Constante variable	Tablero superior	Recto enviajado curvo
Arco	Concreto armado	acero	Articulados empotrados	Losa vigas	Constante variable	Tab. Superior Tab. Intermedio Tab. Inferior	Recto
Reticulado	Acero		Simp. Apoyo continuo gerber	Varios	Constante variable	Tab. Superior	Recto

Colgante	Cables de acero + Acero	En torre en viga de Rigidez En cables en torre	Varios	Variable	Tab. Inferior	Recto
Atirantado	Cables de acero + acero	En viga de Rigidez simp. Apoyado En cables En torre en viga de rigidez Simp. Apoyado	Varios	Variable	Tab. Inferior	Recto
Modular	Acero	Sobre terreno	Varios	Variable	Tab. Inferior	Recto
Alcantarilla	Concreto acero	Sobre terreno	Celular (1 o más) super spam (1 o más)	Constante	Tab. Superior	Recto enviajado

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2006).

En el Perú, las tipologías de puentes más utilizadas, como se muestra en la figura 2, son los puentes viga-losa debido a su capacidad y eficiencia a un costo económico. Esta tipología incluye puentes metálicos y preesforzados, que son preferidos en la mayoría de los proyectos a nivel nacional debido a su capacidad para soportar grandes luces (Actualidad y Futuro de la Gestión de Puentes, 2019)

Figura 2  
Inventarios de puentes de la red vial nacional

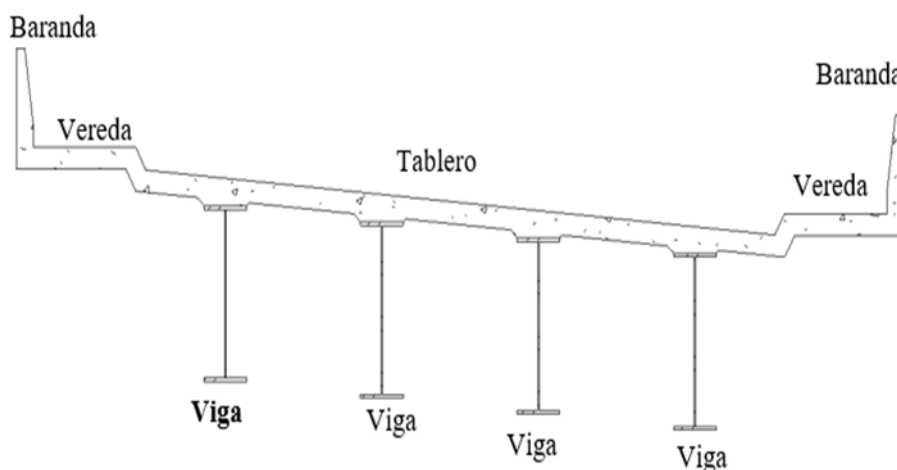


Fuente. (Actualidad y Futuro de la Gestión de Puentes, 2019)

EL Perú posee puentes en su mayoría de tipo viga losa, de los cuales los puentes metálicos son los más usados a nivel nacional, y se ejecutan más de 51 puentes de este tipo al año, siendo inversiones sociales que generan un gran aporte a la económica de las ciudades, por ello en la ingeniería estructural, se plantean metodologías para su protección, así como para su mejor comportamiento frente a sismos fuertes (Xinkui, Lanri , & Heying, 2021).

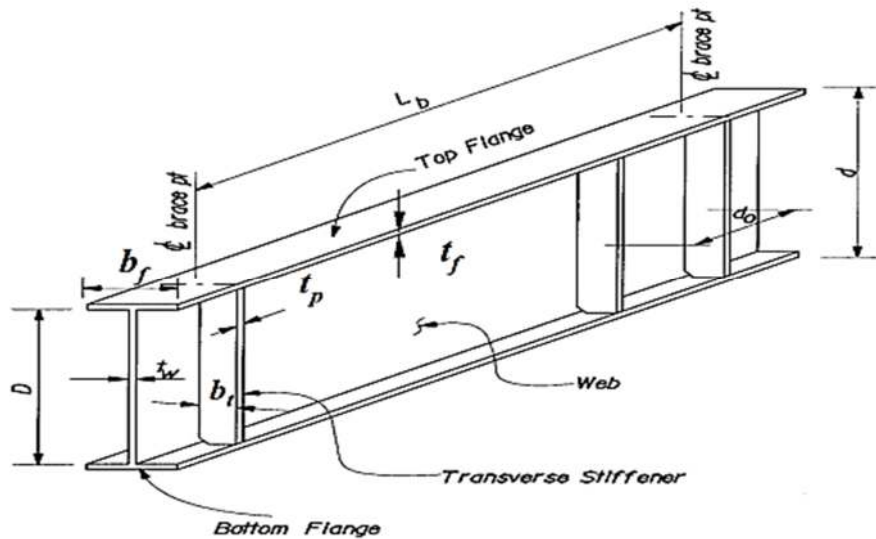
Los puentes de tipo viga-losa están siendo demandados en la mayoría de los proyectos, por su rápida ejecución y su eficiencia a bajo costo. Estos puentes están compuestos por vigas tipo I, que tienen una gran capacidad de carga y estabilidad estructural. El material recomendado, según las normas ASTM, es el acero A709, A709M de grado 36, conocido por su alta resistencia y durabilidad. Además, estas vigas metálicas permiten una mayor longitud de vano sin necesidad de apoyos intermedios, lo que resulta en una reducción en los costos de mantenimiento y una mayor vida útil de la estructura. Las dimensiones y especificaciones de estas vigas están detalladas visualmente en la figura 4, lo que facilita su diseño y aplicación en diversos proyectos de infraestructura (State of California Department of Transportation, 2022).

*Figura 3*  
*Tipología metálica.*



*Fuente: (State of California Department of Transportation, 2022)*

Figura 4  
Dimensiones de una viga tipo I típica.



Fuente: (State of California Department of Transportation, 2022)

### 2.2.2 Sismo

Los terremotos son fenómenos que representan la liberación súbita de energía en el interior de la Tierra, a través de la ruptura de las capas de la corteza, se manifiesta como movimientos ondulatorios que pueden alcanzar diferentes amplitudes y magnitudes. (INDECI, 2018)

La sismología estudia cómo las ondas sísmicas y las variaciones en propiedades físicas revelan la estructura interna de la Tierra. Un sismómetro registra el movimiento del suelo, generando un sismograma que contiene información sobre la fuente de las ondas y el medio por el cual han viajado. Estos registros miden movimientos en tres componentes: Norte-Sur, Este-Oeste y Arriba-Abajo. Para estudios técnicos, es necesario corregir las señales mediante métodos matemáticos o mediante aprendizaje profundo y autónomo. (Harpreet, 2022).

Los métodos más prácticos para tratar señales sísmicas generan espectros de respuesta basados en tiempo, desplazamiento, velocidad y aceleración escalada, es mediante la transformada de Fourier como se muestra en la figura 4 y 6. El análisis de tiempo-historia,

iniciado a partir de una señal sísmica, es el método más utilizado para diseños sismorresistentes dinámicos elásticos e inelásticos. Además, existe el análisis Pushover, un análisis estático inelástico no lineal determinado por modelos tridimensionales, lineal, Clough y bilineal para la corrección de las señales (Harpreet, 2022).

Para el estudio se usará el modelo del polinomio lineal para línea base y por Butterworth – Band stop para ruido:

$$S_{\text{corregida}}(t) = S(t) - (at + b) \quad (1)$$

Donde podemos escribir:

- ✓  $S(t)$  es la señal sísmica original.
- ✓  $S_{\text{Corregida}}(t)$  es la señal corregida por línea base.
- ✓  $at + b$  es el Polinomio lineal que representa la derivada de línea base.
- ✓  $a$  y  $b$  son los coeficientes que se determinan mediante el método de mínimos cuadrados, minimizando la diferencia entre la señal observada y la tendencia lineal.

El ajuste de los coeficientes  $a$  y  $b$  se puede hacer minimizando la función de error:

$$E(a, b) = \sum_{i=1}^N [S(t_i) - (at_i + b)]^2 \quad (2)$$

- ✓ Donde  $N$  es el número total de puntos en la señal.

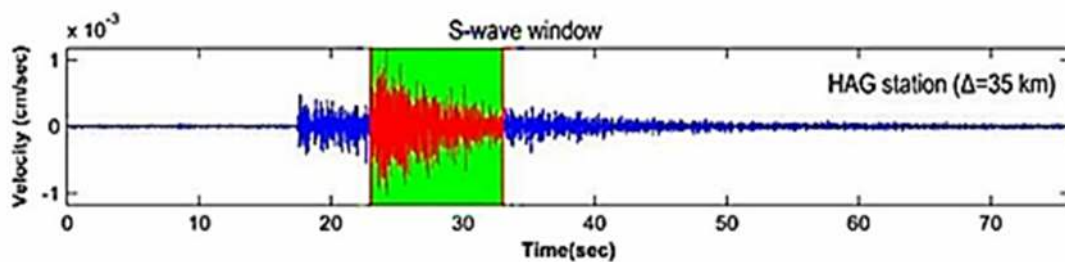
$$H(s) = \frac{1}{1 + \left( \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \right)^n} \quad (3)$$



Donde podemos escribir:

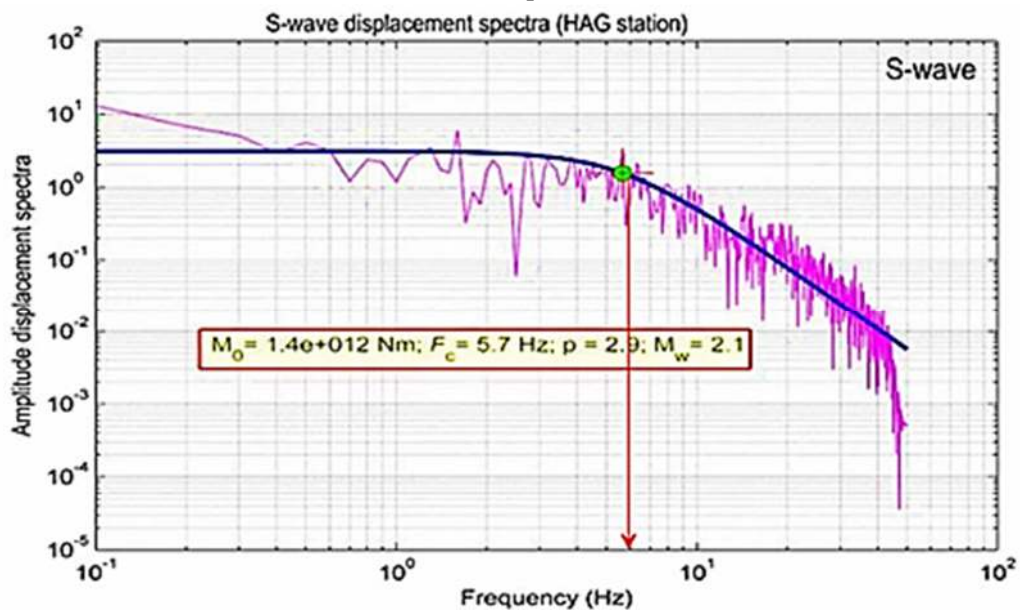
- ✓  $S = j\omega$  es la variable de Laplace, donde  $j$  es la unidad imaginaria y  $\omega$  es la frecuencia angular.
- ✓  $\omega_{0,k}$  son las frecuencias centrales para eliminar.
- ✓  $\xi_k$  es el factor de amortiguamiento asociado a cada frecuencia  $\omega_{0,k}$ , que controla la amplitud y ancho del rechazo.
- ✓  $n$  es el orden del filtro (cuanto mayor sea el valor de  $n$ , más abrupta será la transición entre las bandas de paso y las de rechazo).

Figura 5  
Señal en el tiempo para analizar por el método de Fourier.



Fuente: (Korrat, Lethy, ElGabry, Hussein, & Othman, 2022).

Figura 6  
Análisis de tratamientos de señales en el tiempo método de Fourier.



Fuente: (Korrat, Lethy, ElGabry, Hussein, & Othman, 2022).

Los acelerogramas que se usaran para cierto estudio de ingeniería estructural, se seleccionan 3 registros sísmicos de acuerdo con el Manual de Puentes tomando los valores máximos, para el caso de seleccionar 7 u 11 registros sísmicos, se realizara el promedio de los resultados, estas señales sísmicas serán corregidas y mediante una evaluación de compatibilidad, se procederán al escalamiento de los registros sísmicos este escalamiento a un espectro de respuesta será realizado mediante el algoritmo de Al Atik y Abrahamson para el ajuste de acelerogramas se basa en la minimización iterativa de la diferencia entre el espectro objetivo y el espectro de respuesta del acelerograma para el escalado ponderado basado en el espectro objetivo de Newmark-Hall. Utiliza un enfoque de "matching" en el dominio del tiempo y usando softwares como el SeismoMatch para el escalamiento, donde se aplican funciones de ajuste a la serie temporal del acelerograma (Rui, Dongsheng, & Chunxu, 2022).

#### **2.2.2.1 Espectro de respuesta**

El espectro de respuesta es una herramienta crucial en la ingeniería sísmica que ayuda a entender cómo una estructura responde a diferentes frecuencias de movimiento sísmico. Introducido por M. A. Biot y popularizado por G. W. Housner, este concepto se utiliza para caracterizar la respuesta máxima de sistemas con un grado de libertad (1GDL) sometidos a movimientos del terreno. Espectro de Deformación: Representa el máximo desplazamiento de la estructura en función del periodo natural  $T_n$ . Espectro de Velocidad Relativa: Muestra la velocidad máxima alcanzada. Espectro de Aceleración: Indica la máxima aceleración experimentada. Estos espectros se grafican para diferentes valores de amortiguamiento  $\zeta$ , permitiendo cubrir una amplia gama de condiciones estructurales. Esta representación facilita a los ingenieros el diseño de estructuras que puedan soportar mejor los efectos de los terremotos, asegurando que no resuenen con las frecuencias del movimiento sísmico. (Chopra A. K., 2020, pág. 197).

Proceso para Para desarrollar el espectro de respuesta de un componente de movimiento del suelo  $\ddot{u}_g(t)$ , se siguen los siguientes pasos:

1. **Definición Numérica:** Definir numéricamente la aceleración del suelo  $\ddot{u}_g(t)$ , normalmente con datos tomados cada 0.02 segundos.
2. **Selección de Parámetros:** Seleccionar el periodo de vibración natural  $T_n$  y la razón de amortiguamiento  $\zeta$  de un sistema de un grado de libertad (SDF).
3. **Cálculo de la Respuesta:** Calcular la respuesta de deformación  $u(t)$  del sistema SDF debido al movimiento del suelo  $\ddot{u}_g(t)$ , usando métodos numéricos.
4. **Determinación del Valor Pico:** Determinar  $u_0$ , el valor máximo de  $u(t)$ .
5. **Ordenadas Espectrales:** Calcular las ordenadas espectrales:
  - ✓ Desplazamiento  $D = u_0$
  - ✓ Velocidad  $V = (2\pi/T_n)D$
  - ✓ Aceleración  $A = (2\pi/T_n)^2 D$
6. **Repetición:** Repetir los pasos 2 a 5 para un rango de valores  $T_n$  y  $\zeta$  que cubran todos los posibles sistemas de interés en ingeniería.
7. **Presentación Gráfica:** Presentar los resultados gráficamente para producir espectros de respuesta separados o combinados.

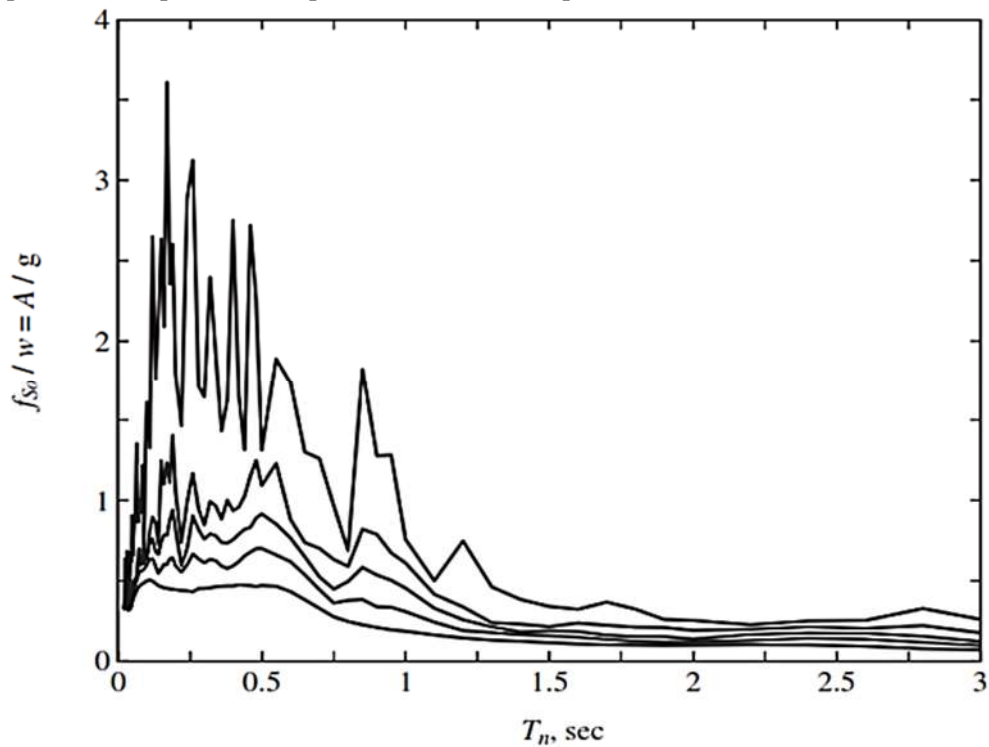
Generar un espectro de respuesta sísmica requiere un esfuerzo computacional considerable. Se necesita un análisis dinámico completo para determinar la variación temporal de la deformación de un sistema SDF, proporcionando datos para un punto en el espectro correspondiente a los valores de  $T_n$  y  $\zeta$ . Cada curva en el espectro de respuesta puede generarse a partir de datos para múltiples valores de  $T_n$ , espaciados desigualmente en el rango de 0.02 a 50 segundos. Este proceso iterativo y detallado es fundamental para obtener resultados precisos que permitan a los ingenieros evaluar, diseñar y garantizar la seguridad estructural frente a

eventos sísmicos, adaptándose así a las normativas y códigos vigentes (Chopra A. K., 2020, pág. 204).

Como sabemos, el espectro de respuesta nos permite evaluar y diseñar estructuras capaces de resistir terremotos, considerando cómo diferentes frecuencias naturales y niveles de amortiguamiento afectan la respuesta estructural. La representación gráfica resultante en la figura 7 y el tiempo y la deformación en escala logarítmica definidos en la figura 8, son clave para entender el comportamiento de las estructuras frente a eventos sísmicos y garantizar su seguridad y estabilidad. Para la obtención del espectro de respuesta es necesario realizar un proceso iterativo y computacional, existe gran variedad de programas, así como algoritmos en lenguaje computacional que procesa la señal sísmica para transformarla en un espectro de respuesta. (Chopra A. K., 2020, pág. 203).

Figura 7

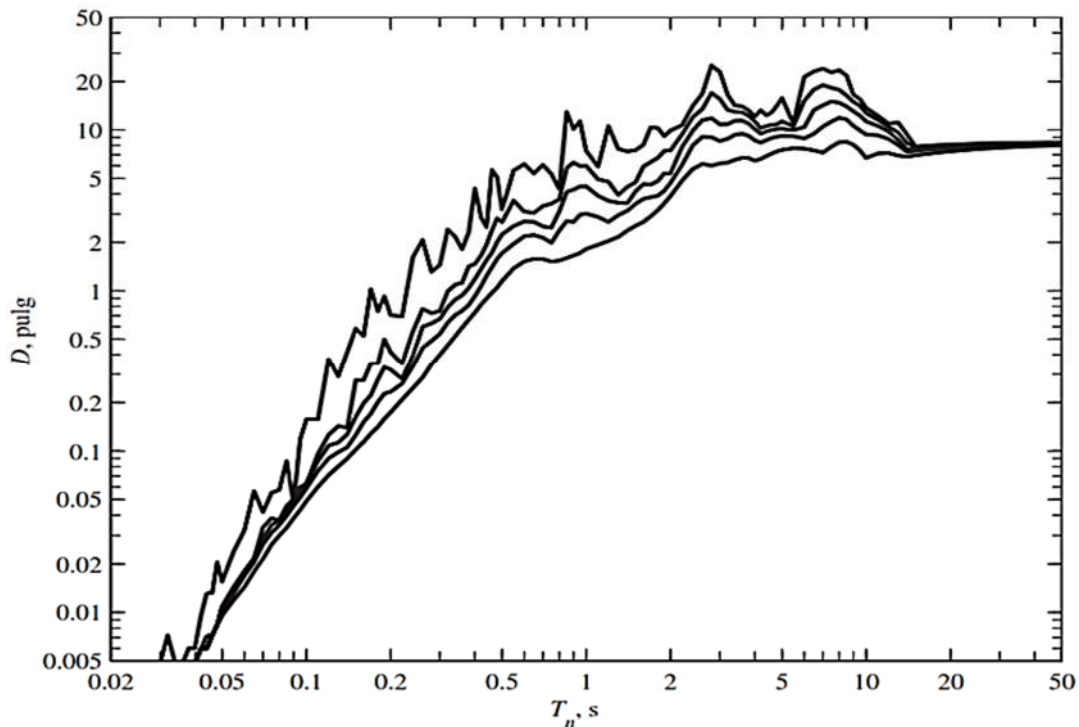
Espectro de respuesta de la pseudo - aceleración para la señal sísmica "El Centro",  $\zeta=0,2,5,7,10,20$



Fuente: (Chopra A. K., 2020, pág. 203).

Figura 8

Espectro de respuesta de la deformación para la señal sísmica "El Centro",  $\zeta=0,2,5,10,20\%$ .



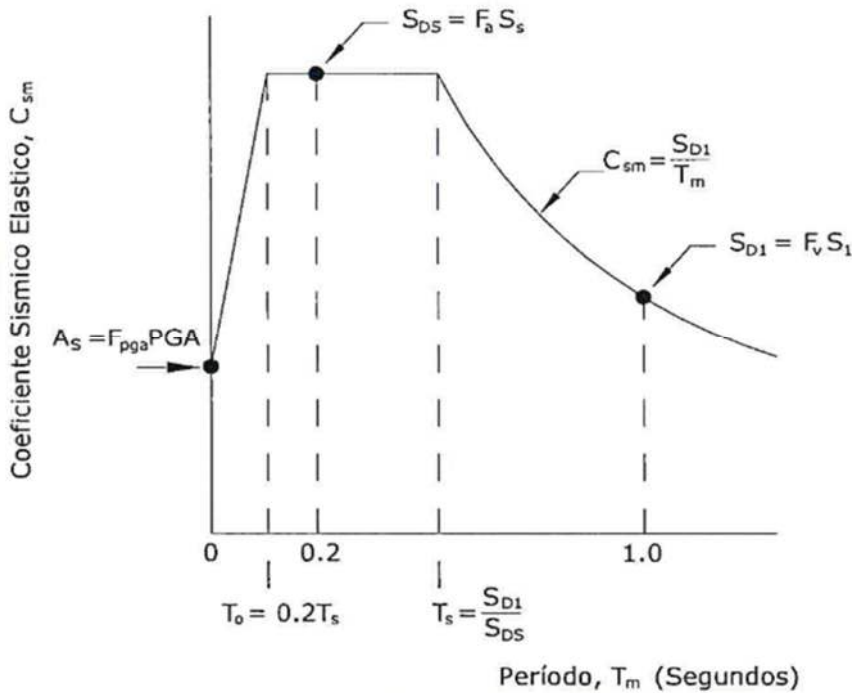
Fuente: (Chopra A. K., 2020, pág. 203).

### 2.2.2.2 Espectro de diseño

Determinado por registros de acelerogramas o por la normativa o códigos de cada país, este determinara la demanda que las estructuras puedan experimentar durante su vida útil debido a la ocurrencia de un sismo sintético o real, muchos de los códigos están basados en la aceleración máxima, para el uso en puente, el espectro de diseño se determina por el Manual de Puentes, el que determina un espectro para una baja probabilidad de colapso, donde si puede sufrir daños significativos e interrupciones del servicio que tengan 7% de probabilidad de excedencia en 75 años, para el requerimiento de mayores desempeños, serán autorizados por el área usuaria. El espectro tiene parámetros que se muestra en la figura 9, siendo base para la construcción el coeficiente de respuesta elástica  $C_{sm}$ , el cual se debe ajustar en base al factor de modificación de respuesta  $R$ , especificamos un análisis en base al sitio del proyecto, donde obtendrá parámetros como el coeficiente de Sitio  $F_{pga}$  y  $F_a$ , así como  $F_v$ . Por otro lado, los parámetros de  $S_1$  y  $S_5$  se obtienen por ordenadas 1.0s y 0.2s respectivamente del mapa de

isoaceleraciones para  $T = 1000$  años, así como  $PGA$  para la ordenada 0.0s. Teniendo como resultado un espectro de diseño, así como se muestra en la figura 10 (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018).

Figura 9  
Espectro de respuesta de diseño según AASHTO LRFD 2014.



Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018, pág. 114).

Teniendo las ecuaciones para establecer el parámetro del Coeficiente Sísmico elástico para cada determinado periodo:

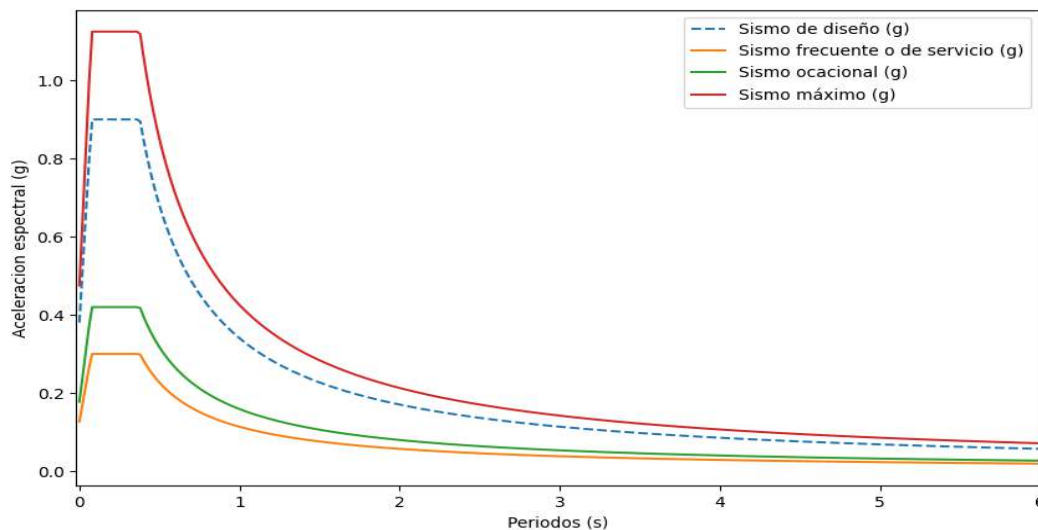
$$\begin{aligned}
 C_{sm} &= (S_{DS} - A_s) \frac{T}{T_0} + A_s & \Rightarrow & T \leq T_0 \\
 C_{sm} &= S_{DS} & \Rightarrow & T_0 \leq T \leq T_s \quad (4) \\
 C_{sm} &= \frac{S_{D1}}{T} & \Rightarrow & T \geq T_s
 \end{aligned}$$

Donde

- ✓  $C_{sm}$  es el coeficiente de corte sísmico en la dirección de análisis para el modo fundamental de vibración.

- ✓  $S_{DS}$  es la aceleración espectral de diseño en corto periodo (normalmente en el periodo  $T = 0.2$  segundos).
- ✓  $A_S$  es la aceleración sísmica basal o aceleración mínima admisible.
- ✓  $T$  es el periodo fundamental de vibración de la estructura.
- ✓  $T_0$  es el periodo de transición o de cambio entre el régimen elástico y el régimen inelástico en el espectro de respuesta de diseño.
- ✓  $T_S$  ese periodo correspondiente al inicio de la zona de comportamiento inversamente proporcional al periodo en el espectro de diseño.
- ✓  $S_{D1}$  es la aceleración espectral de diseño para un periodo de 1 segundo ( $T = 1$  segundo).

Figura 10  
Espectro de diseño horizontal.



Fuente: AASHTO 2014 – Suelo B (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018).

### 2.2.3 Desempeño Sísmico

El punto de desempeño o punto de comportamiento también puede ser determinado por el método descrito en FEMA 440 (Federal Emergency Management Agency) describiendo al proceso en el cual se aplica una rigidez degradada, efecto del comportamiento inelástico de la estructura, el objetivo de esta metodología es estimar la respuesta máxima de desplazamiento de un sistema no lineal con un sistema lineal “equivalente”, usa un periodo efectivo  $T_{eff}$ , y un

amortiguamiento efectivo  $\beta_{eff}$ , con estos factores se determinará la curva de capacidad, el periodo y amortiguamiento inicial del sistema, y la demanda de ductilidad  $\mu$ , este manual presenta 3 procedimientos (A, B y C) para determinar el punto de desempeño (Satyabrata & Tushar Kanti, 2022).

El punto de desempeño es una estimación del desplazamiento máximo esperado del techo de un edificio durante un sismo de diseño, permitiendo evaluar el estado de daño de la estructura y compararlo con el desempeño deseado. Esto ayuda a identificar y corregir deficiencias específicas en el edificio. Los Procedimientos de Análisis Dinámico No Lineal (NDP), como el análisis Tiempo-Historia, estiman con mayor precisión el comportamiento no lineal de los edificios, pero su aplicación es complicada. Por ello, se han desarrollado métodos simplificados, conocidos como Procedimientos de Análisis Estático No Lineal (NSP), como el Análisis Pushover. El Análisis Pushover y métodos asociados, como el Método del Espectro de Capacidad y el Método de Coeficientes, permiten estimar el punto de desempeño. Estos métodos han sido desarrollados y aceptados en los últimos 20 años dentro de los estándares de evaluación sísmica por desempeño. (Performance-Based Seismic Design of Highway Bridges, 2023)

El método de Linealización Equivalente del Espectro de Capacidad estima el desplazamiento máximo de un sistema no lineal de un grado de libertad (1GDL) a partir de un sistema elástico lineal de 1GDL con un periodo y amortiguamiento mayores es establecido por el FEMA 440 (Federal Emergency Management Agency). También utiliza un Sistema Equivalente o Sustituto para determinar el desplazamiento inelástico máximo, generando la curva de capacidad (Pushover) y convirtiendo los resultados a formato ADRS. La demanda sísmica también se convierte a este formato, y el periodo se representa radialmente desde el origen. Asume que el amortiguamiento equivalente es proporcional al área del espectro de



capacidad, y el periodo equivalente es el periodo secante donde la demanda sísmica interseca el espectro de capacidad. La solución para el desplazamiento inelástico máximo es iterativa, dependiendo del desplazamiento.

Procedimiento de acuerdo con el FEMA 440 y ATC 40:

1. **Desarrollar el espectro de respuesta elástico:** Creación del espectro de respuesta elástico.
2. **Determinar la curva de capacidad:** Se realiza un análisis Pushover para obtener la curva de capacidad de la estructura.
3. **Convertir la curva de capacidad:** La curva de capacidad se transforma en un espectro de capacidad y se grafican juntos el espectro de respuesta elástico y el espectro de capacidad.
4. **Seleccionar un punto de desempeño de prueba:** Se elige un punto de desempeño de prueba (dpi, api), basándose en la "aproximación de desplazamientos iguales".
5. **Desarrollar la representación bilineal del espectro de capacidad:** Partiendo del punto de desempeño de prueba asumido.
6. **Calcular factores de reducción espectral:** Se determinan los factores SRA y SRV mediante la tabla 2, desarrollando el espectro de demanda reducido y superponiéndolo en el gráfico.

*Tabla 2*  
*Valores mínimos permitidos de SRA y SRV.*

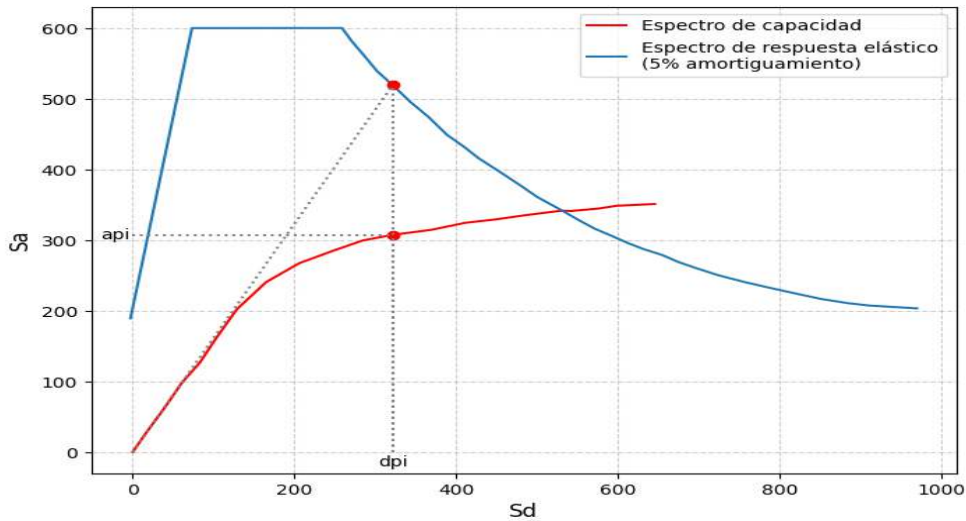
<i>Tipo de Comportamiento estructural</i>	<i>SRA</i>	<i>SRV</i>
<i>Tipo A</i>	<i>0.33</i>	<i>0.50</i>
<i>Tipo B</i>	<i>0.44</i>	<i>0.56</i>
<i>Tipo C</i>	<i>0.56</i>	<i>0.67</i>

*Fuente: ATC-40 (Applied Technology Council).*

7. **Determinar el punto de intersección:** Se halla el punto donde el espectro de capacidad y el espectro de demanda reducido se intersecta ( $d_p$ ,  $a_p$ ) así como se muestra en la figura 11.

Figura 11

Determinación del punto de desempeño de prueba.

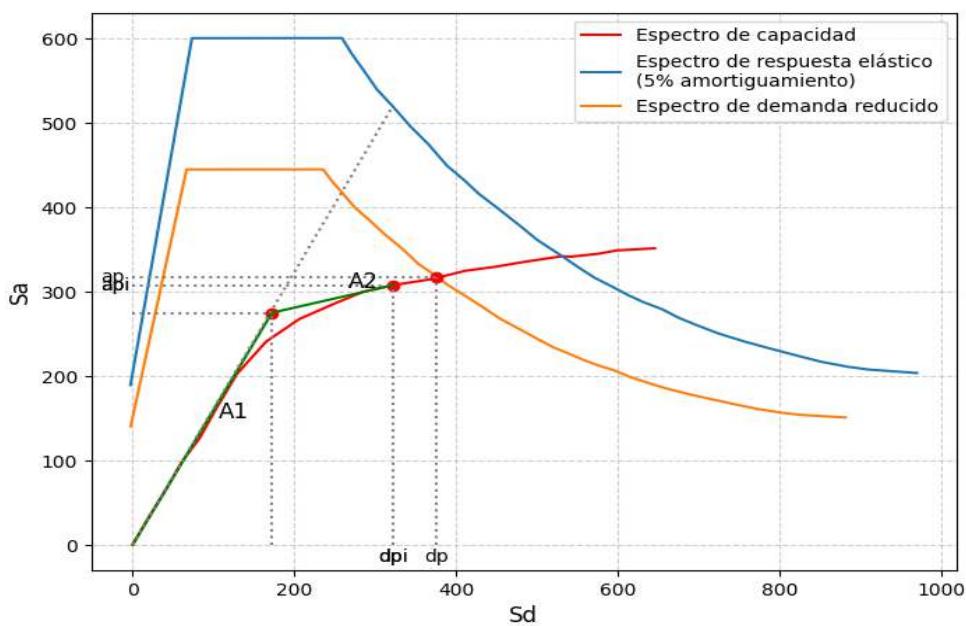


Fuente: ATC-40 (Applied Technology Council).

8. **Validar el desplazamiento:** Si  $d_p$  está dentro de  $\pm 5\%$  de  $d_{pi}$  como se muestra en la figura 12, se toma como punto de desempeño final.

Figura 12

Determinación del punto de desempeño.



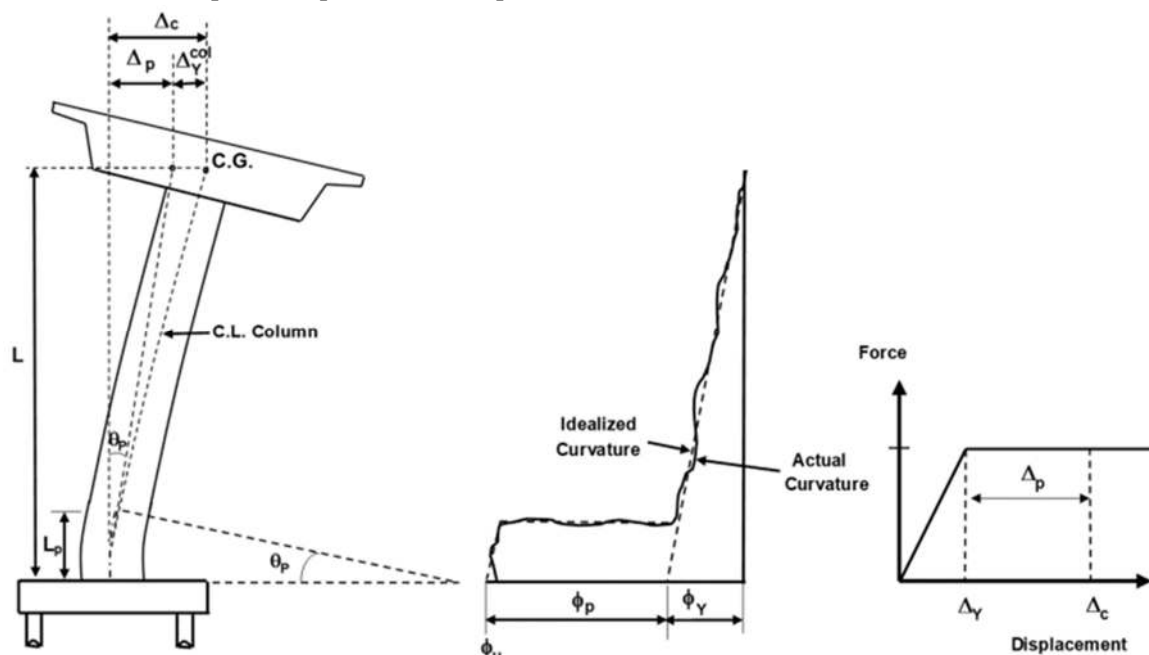
Fuente: ATC-40 (Applied Technology Council).

9. **Repetir si es necesario:** Si no se cumple con la tolerancia, se selecciona un nuevo punto de desempeño de prueba y se repite desde el paso 5.

Siguiendo el procedimiento del ATC 40, el espectro ADRS se modifica utilizando el método del FEMA 440. Este método ajusta el desplazamiento máximo de un sistema no lineal mediante un sistema lineal equivalente con un periodo y amortiguamiento efectivos. Aunque es similar al del ATC-40, el FEMA 440 ofrece tres procedimientos para determinar el punto de desempeño.

Este procedimiento establece la incorporación de rotulas plásticas, estas serán ubicadas de manera tal que se pueda establecer mediciones, siendo las vigas y pilares para el caso de los puentes, en la figura 13 del libro Bridge Design Practice de CALTRANS (State of California Department of Transportation, 2022), se establece las deformaciones y los gráficos que se obtendrán cuando se evalué el desempeño de la estructura.

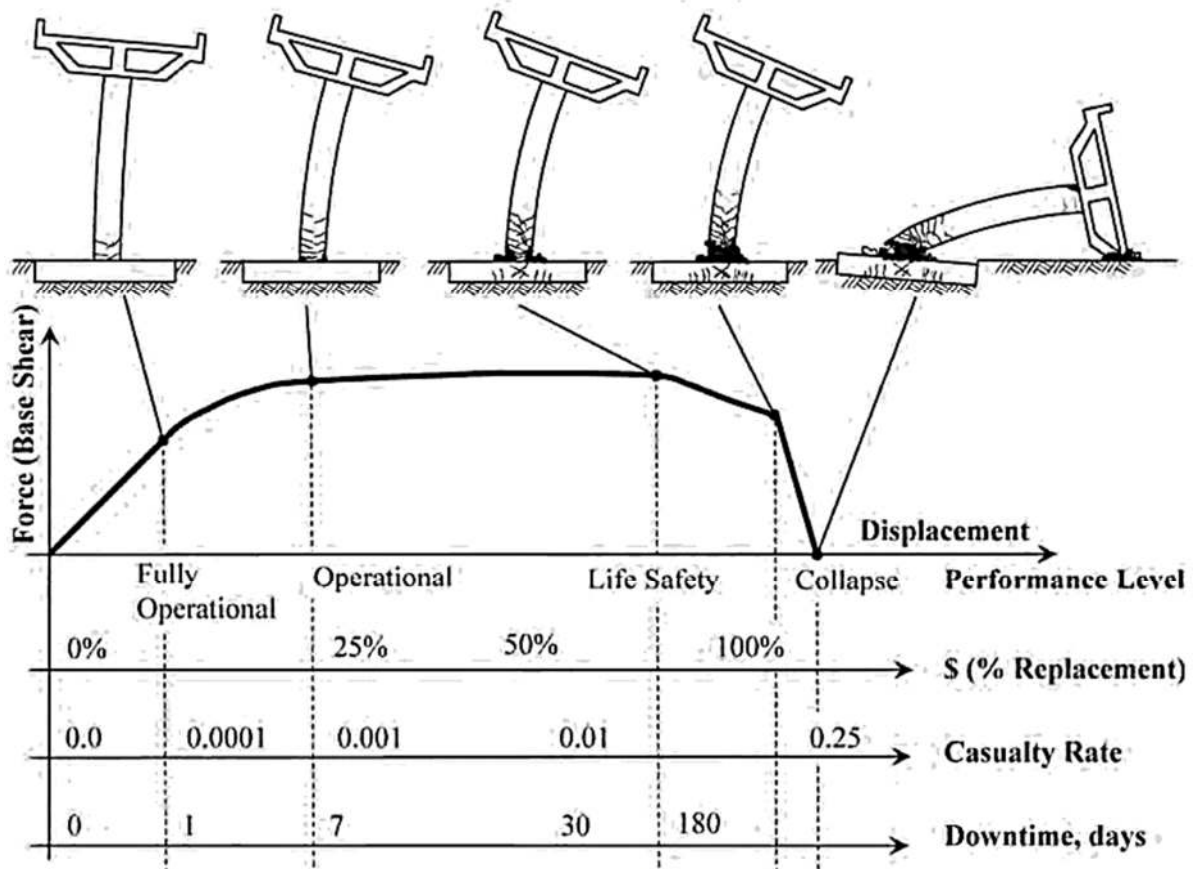
Figura 13  
Análisis de desempeño - capacidad de desplazamiento local.



Fuente: (State of California Department of Transportation, 2022).

El desempeño sísmico presenta niveles, esto se refiere al estado de daño que puede presentarse en un sismo, aplicado a una obra civil, poseen límites de desplazamiento para poder obtenerlos en rangos comprendidos en la tabla 3 que se da a continuación gráficamente en la figura 14 de acuerdo con normativas como ASHTO LRFD 2020 adaptaciones de FEMA 440 de acorde a NCHRP Synthesis 440 (Performance-Based Seismic Bridge Design, 2013).

Figura 14  
Curva de capacidad, niveles de desempeño y límites de daños.



Fuente: (Performance-Based Seismic Bridge Design, 2013).

Según la FEMA 356 y la guía de AASHTO LRFD 2020, estos límites establecen rangos de daño que determinan el comportamiento de las estructuras lineales debido al desplazamiento. Una obra civil puede sufrir distintos niveles de daño ante un evento sísmico, lo que afecta su operatividad y estado. Es esencial evaluar estos límites de desplazamiento para asegurar la capacidad de la estructura de soportar y recuperarse después de un sismo,

garantizando su estabilidad y funcionalidad dentro de los rangos establecidos por las normativas de diseño sísmico.

Tabla 3  
Niveles de desempeño sísmico.

Nivel de desempeño	Descripción de los daños	Estado de daño	Límite de desplazamiento del sistema
Totalmente operacional (PL3)	El daño sostenido es insignificante y el servicio completo está disponible para todos los vehículos tras la inspección y limpieza de escombros. El daño es reparable sin interrumpir el tráfico.	Depreciable	$\Delta y$
Ocupacional (PL2)	El daño sostenido es mínimo y el servicio para vehículos de emergencia debe estar disponible después de la inspección y limpieza de escombros. Los puentes deben ser reparables sin restricciones de tráfico.	Leve	$\Delta y + 0.03\Delta p$
Vida Segura (PL1)	Se permite un daño significativo, el servicio se ve gravemente afectado, pero se preserva la vida. El puente puede necesitar ser reemplazado tras un gran terremoto.	Moderado	$\Delta y + 0.06\Delta p$
Prevención de colapso (PL0)	No se especifica un nivel mínimo de desempeño.	Extenso	$\Delta y + 0.08\Delta p$
Colapso	Colapso estructural. No es posible reparar la estructura.	Completo	$\Delta y + 1.00\Delta p$

Fuente: (Performance-Based Seismic Bridge Design, 2013).

#### 2.2.4 Dispositivo de Protección Sísmica

De acuerdo con la Corporación de Desarrollo Tecnológico de Chile, establece la existen muchos sistemas de protección sísmica, en la actualidad hay sistemas simples o básicos en la forma de construcción y en el modelo del dispositivo, funcionando (Protección Sísmica de Estructuras Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía, 2011, pág. 7), ya se encuentran dispositivos totalmente automatizados, controlados por software y monitorizados por personal capacitado. Los sistemas de protección sísmica se pueden clasificar en tres categorías: sistemas activos, sistemas semiactivos y sistemas pasivos (Protección Sísmica de Estructuras Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía, 2011, pág. 7).

Los sistemas pasivos de disipación de energía utilizan dispositivos mecánicos para disipar parte de la energía de entrada estructural, reduciendo así la respuesta estructural y los posibles daños, especialmente frente a vientos y sismos. Incluyen dispositivos como amortiguadores de masa sintonizada (TMDs), amortiguadores de líquido sintonizado (TLDs), dispositivos de fricción y amortiguadores viscoso-elásticos. Estos sistemas no requieren energía externa y pueden generar mayor fuerza de amortiguamiento cuando la respuesta estructural es alta. Sin embargo, su capacidad de control es limitada, siendo más efectivos dentro de una banda de frecuencia estrecha, sintonizada a la frecuencia del primer modo de la estructura. Aunque útiles para la supresión de vibraciones en estructuras bajo excitaciones dominadas por el primer modo, no son tan eficaces para controlar respuestas sísmicas con modos múltiples. La inteligencia limitada de estos sistemas pasivos no les permite adaptarse a las variaciones en la excitación y la respuesta estructural global. Su eficacia depende del movimiento relativo de la estructura, y la energía disipada está relacionada con la respuesta local. Las especificaciones de diseño para estos sistemas están bien establecidas y se abordan en detalle en el libro, incluyendo códigos, ecuaciones y respuestas estructurales. (Cheng, Hongping, & Kangyu, 2008, pág. 16)

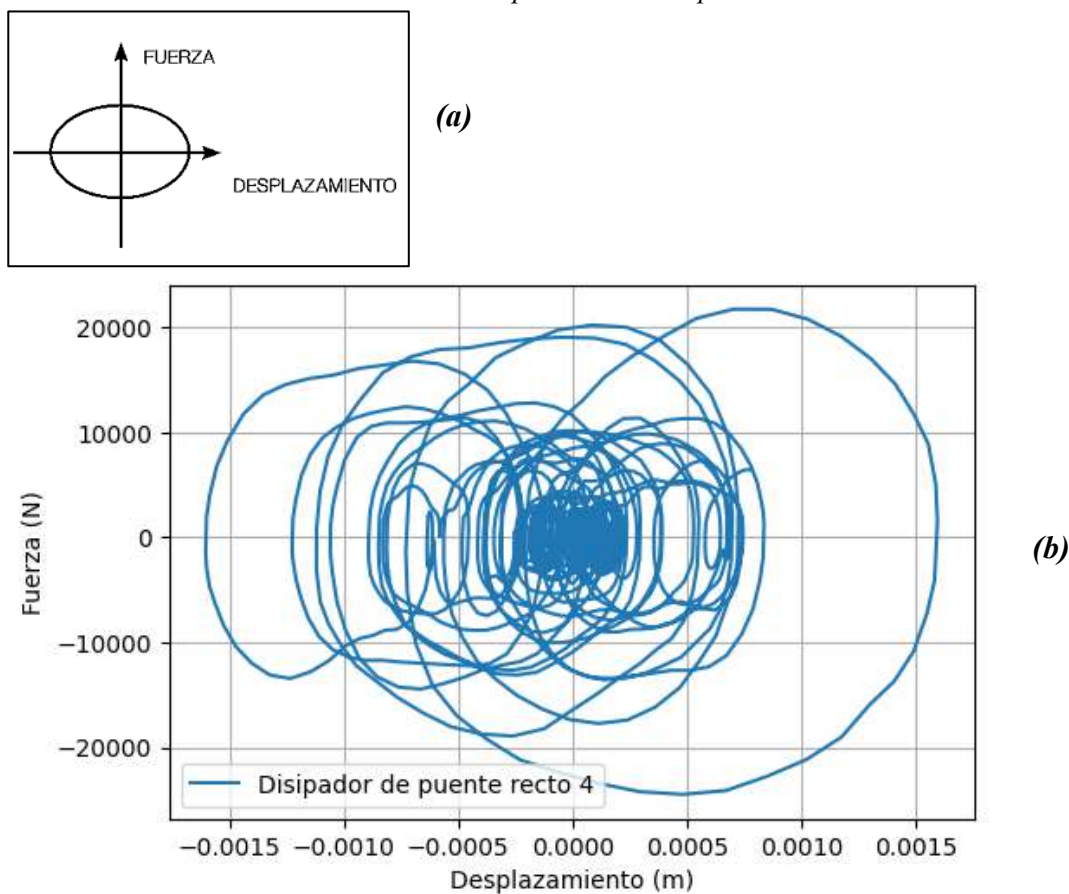
#### **2.2.4.1 Disipador de fluido viscoso**

En puentes, los disipadores viscosos se colocan entre el tablero y los pilares o en la conexión entre distintos elementos, para reducir el desplazamiento relativo y controlar la respuesta vibratoria. Bajo condiciones sísmicas, los disipadores pueden reducir el desplazamiento de la estructura por un factor de dos a tres. Además, al añadir amortiguamiento al sistema, disminuyen las aceleraciones en el puente, protegiendo tanto los elementos estructurales como los no estructurales, y mejoran la capacidad del puente para permanecer operativo después de un terremoto y ecuaciones que plantea el FEMA 356 (Federal Emergency Management Agency). La figura 16, este disipador actúa como un freno de la estructura, En la

figura 15 sección a) se muestra el comportamiento típico de estos disipadores, para la sección b) se muestra el resultado del modelamiento de un disipador, grafico típico de estos disipadores de fluido viscoso, así mismo se muestra lateralmente el movimiento y la oposición que tendría el fluido al movimiento, reduciendo así las aceleraciones y velocidades las que puedan causar daño a esta, en estos se encuentra los dispositivos de fluido y muros viscosos (Federal Emergency Management Agency, 2000).

Figura 15

Ciclo de histéresis característico de un disipador activado por velocidad.



Fuente: (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2011, pág. 18)

Para proteger tanto la inversión como las vidas humanas, es crucial implementar estos dispositivos. Los disipadores pueden colocarse en diversos componentes del puente, como vigas, tableros y apoyos, entre otros. Algunos ejemplos de su uso ya se muestran en las figuras

16 y 17, donde se observa cómo el control del puente se realiza de la manera más efectiva posible.

*Figura 16*

*Aplicación de amortiguamiento viscoso en apoyo de puente de concreto.*



*Fuente: (Protección Sísmica de Estructuras Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía, 2011)*

*Figura 17*

*Aplicación de amortiguamiento viscoso en puente metálico (Puente Amolanas - Chile).*



*Fuente: (Protección Sísmica de Estructuras Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía, 2011)*

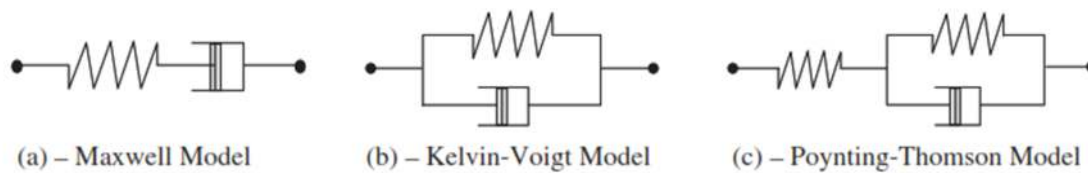
#### **2.2.4.2 Análisis matemático para disipadores de fluido viscoso**

Los tratamientos de amortiguación viscoelástica se han utilizado ampliamente en diversas aplicaciones estructurales para controlar vibraciones indeseables y la radiación de ruido asociada de manera simple y confiable. En este capítulo, se enfatiza el estudio de las



características dinámicas de estos tratamientos de amortiguación y se describen los diferentes modelos matemáticos utilizados para representar su comportamiento en un amplio rango de frecuencias y temperaturas operativas. Se presta especial atención a los méritos y desventajas de los modelos clásicos de Maxwell, Kelvin-Voigt y Zener, dichos modelos se muestran en la figura 18, tanto en los dominios del tiempo como de la frecuencia. (Baz, 2019).

Figura 18  
Modelos clásicos de materiales viscoelásticos.



Fuente: (Active and Passive Vibration Damping, 2019, pág. 11)

Características dinámicas de estos tratamientos y la descripción de los diferentes modelos matemáticos utilizados para describir su comportamiento en un amplio rango de frecuencias y temperaturas operativas. Los modelos de Maxwell y Kelvin-Voigt presentan limitaciones en la predicción del comportamiento realista de materiales viscoelásticos debido a sus características de creep (fluencia es un fenómeno de deformación lenta y progresiva de un material sometido a esfuerzo constante a lo largo del tiempo) y relajaciones no realistas. El uso de transformaciones de Laplace y técnicas de análisis en el dominio del tiempo son esenciales para comprender y predecir el comportamiento de estos modelos bajo diferentes condiciones de carga. (Baz, 2019, págs. 11-40).

a) Modelo de Maxwell

La ecuación de movimiento para un sistema de maxwell es:

$$\sigma(t) = E \epsilon(t) + \eta \frac{d}{dt} \epsilon(t) \quad (5)$$

Donde:

- ✓  $\sigma(t)$  es estrés (tensión) en el material en función del tiempo.
- ✓  $\epsilon$  es la deformación (strain) en el material en función del tiempo.
- ✓  $\eta$  es el coeficiente de viscosidad del material, que describe la respuesta viscosa del material.
- ✓  $E$  es el módulo de elasticidad del material (también conocido como módulo de Young), que describe la respuesta elástica del material.
- ✓  $\frac{d}{dt} \epsilon(t)$  es la tasa de cambio de la deformación con respecto al tiempo.

Caracterización: Creep: La deformación tiende a volverse ilimitada con el tiempo bajo un estrés constante. Relajación: El estrés se alivia completamente con el tiempo bajo una deformación constante.

b) Modelo de Kelvin-Voigt

La ecuación de movimiento para un sistema de Kelvin-Voigt es:

$$\frac{\sigma(t)}{\eta} + \frac{1}{E} \frac{d}{dt} \sigma(t) = \frac{d}{dt} \epsilon(t) \quad (6)$$

$$F(t) = k \cdot x(t) + c \cdot \dot{x}(t)$$

Donde:

- ✓  $\sigma(t)$  es estrés (o tensión) en el material en función del tiempo.
- ✓  $\epsilon$  es la deformación (o strain) en el material en función del tiempo.
- ✓  $\eta$  es el coeficiente de viscosidad del material, que describe la respuesta viscosa del material.
- ✓  $E$  es el módulo de elasticidad del material (también conocido como módulo de Young), que describe la respuesta elástica del material.

- ✓  $\frac{d}{dt} \in (t)$  es la tasa de cambio de la deformación con respecto al tiempo.
- ✓  $F(t)$  es la fuerza aplicada.
- ✓  $K$  es la rigidez del resorte.
- ✓  $c$  es el coeficiente de amortiguamiento.
- ✓  $x(t)$  es el desplazamiento.
- ✓  $\dot{x}(t)$  es la velocidad (deriva del desplazamiento respecto al tiempo)

Caracterización: Creep: La deformación se mantiene acotada bajo un estrés constante.

Relajación: El estrés permanece constante bajo una deformación constante, lo que no es realista para materiales viscoelásticos reales.

c) Coeficiente de amortiguamiento inicial ( $C_0$ )

Este parámetro se determina experimentalmente. Sin embargo, se puede aproximar si se conoce la disipación de energía deseada y la velocidad:

$$c_0 = \frac{F_d}{\dot{x}(t)} \quad (7)$$

Donde:

- ✓  $F_d$  es la fuerza de amortiguamiento medida.
- ✓  $\dot{x}(t)$  es la velocidad a la cual se mide la fuerza de amortiguamiento.

d) Fuerza de amortiguamiento de alivio ( $F_r$ )

Este valor se establece según el diseño del dispositivo y se ajusta para que el amortiguador no exceda ciertas fuerzas. No hay una ecuación específica para calcularlo, ya que se basa en pruebas de diseño y características del material del amortiguador.

e) Factor de reducción de amortiguamiento ( $R_d$ )

Este factor se utiliza para ajustar el coeficiente de amortiguamiento bajo diferentes condiciones. Se define como la relación entre el coeficiente de amortiguamiento reducido y el coeficiente de amortiguamiento inicial:

$$R_d = \frac{c_{reducido}}{c_0} \quad (8)$$

Donde:

- ✓  $c_{reducido}$  es el coeficiente de amortiguamiento bajo condiciones reducidas.
- ✓  $c_0$  es el coeficiente de amortiguamiento inicial.

f) Rigidez del dispositivo (k)

La rigidez del resorte se puede determinar a partir de la relación entre la fuerza y el desplazamiento en la región elástica del resorte:

$$k = \frac{F_s}{x} \quad (9)$$

Donde:

- ✓  $F_s$  es la fuerza elástica (restauradora) del resorte.
- ✓  $x$  es el desplazamiento correspondiente a  $F_s$ .

### 2.2.4.3 Disipador de fluido viscoso

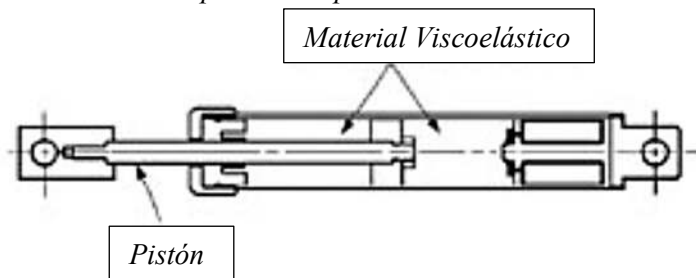
La necesidad de diseñar y construir estructuras más seguras se ha incorporado los disipadores sísmicos para puente y controlar así sus desplazamiento, estos disipadores reducen en gran cantidad la respuesta dinámica de la estructura, se usar apara este disipador comprendiendo las partes como se muestra en la figura 19 y 20, compuesta por un brazo rígido siendo el metal y un resorte siendo el pistón en el interior que por medio de calor disipa la energía, al pasar por orificios de una cámara a la otra.

Figura 19  
Disipador viscoelástico.



Fuente: Disipador de fluido viscoso, tomado de Google imágenes.

Figura 20  
Elemento enlace para el disipador.



Fuente: (Google imágenes).

Propiedades:

- Acero ASTM A709 – grado 50 para el diseño.

Para el coeficiente de amortiguamiento viscoelástico de Maxwell se usará la siguiente ecuación:

$$C_j = \frac{\left( 2 * \pi * A^{1-\alpha} * \omega^{2-\alpha} * \sum_{i=1}^m (m_i x \phi^{i^2}) \right) * \frac{\beta_H}{100}}{\sum_{j=1}^m (\lambda * \phi_{ab}^{1+\alpha} * \cos(\theta)^{1+\alpha})} \quad (10)$$

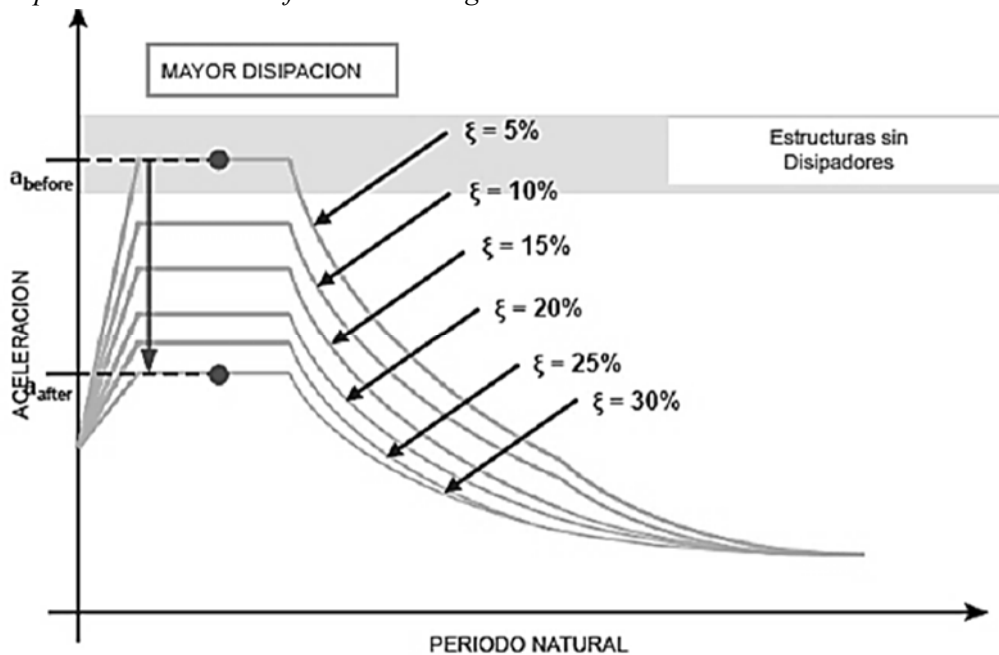
Donde:

- ✓  $C_j$  es el Coeficiente de amortiguamiento del disipador  $j$
- ✓  $A$  es el Amplitud del desplazamiento del pórtico en el primer modo de vibración (modo de vibración fundamental)
- ✓  $\omega$  es la frecuencia angular del sistema
- ✓  $m$  es la Masa del nivel  $i$
- ✓  $\emptyset$  es el Desplazamiento modal relativo entre ambos extremos de la sección de fluido del disipador  $j$  en la dirección horizontal para el primer modo de vibración. elevado al exponente  $(1 + \alpha)$
- ✓  $\alpha$  es el Coeficiente de velocidad
- ✓  $\beta_H$  es la Amortiguamiento viscoso de la estructura
- ✓  $\lambda$  es el Parámetro lambda relacionado al coeficiente de velocidad  $\alpha$
- ✓  $\theta$  es el ángulo de inclinación del dispositivo

### 2.2.5 Respuesta sísmica lineal de la estructura

Los efectos sísmicos en las estructuras difieren de otros efectos, pues dependen de la interacción entre el movimiento sísmico, las propiedades del suelo y la estructura (Gutiérrez, 2017). La incorporación de dispositivos de amortiguamiento en las estructuras permite liberar energía, lo cual reduce significativamente la respuesta sísmica y, por ende, los daños asociados. Al comparar la respuesta sísmica de una estructura con amortiguamientos que varían del 5% al 30%, se observa que, a mayor nivel de amortiguamiento, menor será la respuesta sísmica. Este comportamiento se ilustra claramente en la figura 21, donde se muestra el efecto de diferentes niveles de amortiguamiento en la respuesta de la estructura.

Figura 21  
Respuesta sísmica con diferentes amortiguamientos.



Fuente: (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2011)

### 2.2.6 Análisis no lineal

Este análisis se basa en la no linealidad de los materiales de los elementos estructurales que conforman la estructura. Estos elementos se comportarán dentro del rango inelástico, llevando así la estructura a su límite de capacidad. Para lograr un modelo preciso, es fundamental definir correctamente la estructura, con un conocimiento detallado de todos sus elementos y parámetros. De este modo, la estructura se comportará de manera que su respuesta sea comparable con la realidad. Además, es esencial definir la fluencia dúctil de sus elementos, asegurando que puedan soportar deformaciones inelásticas significativas sin fallar. (Asociación Chilena de Simología e Ingeniería Antisísmica, 2017, págs. 12-16)

Los dispositivos de disipación sísmica también están en la no linealidad, que modificarán la respuesta sísmica de la estructura. Por ello, es crucial incluir estos dispositivos en el análisis no lineal. Las propiedades de estos dispositivos deben ser verificadas en laboratorio o garantizadas por el fabricante, asegurando así el comportamiento adecuado de los

materiales componentes del dispositivo. Todos los parámetros de los dispositivos deben ser integrados en el modelo matemático.

En el contexto del análisis no lineal, es común utilizar modelos constitutivos que describan el comportamiento inelástico de los materiales. Un modelo usado es el de plasticidad perfecta o el de endurecimiento cinemático. Por ejemplo, para el acero estructural, el comportamiento puede ser descrito por la siguiente relación constitutiva:

$$\begin{aligned} \sigma &= E \cdot \varepsilon \text{ para } \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ \sigma &= \sigma_y + H \cdot (\varepsilon - \varepsilon_y) \text{ para } \varepsilon > \varepsilon_y \end{aligned} \quad (11)$$

Donde:

- ✓  $\sigma$  es la tensión.
- ✓ E es el módulo de elasticidad.
- ✓  $\varepsilon$  es la deformación.
- ✓  $\varepsilon_y$  es la deformación en el punto de fluencia.
- ✓  $\sigma_y$  es la tensión de fluencia.
- ✓ H es el parámetro de endurecimiento.

Para la modelación de los dispositivos de disipación sísmica, como los amortiguadores viscosos, se puede utilizar la ecuación de comportamiento viscoso:

$$F_d = C \cdot \dot{u}^\alpha \quad (12)$$

Donde:

- ✓  $F_d$  es la fuerza de amortiguamiento,
- ✓ C es el coeficiente de amortiguamiento,



- ✓  $\dot{u}$  es la velocidad de deformación,
- ✓  $\alpha$  es el exponente de velocidad, que depende del tipo de dispositivo.

Es fundamental realizar un análisis dinámico no lineal (NLDA) que integre estas propiedades, utilizando métodos numéricos avanzados como el método de los elementos finitos (FEM). Este enfoque permite capturar la respuesta compleja de la estructura bajo cargas sísmicas, proporcionando una evaluación precisa de su desempeño.

Por lo que el análisis se puede realizar de dos maneras de acuerdo con el FEMA P-58 (2018), de manera dinámica (Tiempo Historia) y estática (Pushover), el análisis Pushover, se basa en aplicar unas ecuaciones empíricas que obtendrán la respuesta de la estructura frente a una excitación de la estructura; el análisis tipo historia se basa en los registros o señales sísmicas recolectadas por los acelerogramas, estas deberán ser tratadas con el fin de obtener una respuesta para la estructura la cual será analizada para la incorporación de dispositivos de protección sísmica, estos disiparan la energía y serán capaces de proteger vidas humanas así como la inversión realizada en diferentes estructuras, se tiene registros de terremotos establecidos en la tabla 4, que generaron múltiples pérdidas de vidas así como materiales, devastando edificaciones esenciales como puentes, establecimientos de salud y educativos, etc. Siendo necesario la implementación de la filosofía de diseño por desempeño. (Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2018).

*Tabla 4*  
*Rankin de terremotos más destructivos a nivel mundial desde 1900.*

<i>Ubicación</i>	<i>Fecha</i>	<i>Magnitud (Richter)</i>	<i>Latitud</i>	<i>Longitud</i>
<i>1 Valdivia, Chile</i>	<i>22/05/1960</i>	<i>9.5</i>	<i>-38.29</i>	<i>-73.05</i>
<i>2 Prince William Sound, Alaska</i>	<i>28/03/1964</i>	<i>9.2</i>	<i>61.02</i>	<i>-147.65</i>
<i>3 Costa Oeste de Sumatra Norte</i>	<i>26/12/2004</i>	<i>9.1</i>	<i>3.3</i>	<i>95.78</i>
<i>4 Costa Este de Honshu, Japón</i>	<i>11/03/2011</i>	<i>9</i>	<i>38.322</i>	<i>142.369</i>
<i>5 Kamchatka, Rusia</i>	<i>04/11/1952</i>	<i>9</i>	<i>52.76</i>	<i>160.06</i>
<i>6 Maule, Chile</i>	<i>27/02/2010</i>	<i>8.8</i>	<i>-35.846</i>	<i>-72.719</i>
<i>7 Costa de Ecuador</i>	<i>31/01/1906</i>	<i>8.8</i>	<i>1</i>	<i>-81.5</i>
<i>8 Islas Rata, Alaska</i>	<i>04/02/1965</i>	<i>8.7</i>	<i>51.21</i>	<i>178.5</i>
<i>9 Sumatra Norte, Indonesia</i>	<i>28/03/2005</i>	<i>8.6</i>	<i>2.08</i>	<i>97.01</i>

10	Assam, Tibet	15/08/1950	8.6	28.5	96.5
11	Islas Andreanof, Alaska	09/03/1957	8.6	51.56	-175.39
12	Sumatra Sur, Indonesia	12/09/2007	8.5	-4.438	101.367
13	Mar de Banda, Indonesia	01/02/1938	8.5	-5.05	131.62
14	Kamchatka, Rusia	03/02/1923	8.5	54	161
15	Frontera Chile-Argentina	11/11/1922	8.5	-28.55	-70.5
16	Islas Kuril	13/10/1963	8.5	44.9	149.6

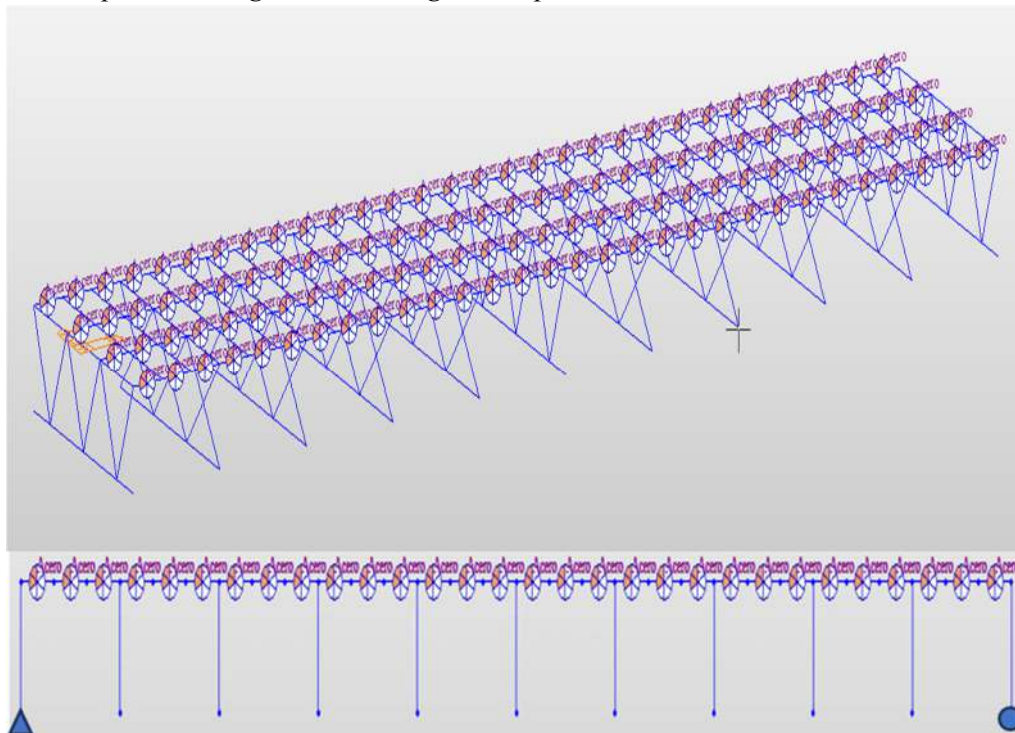
Fuentes: (Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2018).

### 2.2.6.1 Rótulas plásticas

Es un modelo derivado del efecto de fluencia del elemento, asumiendo que las rótulas se forman en puntos que exceden la capacidad de carga, en lugar de sobre la longitud continua del elemento, estas pueden estar regidas según normativas como FEMA 356, ASCE 41-13 o 17. (Flores, 2003). Usando programas avanzados como CSI Bridge o Midas civil, existen diferentes formas del análisis de estas rotulas plásticas, en la figura 22, se muestra la asignación de rotulas plásticas en el programa de Midas Civil, condicionando la rotación en los ejes Z e Y locales de cada elemento, la interpretación de los ejes se requiere verificación para un análisis más preciso.

Figura 22

Rotulas plásticas asignadas en la viga de un puente.



Fuente: Manual de Midas Civil 2022.

### 2.2.6.2 Diagrama momento – curvatura

Este análisis se utiliza para evaluar un elemento estructural cuando se somete a fuerzas externas, las cuales generan una respuesta interna que afecta al material. Para realizar este análisis de manera efectiva, se adoptan varias hipótesis que simplifican el comportamiento del elemento y permiten su evaluación mediante modelos matemáticos. Según CALTRANS (2022), las principales hipótesis son:

1. **Las secciones planas antes de doblarse permanecen planas:** Esta hipótesis, también conocida como la hipótesis de Bernoulli, asume que las secciones transversales del elemento no se deforman en el plano durante la flexión, permaneciendo perpendiculares al eje neutro.
2. **Las deformaciones por corte y torsión son insignificantes:** Se supone que las deformaciones causadas por esfuerzos cortantes y torsionales son despreciables en comparación con las deformaciones por flexión, simplificando así el análisis.
3. **Se conocen las relaciones tensión-deformación del acero:** Esta hipótesis asume que las propiedades mecánicas del acero, como el módulo de elasticidad y el comportamiento plástico, están bien definidas y pueden ser descritas por una relación constitutiva conocida.

Para llevar a cabo el análisis, es importante considerar las relaciones constitutivas del material, como la ley de Hooke para el comportamiento elástico:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (13)$$

- ✓ Donde:
- ✓  $\sigma$  es la tensión.
- ✓ E es el módulo de elasticidad.

- ✓  $\epsilon$  es la deformación.

Cuando el material se somete a flexión, se puede utilizar la teoría de vigas para describir la relación entre el momento flector  $M$ , la curvatura  $\kappa$  y la rigidez flexional  $EI$ :

$$M = EI \cdot \kappa \quad (14)$$

Donde:

- ✓  $M$  es el momento flector.
- ✓  $E$  es el módulo de elasticidad.
- ✓  $I$  es el momento de inercia de la sección.
- ✓  $\kappa$  es la curvatura de la viga.

Además, las deformaciones y tensiones pueden ser determinadas utilizando la teoría de la deformación en la flexión, que asume que las deformaciones axiales en la sección son proporcionales a la distancia desde el eje neutro. Esto se expresa como:

$$\epsilon(x) = \frac{M \cdot y}{EI} \quad (15)$$

Donde:

- ✓  $\epsilon(x)$  es la deformación a una distancia del eje neutro.
- ✓  $M$  es el momento flector,
- ✓  $E$  es el módulo de elasticidad,
- ✓  $I$  es el momento de inercia de la sección,
- ✓  $y$  es la distancia desde el eje neutro.

Para el análisis de momento-curvatura en el rango inelástico, es fundamental considerar la relación constitutiva del material y las propiedades geométricas de la sección. La curvatura

$\kappa$  de una viga sometida a un momento flector  $M$  se puede expresar mediante la siguiente relación:

$$k = \frac{M}{EI_{ff}} \quad (16)$$

Donde:

- ✓  $M$  es el momento flector.
- ✓  $E$  es el modelo de elasticidad.
- ✓  $EI_{ff}$  Es el momento de inercia efectivo, que se ajusta para considerar la reducción de rigidez debido a la no linealidad del material.

En el rango inelástico, el momento flector  $M$  y la curvatura  $\kappa$  no son linealmente proporcionales, debido a la plastificación del material. La relación momento-curvatura se representa típicamente en un diagrama, que muestra tres fases principales:

1. Fase Elástica: En esta fase, el comportamiento es lineal y la curvatura aumenta proporcionalmente con el momento flector:

$$M = EI \cdot k \quad (17)$$

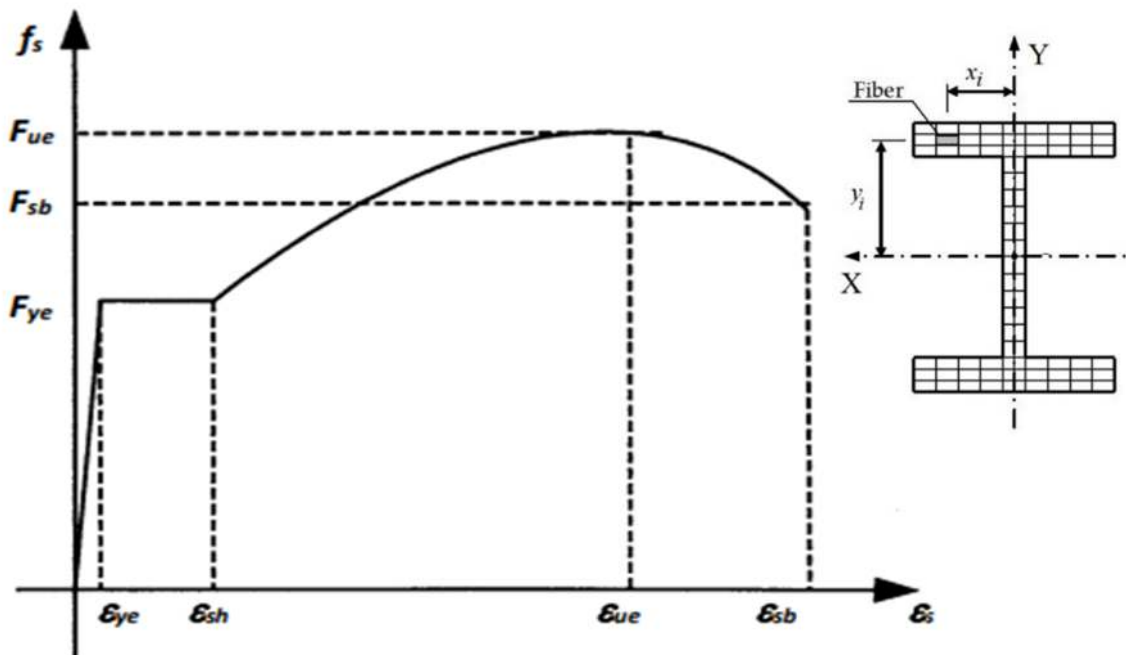
2. Fase de Fluencia: Una vez que se alcanza el límite elástico del material, la sección comienza a plastificarse y el momento flector incrementa a una tasa menor en comparación con la curvatura.
3. Fase de Degradación: Finalmente, si la curvatura sigue aumentando, la rigidez de la sección disminuye debido a la acumulación de daños y la degradación del material, lo que se refleja en una pendiente descendente en el diagrama momento-curvatura.

El análisis numérico del comportamiento inelástico se realiza generalmente utilizando el Método de los Elementos Finitos (FEM, por sus siglas en inglés), una técnica computacional que permite dividir la estructura en elementos discretos para evaluar con precisión sus respuestas bajo diversas condiciones de carga. Este método incorpora modelos constitutivos no lineales que describen el comportamiento realista del material bajo grandes deformaciones y cargas complejas, considerando aspectos como la plasticidad, la rigidez degradante y el daño acumulativo.

En resumen, el análisis de momento-curvatura es crucial para evaluar la capacidad y el comportamiento de los elementos estructurales bajo cargas inelásticas. Este análisis considera la relación entre el momento flector y la curvatura de la sección transversal, lo cual es fundamental para entender la capacidad de rotación plástica y el nivel de ductilidad disponible, permitiendo un diseño más seguro y eficiente que pueda soportar adecuadamente la demanda sísmica o cualquier otro tipo de sobrecarga.

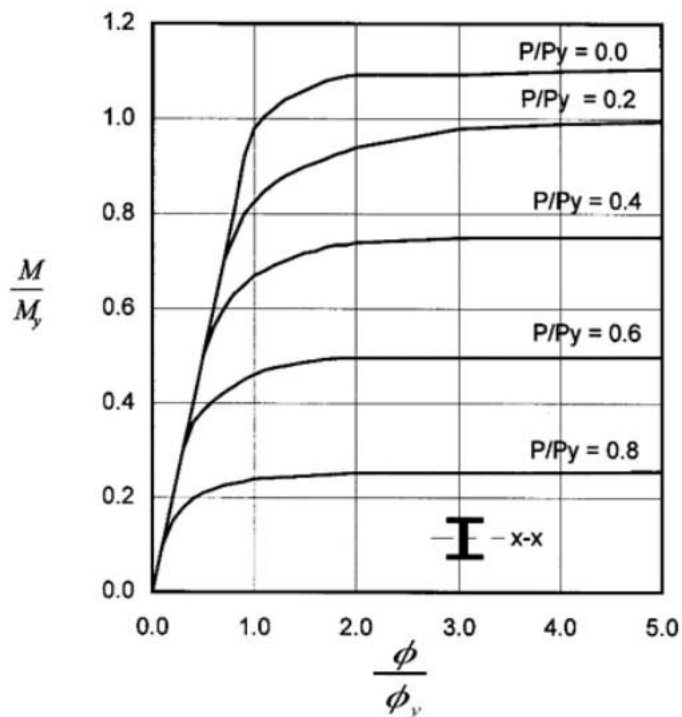
En la Figura 23 se muestra la sección utilizada en el puente y el correspondiente diagrama esfuerzo-deformación, que permite visualizar la distribución de esfuerzos en función de las deformaciones generadas en la sección. Esta figura es fundamental para entender cómo los diferentes materiales responden bajo diversas condiciones de carga, mostrando tanto el comportamiento elástico como el inelástico. En la Figura 24, se presenta el diagrama de tensión-deformación del acero, que ilustra la relación entre la tensión aplicada y la resultante, destacando las fases de comportamiento elástico e inelástico del material, así como el límite de fluencia, el endurecimiento por deformación y la eventual falla del material bajo carga continua. Este análisis es crucial para el diseño y evaluación de estructuras, asegurando que sean capaces de soportar las cargas previstas sin sufrir daños irreparables.

Figura 23  
Momento curvatura del material mediante una sección I.



Fuente: (State of California Department of Transportation, 2022)

Figura 24  
Momento curvatura típicos para una sección I de acero.



Fuente: (State of California Department of Transportation, 2022)

## 1. Modelo elástico plástico ideal.

Este modelo asume que el material tiene un comportamiento elástico ideales hasta el punto de fluencia, seguido de un comportamiento plástico perfecto.

$$\sigma = \begin{cases} E \cdot \varepsilon & \text{si } \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ \sigma_y & \text{si } \varepsilon > \varepsilon_y \end{cases} \quad (18)$$

Donde:

- ✓  $\sigma$  es la tensión,
- ✓ E es el módulo de elasticidad,
- ✓  $\varepsilon$  es la deformación,
- ✓  $\varepsilon_y$  es la deformación en el punto de fluencia,
- ✓  $\sigma_y$  es la tensión de fluencia.

## 2. Modelo de endurecimiento cinético:

Este modelo describe un material que, después de alcanzar el límite elástico, sigue endureciéndose con mayor deformación.

$$\sigma = \sigma_y + H \cdot (\varepsilon - \varepsilon_y) \quad (19)$$

Donde:

- ✓ H es el módulo de endurecimiento.

## 3. Análisis de Pandeo Inelástico

El pandeo inelástico debe considerarse en elemento comprimidos que experimentan deformaciones significativas. La carga crítica de pandeo inelástico se puede calcular utilizando la fórmula de pandeo de Euler modificada para incluir el efecto del comportamiento inelástico del material.



$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \cdot \left(\frac{E}{E_{sec}}\right) \quad (20)$$

Donde:

- ✓  $P_{cr}$  es la carga crítica de pandeo.
- ✓  $I$  es el momento de inercia de la sección.
- ✓  $K$  es el factor de longitud.
- ✓  $L$  es la longitud no soportada del miembro.
- ✓  $E_{sec}$  es el módulo secante del material.

#### 4. Análisis de Deformación Inelástica

##### Curvatura de sección inelástica.

La curva  $k$  de una viga sometida a un momento flector  $M$  puede expresarse como:

$$k = \frac{M}{EI_{EFF}} \quad (21)$$

Donde:

- ✓  $EI_{EFF}$  es el momento de inercia efectiva que considera la red de rigidez debido a la inelasticidad.

##### Deformación plástica

La deformación plástica acumulada en una estructura bajo carga cíclica describe mediante.

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{total} - \varepsilon_{elastic} \quad (22)$$

Donde:

- ✓  $\varepsilon_p$  es la deformación plástica.
- ✓  $\varepsilon_{total}$  es la deformación total.
- ✓  $\varepsilon_{elastic}$  es la deformación elástica.

## **Energía Disipada**

Es un análisis inelástico, es importante considerar la energía disipada por deformación plástica, especialmente cargas cíclicas sísmicas. La energía disipada  $E_d$  puede calcularse como:

$$E_d = \int \sigma d\varepsilon \quad (23)$$

Esta integral se evalúa sobre el ciclo de carga deformación para determinar la energía absorbida por el material durante un ciclo de carga.

## **Análisis Numérico**

El análisis inelástico generalmente se realiza mediante métodos numéricos como el Método de los Elementos Finitos (FEM). En estos análisis, se incorporan modelos constitutivos no lineales que representan el comportamiento material bajo grandes deformaciones y cargas. (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2023).

## **2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS**

### **2.3.1 Puente**

Es una estructura vial que tiene como finalidad atravesar un accidente geográfica o un obstáculo natural y/o artificial (MTC, 2018).

### **2.3.2 Disipador sísmico**

Es un dispositivo instalado en la geometría de una estructura para absorber y disipar la energía generada por los terremotos. Adecuado para reforzar edificios existentes, reducir los requisitos de corte y tensión de la estructura principal y reducir el riesgo de daño o colapso (Cuyán & Muñoz, 2022).

### **2.3.3 Desempeño sísmico**

Es la cuantificación del daño que sufre una estructura para que pueda resistir y responder adecuadamente a eventos sísmicos, mantener su funcionalidad y minimizar los daños (Satyabrata & Tushar Kanti, 2022).

### **2.3.4 Sismo**

Es el temblor de la superficie terrestre provocado por la liberación de energía almacenada en las placas tectónicas. Esta energía viaja en forma de ondas sísmicas que dañan las infraestructuras sanitarias y las líneas de comunicación (Arbelaez, 2018).

### **2.3.5 Espectro de diseño**

Es una representación gráfica que muestra la respuesta máxima de tensión o deformación de una estructura durante un terremoto determinado. Tiene un comportamiento diferente dependiendo de la frecuencia y duración de la señal, la aceleración, la velocidad y el desplazamiento máximo del suelo (Mondragón, 2010).

### **2.3.6 Espectro de respuesta**

Esta figura muestra la respuesta máxima de un oscilador simple de un solo grado de libertad a un movimiento sísmico dado en función de su período de vibración (Elghazouli, 2016).

### **2.3.7 Tiempo historia**

Es un método para evaluar la respuesta de estructuras ante terremotos reales o simulados y puede utilizarse para analizar cualquier tipo de estructura analizando su comportamiento lineal, elástico y su aceleración. Este análisis es esencial para comprender el comportamiento dinámico de las estructuras bajo cargas sísmicas (Ricse, 2012).

### **2.3.8 Plasticidad**

Es una propiedad de un material que le permite deformarse irreversiblemente sin romperse cuando se lo somete a fuerzas que superan su límite elástico. (Dewolf & Sanghi, 2013).

### **2.3.9 Modos de vibración**

Estas son las respuestas, es decir. respuestas con frecuencias naturales similares que ocurren en una estructura vibrante, que son diferentes formas en que una estructura se deforma o se mueve en respuesta a una excitación dinámica como un terremoto (Simón & Guadalupe, 2012)

### **2.3.10 Momento curvatura**

Esta relación predice claramente la magnitud del esfuerzo y describe cómo la sección estructural se doblará (deformará) bajo la influencia del momento flector. Esto es esencial para el diseño y análisis de estructuras sometidas a cargas de flexión (Chala, 2005).

### **2.3.11 Momento rotación**

Estas relaciones describen cómo una junta o junta estructural responde a la aplicación de momentos, lo que resulta en rotación. Esta curva momento-rotación puede caracterizar el comportamiento elástico y plástico de la unión, lo cual es esencial para el análisis no lineal de estructuras (Kassimali., 2014)

### **2.3.12 Rotula plástica**

Es un elemento que permite que se produzca la deformación plástica y la rotación de las uniones de columnas de forma rígida, también se utiliza para describir las deformaciones de partes de vigas sometidas a flexión plástica (Oswaldo, 2017).

### **2.3.13 Registros sísmicos**

Son representaciones gráficas o numéricas de vibraciones del suelo causadas por terremotos, explosiones u otras fuentes sísmicas (Sharma & Shrikhande, 2018)

### **2.3.14 Amortiguamiento**

Es un fenómeno en el que la energía del sistema vibratorio se disipa y la amplitud de la vibración disminuye gradualmente. En las estructuras, la amortiguación representa diferentes formas de disipación de energía, como la fricción interna en los materiales y la interacción con el medio ambiente (Chopra A. , 2017)

### **2.3.15 Deriva**

Estos son desplazamientos relativos a la longitud de una viga o estructura y se utilizan para lograr comba o comba (Hibbeler, 2017).

### **2.3.16 Curva de capacidad**

Es una herramienta esencial para el análisis sísmico no lineal y representa la respuesta entre las fuerzas de corte en la base de la estructura y los desplazamientos laterales acumulados en los puntos de control (generalmente ubicados en la parte superior de la estructura) (Priestley & Calvi, 2007).

### **2.3.17 Espectro de capacidad**

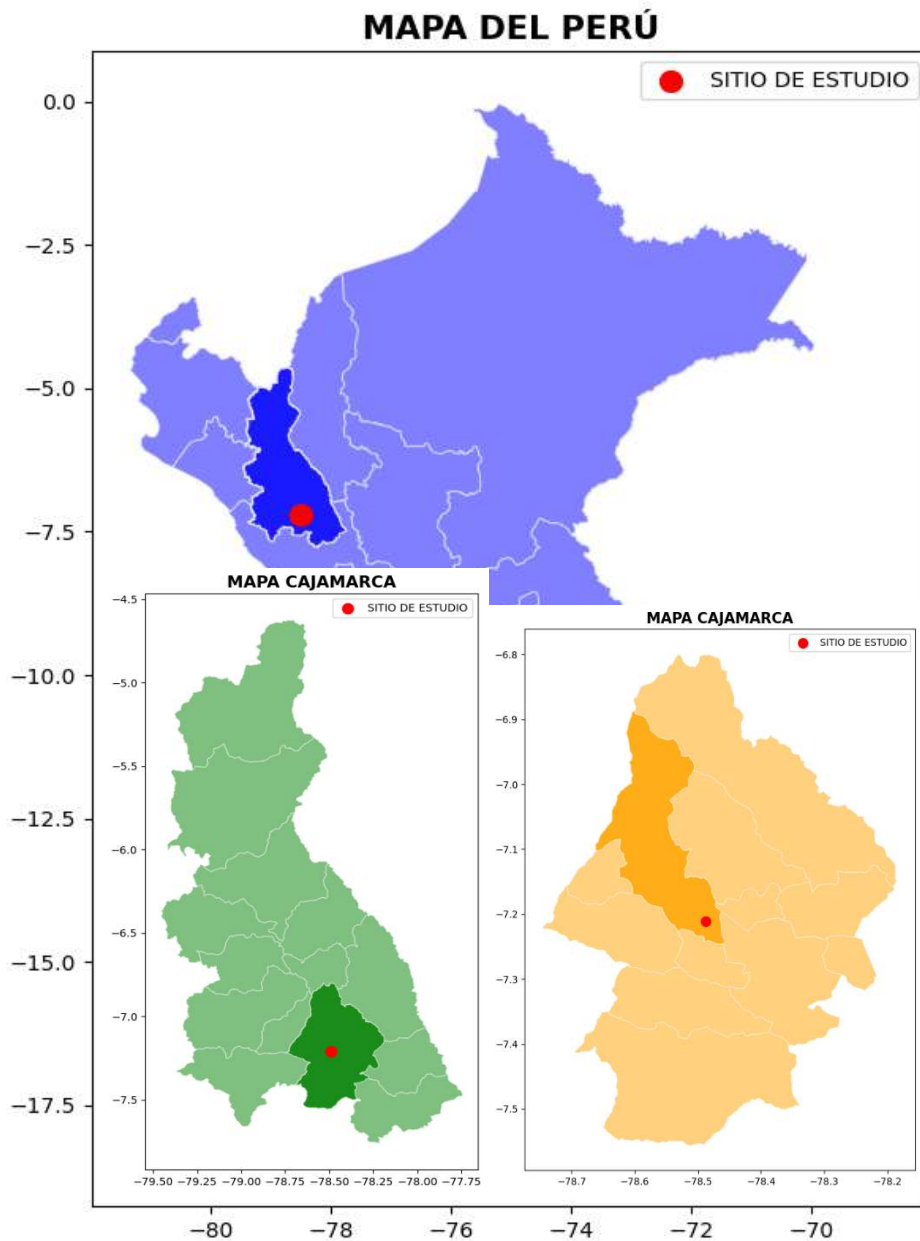
Es una representación gráfica que relaciona la respuesta no lineal de la estructura obtenida del análisis pushover con la demanda sísmica determinada en términos de desplazamientos y aceleraciones espectrales. (Soong & Hart 2014).

## CAPITULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1 UBICACIÓN DONDE SE REALIZÓ LA INVESTIGACIÓN

Este estudio se desarrolló en la región, provincia y distrito de Cajamarca, y se muestra en la figura 25, y una vista satelital en la figura 26, de tal manera que el estudio lo determinan los factores de esta zona.

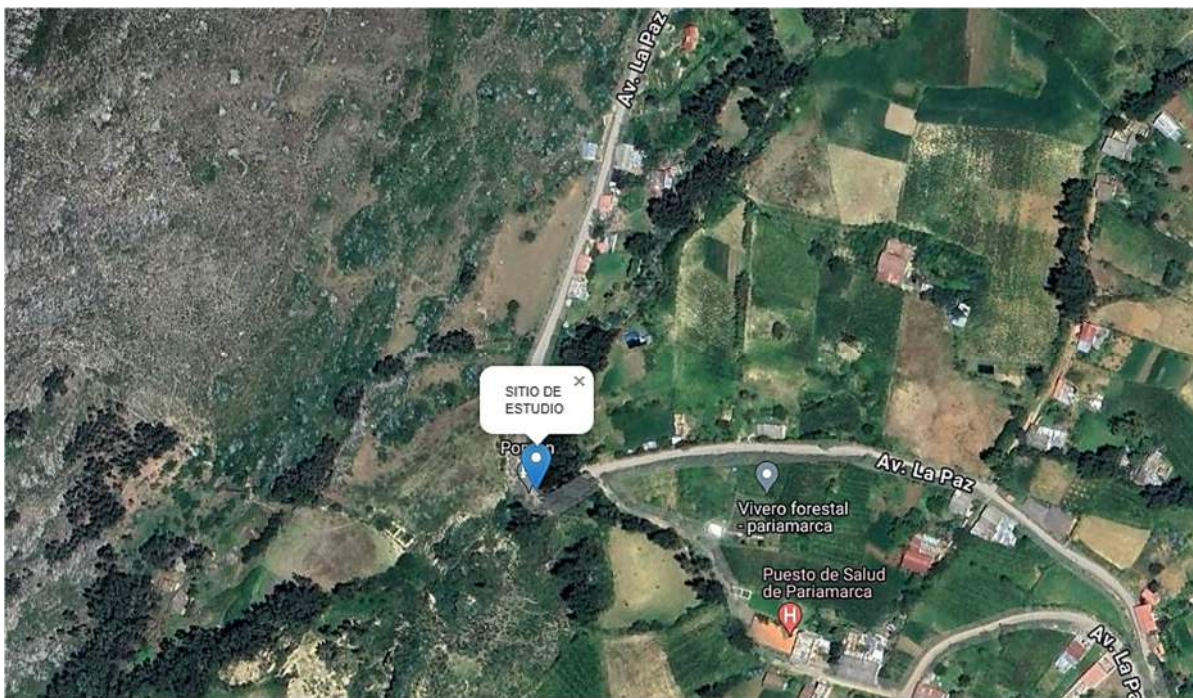
Figura 25  
Ubicación política del estudio.



Fuente: Elaboración propia.

El sitio de estudio se encuentra a una altura de 2850 metros sobre el nivel de mar. Y coordenadas indicadas en la tabla 5, presenta también un clima templado que por el día es seco y por la noche es frío, y en una zona geográfica accidentada como se muestra en la figura 26, según la clasificación de carreteras de manual de Diseño Geométrico 2018, definido en esta región debido a la orografía accidentada y formaciones geológicas como las gargantas o cañones.

Figura 26  
Vista satelital del sitio de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5  
Coordenadas del puente.

<b>COORDENADAS UTM</b>	<b>COORDENADA GEOGRÁFICAS</b>
NORTE: 227762 m	LATITUD: -7.210542
ESTE: 9202587 m	LONGITUD: -78.488083

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2 MATERIALES

Para el desarrollo del presente estudio se utilizó una computadora de alto rendimiento, equipada con 64 GB de memoria RAM, una tarjeta gráfica de 12 GB y un procesador de 16

núcleos hasta 4000hz de procesamiento. Estas especificaciones fueron esenciales para el procesamiento eficiente de datos estadísticos y analíticos, especialmente considerando que el análisis no lineal demanda recursos computacionales significativos. La capacidad avanzada del equipo permitió realizar cambios en el modelo matemático de manera ágil y precisa, evitando demoras que podrían dificultar el análisis y la actualización de los elementos del puente. Sin esta configuración adecuada, cada modificación en el modelo habría sido lenta, complicando el proceso de modelamiento y afectando la obtención rápida de resultados.

### **3.3 METODOLOGÍA**

#### **3.3.1 Enfoque, Diseño, Tipo, Nivel y Método de Investigación.**

##### **3.3.1.1 Enfoque**

La presente investigación posee un enfoque cuantitativo dado que se realizó un análisis de datos numéricos, además es de corte transversal ya que los datos se han recogido en un momento dado.

##### **3.3.1.2 Diseño**

El diseño de la siguiente investigación es no experimental ya que no se ha realizado manipulación de las variables de estudio.

##### **3.3.1.3 Tipo**

La presente investigación es de tipo aplicada ya que busca la resolución de un problema práctico haciendo uso de conocimientos teóricos.

##### **3.3.1.4 Método**

En esta investigación se utilizó el método inductivo-deductivo, ya que se establecieron primero los componentes estructurales de los puentes para luego realizar un análisis general de las características estructurales de los puentes.



### **3.3.1.5 Nivel de investigación**

Esta investigación posee nivel descriptivo ya que el análisis se realizó sin intervención, describiendo el fenómeno como es natural.

### **3.4 POBLACION DE ESTUDIO**

La población de estudio está conformada por Puentes metálicos en la Provincia de Cajamarca.

### **3.5 MUESTRA**

Un puente curvo y un puente recto, el tablero es de concreto armado y con vigas metálicas de alma llena en la Provincia de Cajamarca.

### **3.6 UNIDAD DE ANÁLISIS**

La Unidad de análisis o elementos básicos que se estudian en esta investigación es el siguientes; Puente recto y curvo con y sin disipadores sísmicos en apoyos, longitud de 30m, radio de giro de 25m, peralte de 8% y un ancho de 9.00m y con sobreebancho de 0.80m.

### **3.7 PROCEDIMIENTO**

Para alcanzar los objetivos establecidos, se incluyen varias etapas que guían esta investigación, a continuación, se describe de forma detallada las frases que se han considerado.

#### **3.7.1 Parámetros técnicos de la vía**

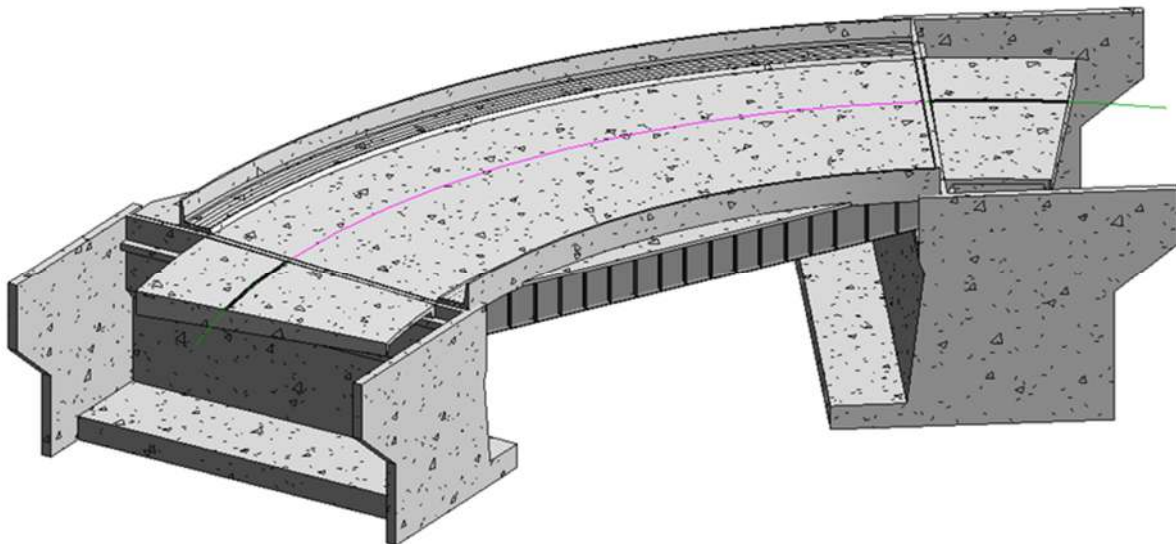
La tabla 6 muestra los parámetros de la vía, el planteamiento del puente será de acorde a tales parámetros, un ejemplo del puente se visualiza en la figura 27, la cual refleja la composición técnica del puente, así como la geometría planteada para cumplir estos parámetros técnicos.

Tabla 6  
Resumen de parámetros de diseño vial.

Ítem	Resultado	Unidad
Por su orografía:	Tipo IV - escarpado	
Por su demanda:	Carretera de tercera clase	
Velocidad de diseño:	30	km/h
R(min):	25	m
Longitud de puente:	30	m
Ancho de calzada:	6	m
Ancho de berma:	0.5	m
Peralte de calzada:	8	%
Ancho de vereda:	1	m
Sobre ancho:	0.8	m

Nota. Estos datos se necesitarán para elaborar el planteamiento del puente, se obtuvieron según el manual de Diseño Geométrico (DG 2018).

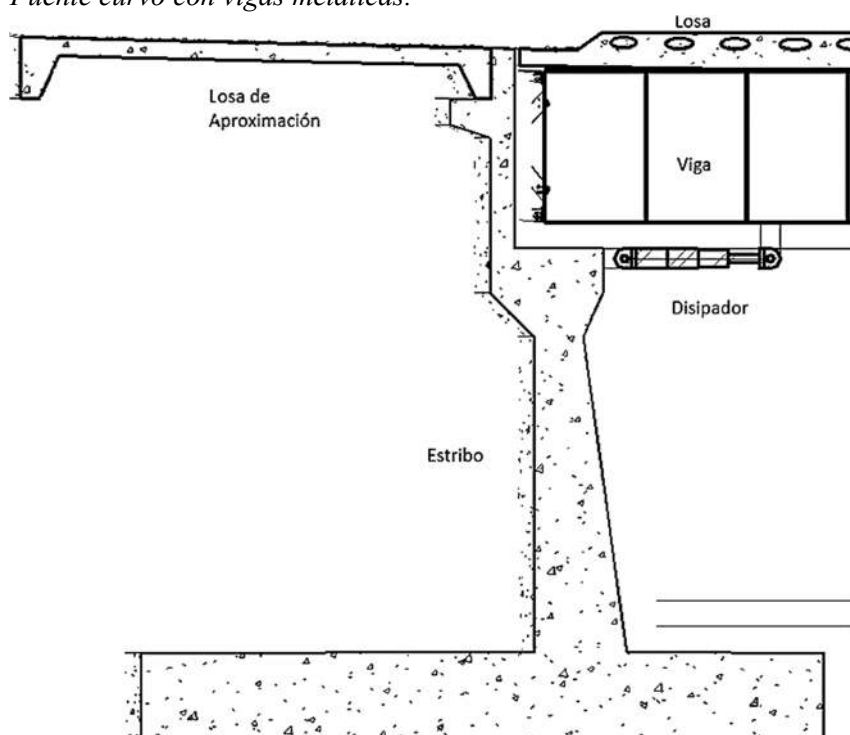
Figura 27  
Puente curvo con vigas metálicas.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 28, se muestra la ubicación posible de los disipadores, un tema muy importante es la localización en zonas estratégicas que nos ayuden a la disipación de energía de manera óptima, teniendo estas definiciones se procederá a la selección de los materiales que lo conforman.

Figura 28  
 Punte curvo con vigas metálicas.



Fuente: Elaboración propia.

Para definir las unidades que se someterán al análisis, se obtuvieron los parámetros viales descritos en la tabla 7 para la tipología curva y recta.

Tabla 7  
 Resumen de parámetros para los puentes que serán analizados.

Tipología de puente	Longitud (m)	Radio giro (m)	de Peralte (m)	Ancho Medio (m)	Ancho Lateral (m)
Recto con vigas metálicas	30.00	-	-	9.00	9.00
Curvo con vigas metálicas	30.00	25.00	8.00	9.80	9.00

Fuente: Elaboración propia.

Estas unidades descritas anteriormente se analizarán incorporándose los disipadores sísmicos, encontrando así graficas en las que se pueda visualizar el comportamiento ante los diferentes parámetros y tipología prevista y la comparación de estos mediante el rendimiento de la disipación de energía.

Para la sección transversal, constara de 9.00m, conformado por:

- ✓ Ancho de calzada 6m (1 vía de ida + 1 vía de retorno)
- ✓ Ancho de la berma = 0.50 m (2 laterales)
- ✓ Sobre ancho = 0.80 m (lateral, al radio menor)
- ✓ Ancho de vereda = 1.00 m (2 laterales)
- ✓ Ancho de baranda = 0.05 m (2 laterales)

### 3.7.2 Parámetros técnicos de los materiales

Para los materiales de concreto de la losa:

- ✓ Vigas preesforzadas de concreto armado  $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ .
- ✓ Peso unitario del concreto,  $Wc = 2402.77 \text{ kgf/m}^3$ .
- ✓ Módulo de elasticidad del concreto,  $Ec = 299512.87 \text{ kgf/cm}^2$ .
- ✓ Coeficiente de Poisson,  $u = 0.20$ .
- ✓ Coeficiente de expansión térmica  $8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Para los materiales de acero estructural de vigas metálicas, arriostres y atiesadores:

- ✓ Las vigas metálicas serán de alma llena compuesto de acero estructural ASTM A709 grado 50,  $f_y = 3500 \text{ kg/cm}^2$ .
- ✓ Módulo de elasticidad, ASTM A709 grado 50,  $Ea = 2039432.426 \text{ kg/cm}^2$ .

Para los materiales, que no interfieren en el modelamiento de la superestructura:

- ✓ Las veredas serán de concreto  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ .
- ✓ Los tubos y planchas metálicas en las barandas serán de ASTM A36  $f_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$ .
- ✓ Los apoyos serán de neopreno dureza 60 de 500 mm x 300 mm x 100 mm, los cuales deben ser reforzados con láminas interiores (04 und) de acero de 2 mm de espesor y 2 láminas exteriores de acero de 25 mm.

- ✓ El asfaltado del puente se colocará un Slurry Seal (Mortero Asfáltico) de 12 mm de espesor.

Para los materiales del acero de refuerzo:

- ✓ El acero de refuerzo será de Acero corrugado ASTM A615 grado 60  $f_y = 4200\text{kg/cm}^2$ .
- ✓ Peso unitario del acero de refuerzo,  $W_s = 7849.05\text{ kgf/m}^3$ .
- ✓ Módulo de elasticidad,  $E_s = 2038901.69\text{ kgf/cm}^2$ .

### 3.7.3 Normativas Empleadas

Las normas y códigos que se han empleado para el análisis y diseño del puente son:

- ✓ Specification for Structural Steel Buildings (American Institute of Steel Construction, 2016).
- ✓ Bridge Welding Code (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2015).
- ✓ Manual de Puentes (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018).
- ✓ LRFD Bridge Design Specifications (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020).
- ✓ Guide Specifications for Seismic Isolation Design (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2014).
- ✓ Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020).
- ✓ Division of Engineering Services Bridge Design Practice (State of California Department of Transportation, 2022)

### 3.7.4 Diagrama de Flujo

La filosofía general para el desarrollo de puentes establece lo siguiente para un diseño sismorresistente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020)

- ✓ Tipo 1: Subestructura dúctil con superestructura elástica.
- ✓ Tipo 2: Subestructura y superestructura elásticas con un mecanismo de conexión entre ellas.

Los puentes se desarrollan mediante un diseño por desplazamientos, siendo mucho mejor que un diseño por fuerza o resistencia, debido a su gran demanda dinámica de la estructura y su comportamiento inelástico. La metodología por desempeño sísmico proporciona una visión más realista y precisa del comportamiento estructural frente a eventos sísmicos. En la figura 29, se detalla el diagrama de flujo que se seguirá para cumplir las exigencias de esta metodología. Este enfoque no solo garantiza la estabilidad y seguridad del puente, sino que también optimiza el uso de materiales y costos de construcción, proporcionando una solución más eficiente y sostenible para el diseño de puentes.

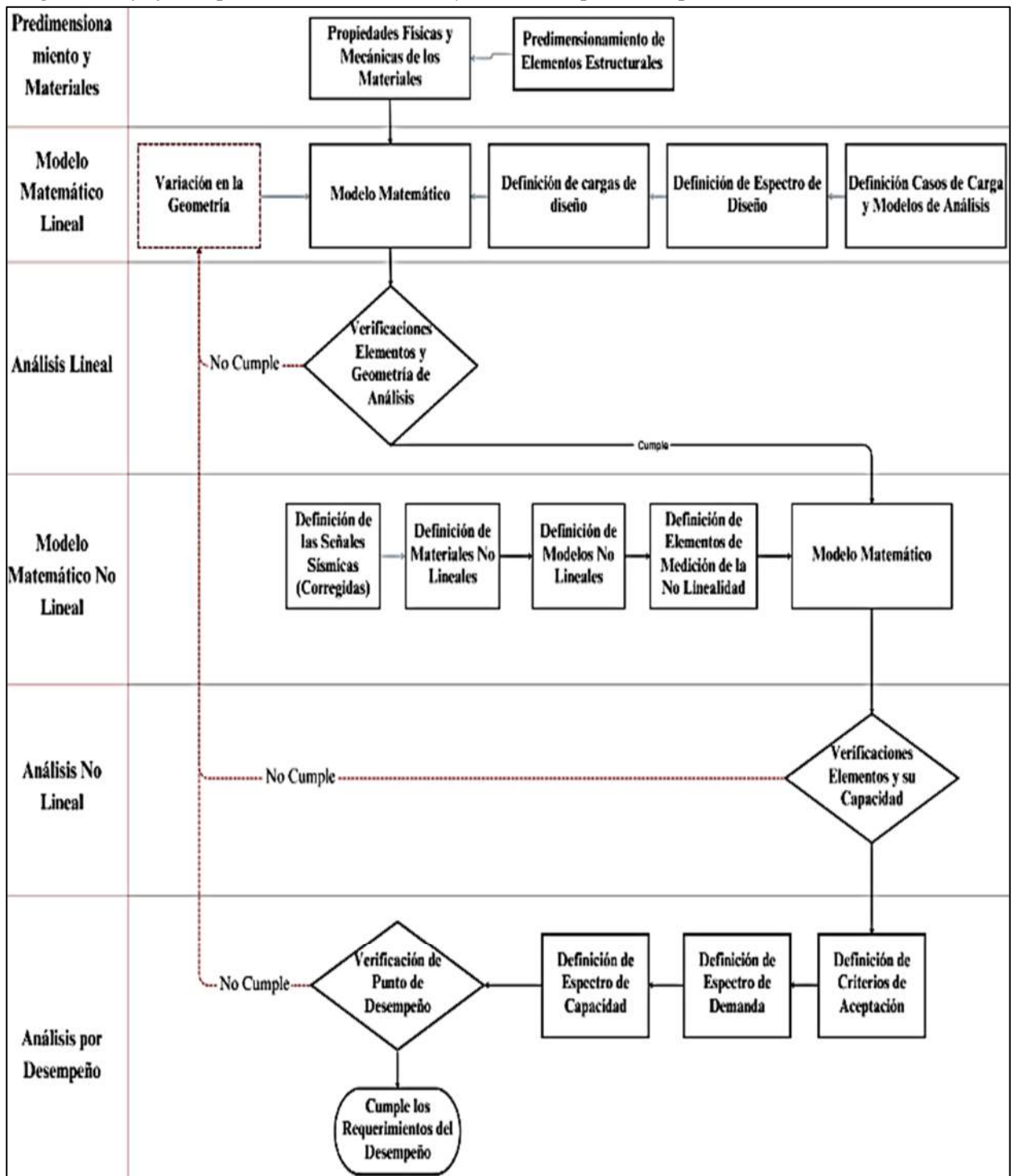
Determinaremos los pasos a seguir para completar el modelado de los puentes:

- a. Predimensionamiento y materiales: Define las secciones, materiales y propiedades físicas y mecánicas que se usaran en el preanálisis del puente.
- b. Modelo Matemático Lineal: Consiste en la realización de líneas de referencia utilizadas para definir la alineación horizontal y vertical del puente y los carriles para vehículos así el modelamiento de los elementos estructurales, también pueden ser referenciados por nodos si son muy complejos; definición de las cargas de diseño (peatón, la de concreto de las veredas, parapetos, del peatón, la de concreto de las veredas, parapetos, ductos, etc.; también la carga del pavimento, la carga del vehículo de diseño, etc.), espectro de diseño y casos de carga, así como la definición del modelo de análisis.

- c. Análisis Lineal: Se verificarán diseño según normativas vigentes, el análisis cumplirá los requerimientos del código del Manual de Puentes y verificaciones que los elementos garanticen su estabilidad según un Análisis Estructural; si cumple, se tienen las dimensiones finales de diseño para un espectro de diseño según el manual de puentes y si no cumple, se realizarán modificaciones en las propiedades o geometría de la estructura.
- d. Modelo Matemático No Lineal: Cumpliendo el análisis lineal, procedemos a la definición de los materiales no lineales, así como la incorporación de la plasticidad a los elementos y materiales, determinando los modelos de fibra (plasticidad distribuida) o rotula plástica (plasticidad concentrada); Selección, tratamiento e incorporación de registros de movimiento del suelo por dirección. Creación de casos de carga no lineal tiempo historia por integración directa.
- e. Análisis No Lineal: Se evaluará para cumplir las solicitudes del manual de puentes y consideraciones actualizadas desarrolladas en el manual de la AASHTO LRFD 2020, estableciendo las solicitudes iniciales y verificaciones de los elementos estructurales; si cumple, se tienen las dimensiones finales de diseño para un espectro de diseño según el manual de puentes y si no cumple, se procederá a modificar las propiedades o geometría de la estructura.
- f. Análisis por Desempeño: Definición de los criterios de aceptación según categoría de la estructura siendo esenciales, luego se desarrollarán las metodologías planteadas por el código AASHTO LRFD 2020 para análisis por desempeño y el FEMA 440 para metodologías de análisis; si cumple, se tienen las dimensiones finales de diseño para un espectro de diseño según el manual de puentes y si no cumple, se realizarán modificaciones en las propiedades o geometría de la estructura.

Figura 29

Diagrama de flujo del procedimiento de diseño y evaluación por desempeño.



Fuente: Elaboración propia.

El diseño por desempeño asistido por computadora ofrece una metodología precisa y eficiente para modelar puentes, optimizando materiales y reduciendo costos. Utilizando software avanzado como Midas Civil, se simulan condiciones sísmicas reales, garantizando



estructuras seguras y sostenibles, cumpliendo con estándares internacionales como el AASHTO LRFD 2020.

### **3.7.5 Nivel de Desempeño**

Se selecciona para el estudio mantenerse en el rango Operacional y Totalmente Operacional, catalogando estos puentes como críticos y esenciales, para cumplir con sus funciones que son de abastecer a las ciudades en caso de desastres, y también de dar una comunicación entre ellas.

### **3.7.6 Procedimiento para el tratamiento de señales sísmicas**

Las señales sísmicas fueron extraídas de los registros sísmicos de la Red Acelerográfica CISMID (Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres), así como la Red Acelerográfica SENCICO (Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción) y de la Red Acelerográfica de PG-FIC-UNI (Universidad Nacional de Ingeniería) a través de su servicio CEOIS (Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica).

#### **3.7.6.1 Análisis tiempo historia**

Con el diagrama de flujo, con los componentes del diseño Tiempo Historia para los puentes, se evaluó según la normativa de diseño de puentes.

Posteriormente se realizó el análisis tiempo Historia mediante el software Midas Civil v2022, en el cual se introdujo todos los datos que se obtuvieron de los sismos, para así obtener los resultados del Método Espectral Multimodal y para el Método Tiempo – Historia de siete (7) registros sísmicos que se dieron en el Perú detallados en la tabla 8, comenzando con el terremoto producido el 17 de octubre de 1966 en Lima, este fue registrado por el Instituto Geológico Arequipa, tuvo una magnitud de 8.1 y una profundidad de 24 km. Este sismo causó graves daños en Lima, afectando edificaciones y provocando numerosas pérdidas humanas y materiales.

El siguiente fue producido el 31 de mayo de 1970 en Áncash, este evento es recordado por el devastador aluvión del Huascarán que sepultó la ciudad de Yungay. Con una magnitud de 6,6 y 130 km de profundidad, lo estudió el Instituto Geológico Arequipa. Este terremoto es uno de los desastres naturales más trágicos en la historia del Perú; el siguiente se produjo el 3 de octubre de 1974 en Lima, otro terremoto significativo en la capital, también registrado por el Instituto Geológico Arequipa, con una magnitud de 6.6 y una profundidad de 13 km. A pesar de ser menos intenso que el de 1966, causó importantes daños y generó alarma entre la población; el 15 de agosto de 2007 en Ica, con una magnitud de 7.0 y una profundidad de 145 km, este sismo devastó las ciudades de Ica, siendo la más afectada Pisco. Registrado por la Casa Dr. Piqué, dejó cientos de muertos y miles de viviendas destruidas, subrayando la vulnerabilidad de las construcciones en la región.

Uno de los más actuales fue producido el 22 de febrero de 2019 en Loreto, este terremoto en la región amazónica tuvo una magnitud de 7.7 y una profundidad de 113 km. Registrado por la Gerencia Zonal SENCICO Iquitos, su considerable profundidad ayudó a mitigar los daños en la superficie, aunque fue ampliamente sentido; Solo unos meses después, otro fuerte sismo sacudió Loreto en Lagunas, ocurrió el 26 de mayo de 2019 en Loreto, esta vez con una magnitud de 8 y una profundidad de 135 km. Al igual que el anterior, fue registrado por la Gerencia Zonal SENCICO Iquitos y destacó la actividad sísmica en la región, este evento causó daños en las carreteras en múltiples puntos aledaños.

Finalmente se usó la señal del terremoto producido el 28 de noviembre de 2021 en Loreto, el terremoto más reciente en esta lista tuvo una magnitud de 7.5 y una profundidad de 131 km. Registrado nuevamente por la Gerencia Zonal SENCICO Iquitos, este evento subraya la necesidad continua de preparación y respuesta efectiva ante desastres naturales en Perú, existen múltiples sismos más que no fueron tan incidentes en la historia, sin embargo existe un

“silencio sísmico”, frase dicha para la falta de actividad sísmica significativa en la región durante un largo periodo, ello está muchos expertos en la materia, ya que produciría de acuerdo con el Instituto Geofísico del Perú (IGP), un evento de magnitud 9.0 en cualquier momento, este será catastrófico, potencialmente destruyendo más de 300000 viviendas, causando alrededor de 11000 muertes y 2 millones de heridos en Lima y Callao.

Tabla 8  
Registros sísmicos.

Fecha	Epicentro	Estación	Dirección	PGA (m/s <sup>2</sup> )	Profundidad (km)	Magnitud local
17/10/1966	LIMA	Instituto Geológico Arequipa	Latitud Longitud	-10.70 -78.70	24	M 8.1
31/05/1970	ANCASH	Instituto Geológico Arequipa	Latitud Longitud	-12.07 -77.04	130	M 6.6
03/10/1974	LIMA	Instituto Geológico Arequipa	Latitud Longitud	-12.50 -77.98	13	M 6.6
15/08/2007	ICA	Casa Dr. Piqué	Latitud Longitud	-12.09 -76.90	145	M 7.0
22/02/2019	LORETO	Gerencia Zonal SENCICO Iquitos	Latitud Longitud	-2.00 -77.19	113	M 7.7
26/05/2019	LORETO	Gerencia Zonal SENCICO Iquitos	Latitud Longitud	-5.74 -75.55	135	M 8.0
28/11/2021	LORETO	Gerencia Zonal SENCICO Iquitos	Latitud Longitud	-4.44 -77.00	131	M 7.5

Fuente: (Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres)

### 3.7.6.2 Corrección de registros sísmicos

Se realizó una corrección básica por línea base (Polinomio Lineal) por ruido – Ancho de frecuencias (Butterworth - Band stop).

La corrección de estos registros se tiene que escalar a un espectro de diseño determinado por el Manual de Puentes, teniendo registros que se pueden utilizar en la evaluación de la respuesta de la estructura, las figuras siguientes, establecen la señal sísmica ya corregida para cada componente Este-Oeste (EW) y Norte-Sur (NS) para la aceleración, velocidad y desplazamiento.

a) Registro Sísmico de Lima (1966-10-17-PRQ-LIMA)

Figura 30

Registro sísmico PGA, PGV y PGD corregido en la dirección EW.

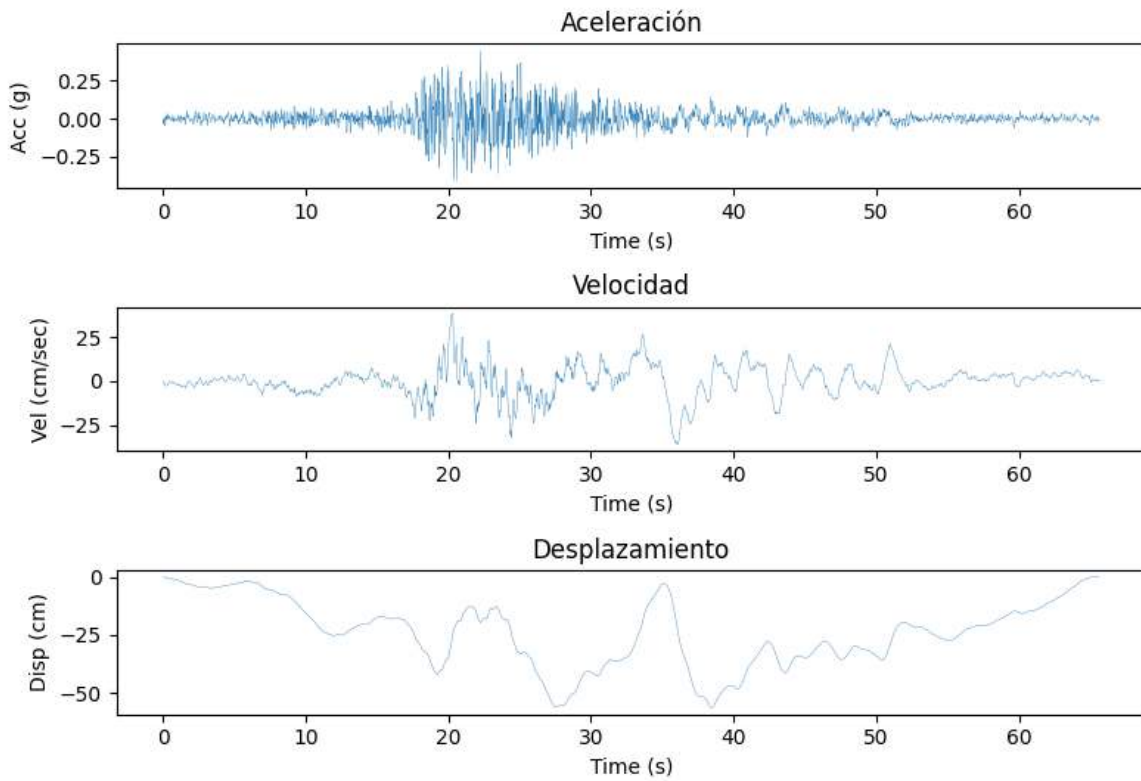
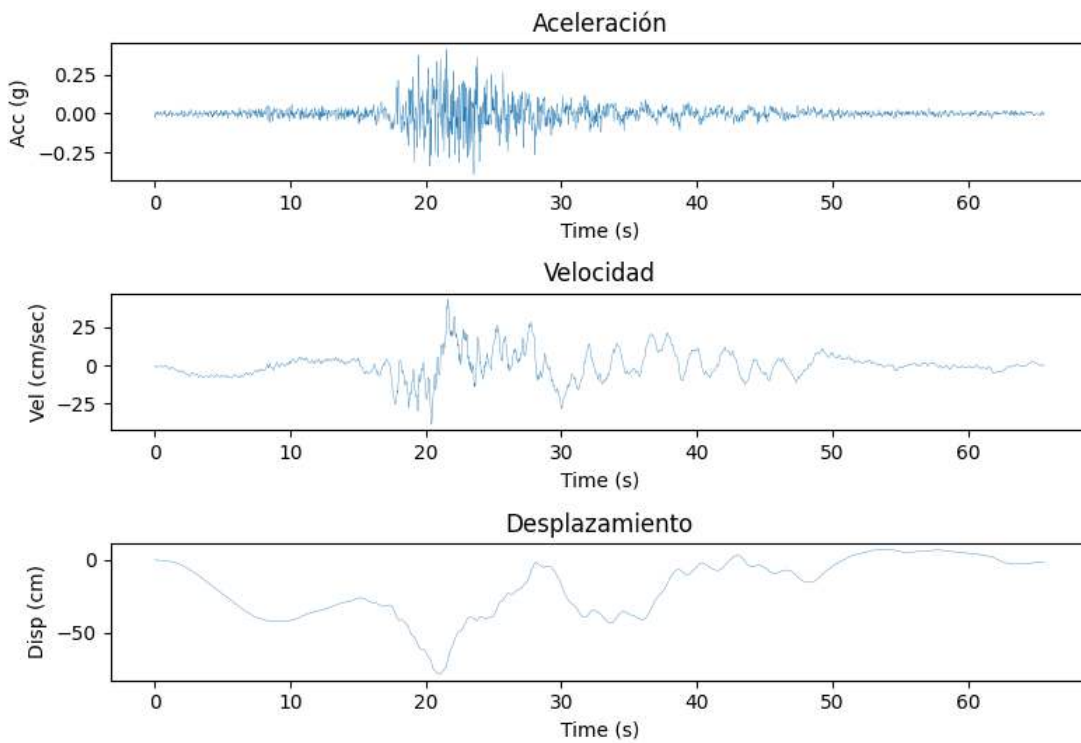


Figura 31

Registro sísmico corregido PGA, PGV y PGD corregido en la dirección NS.



b) Registro Sísmico de Ancash (1970-05-31-PRQ-ANCASH)

Figura 32

Registro sísmico corregido PGA, PGV y PGD corregido en la dirección EW.

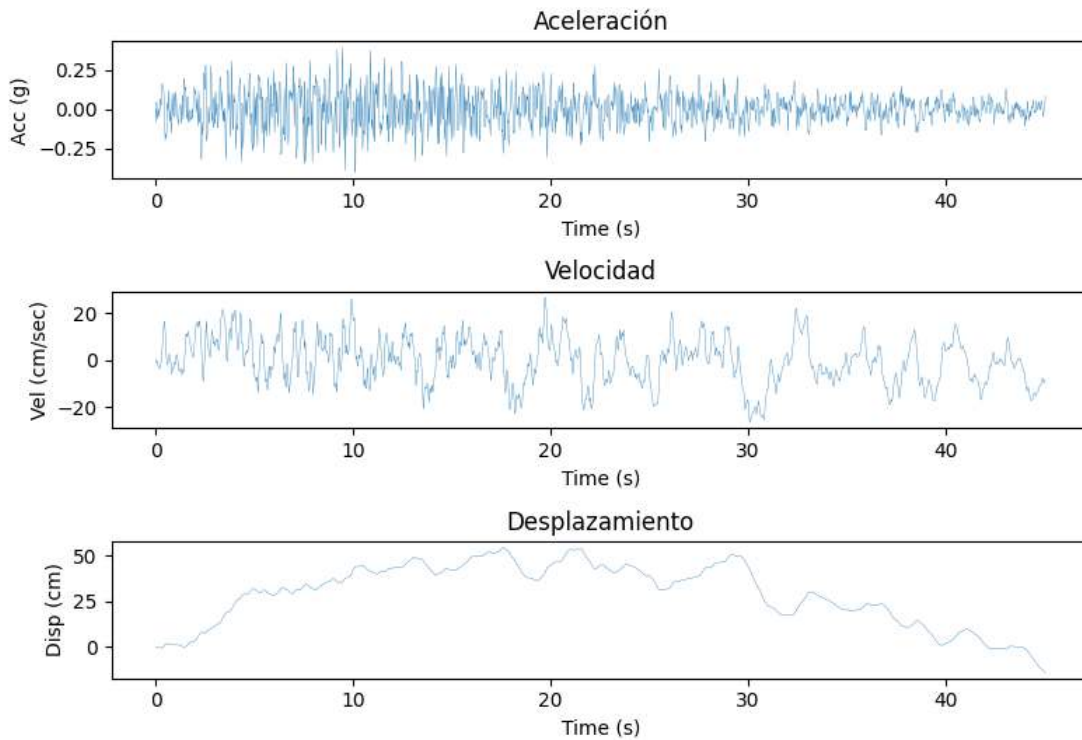
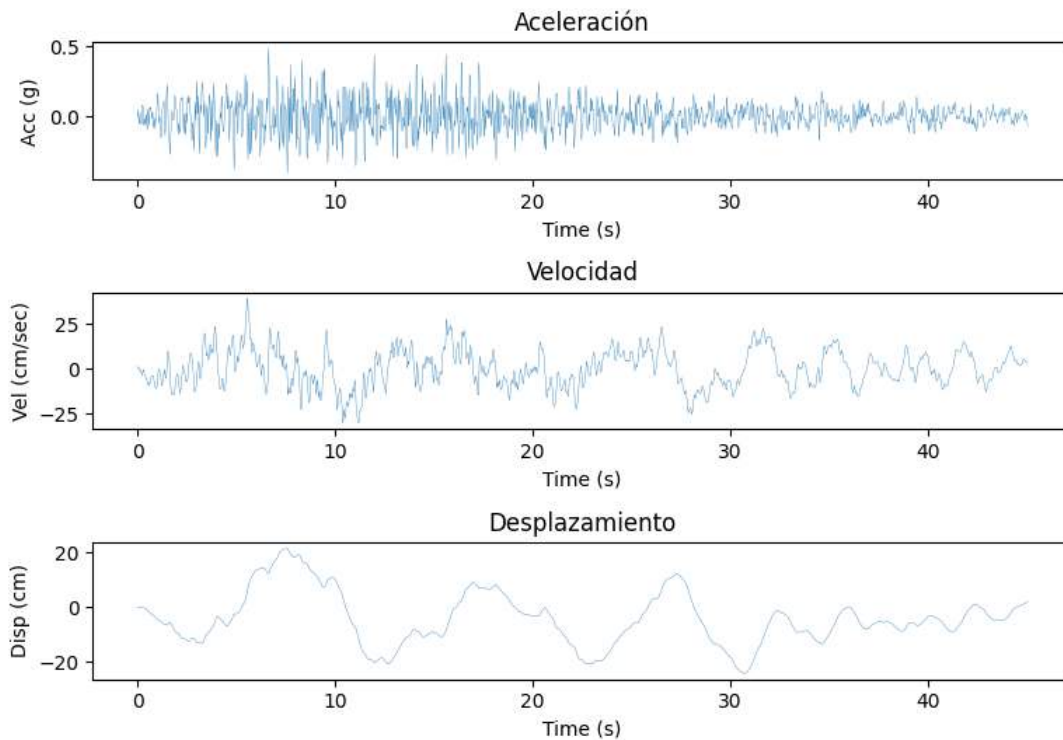


Figura 33

Registro sísmico corregido PGA, PGV y PGD corregido en la dirección NS.



c) Registro Sísmico de Lima (1974-10-03-PRQ-LIMA)

Figura 34

Registro sísmico corregido PGA, PGV y PGD corregido en la dirección EW.

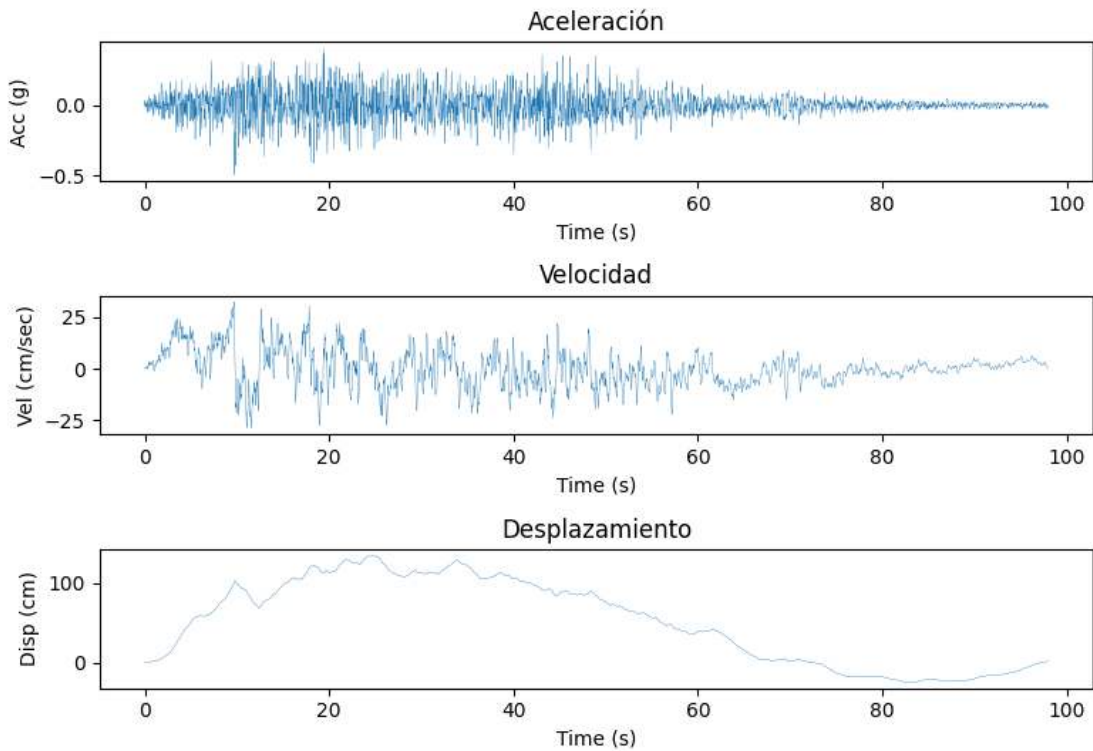
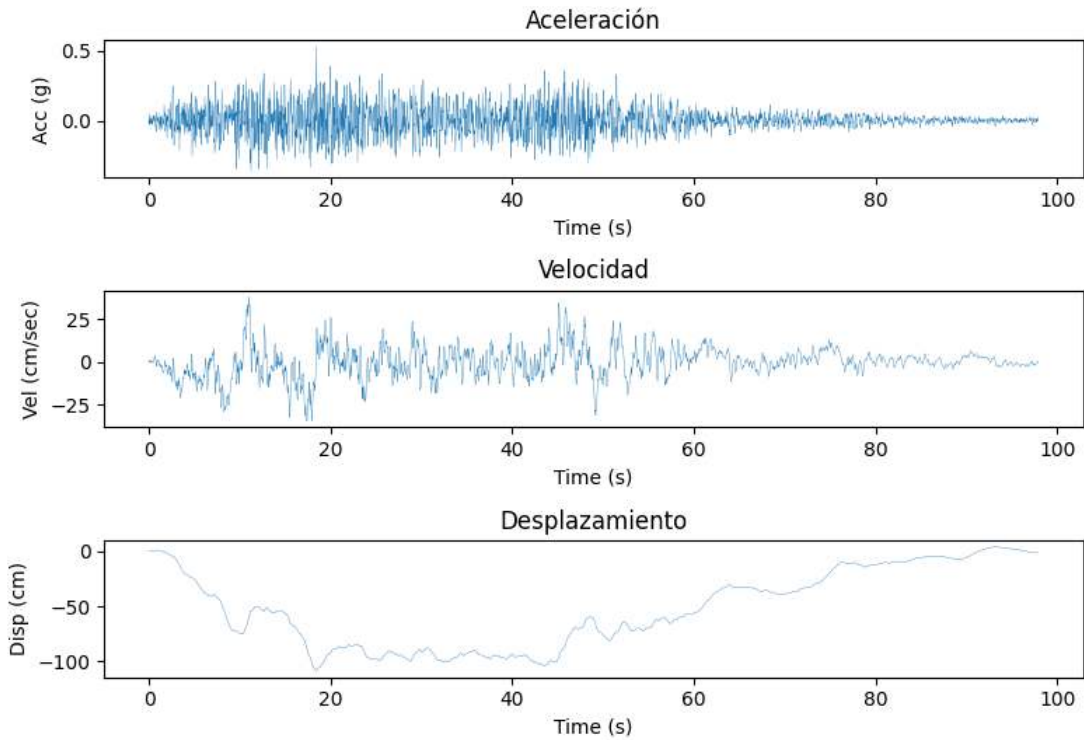


Figura 35

Registro sísmico corregido PGA, PGV y PGD corregido en la dirección NS.



d) Registro Sísmico de Ica (2007-08-15-LIM-ICA)

Figura 36

Registro sísmico corregido PGA, PGV y PGD corregido en la dirección EW.

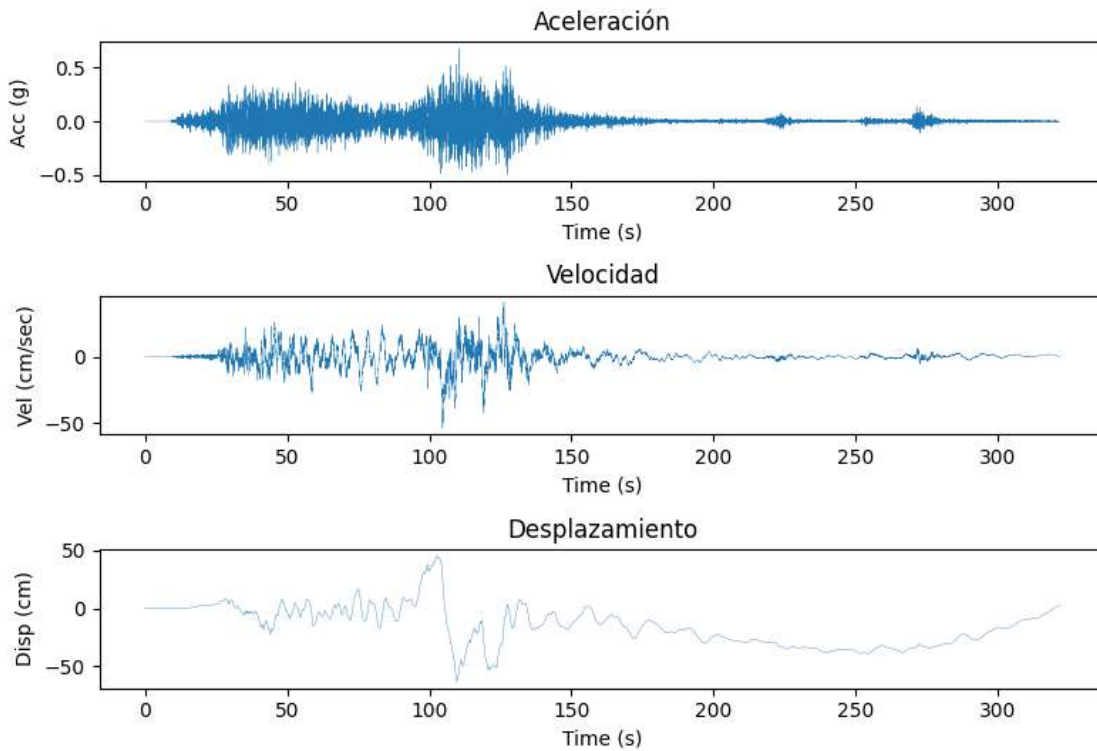
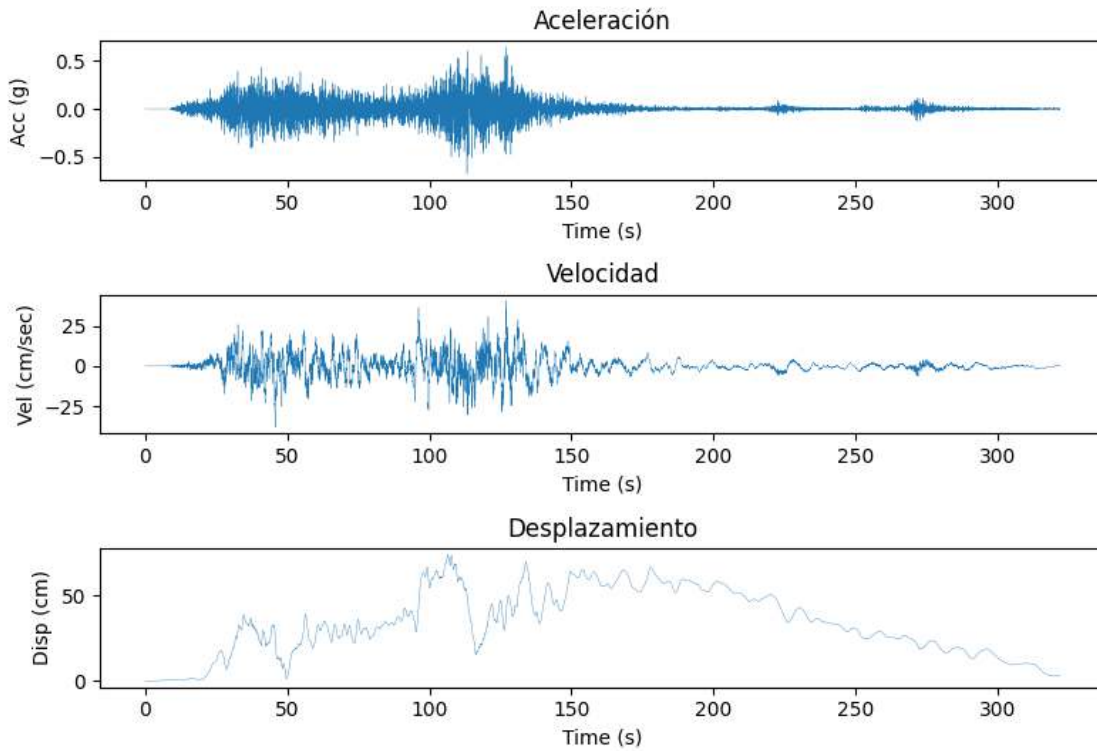


Figura 37

Registro sísmico corregido PGA, PGV y PGD corregido en la dirección NS.



e) Registro Sísmico de Loreto (2019-02-22-SCIQU-LORETO)

Figura 38

Registro sísmico corregido PGA, PGV y PGD corregido en la dirección EW.

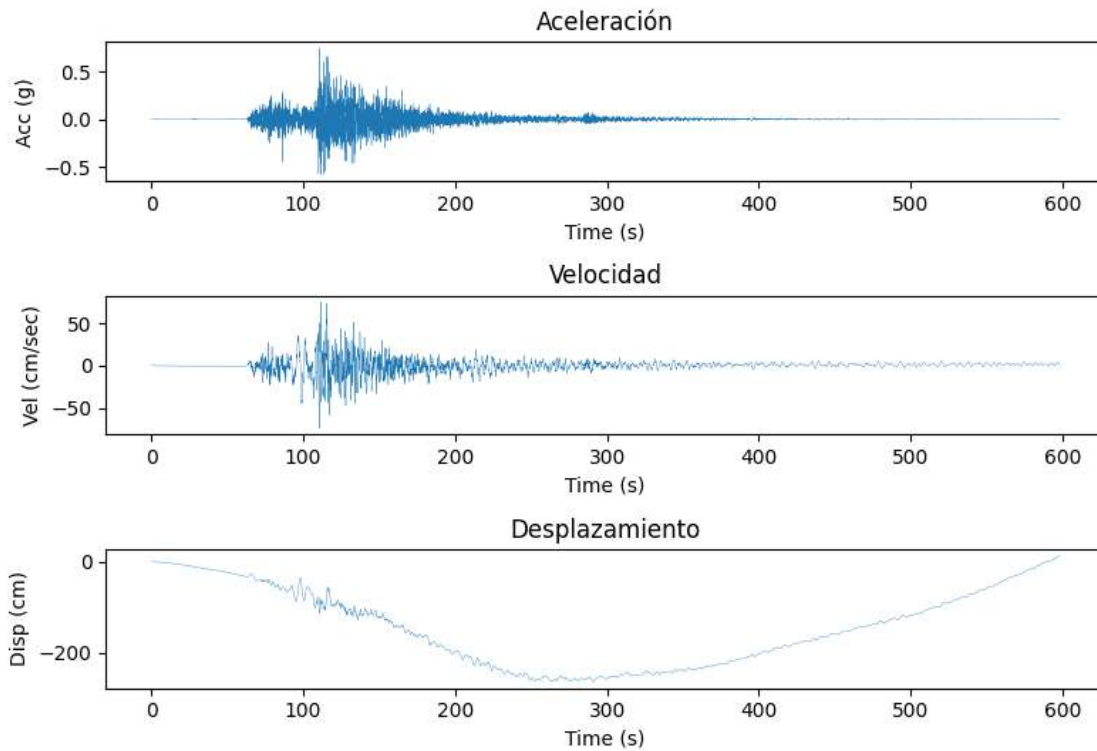
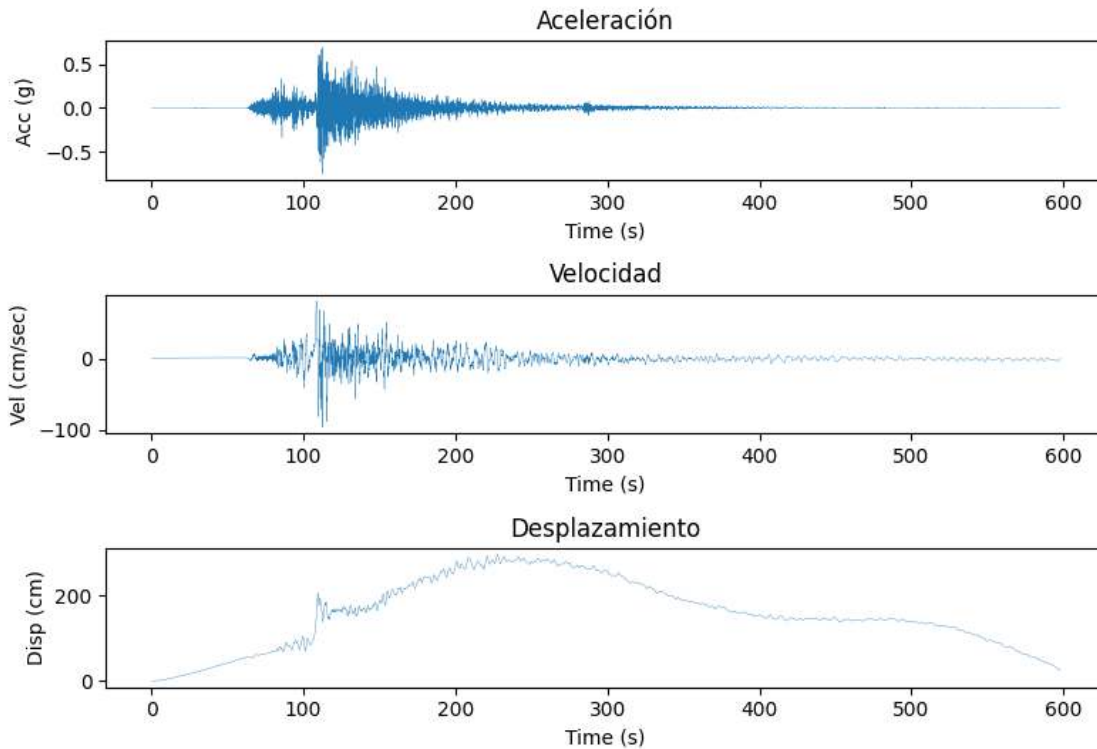


Figura 39

Registro sísmico corregido PGA, PGV y PGD corregido en la dirección NS.





f) Registro Sísmico de Loreto (2019-05-26-SCIQU-LORETO)

Figura 40

Registro sísmico corregido PGA, PGV y PGD corregido en la dirección EW.

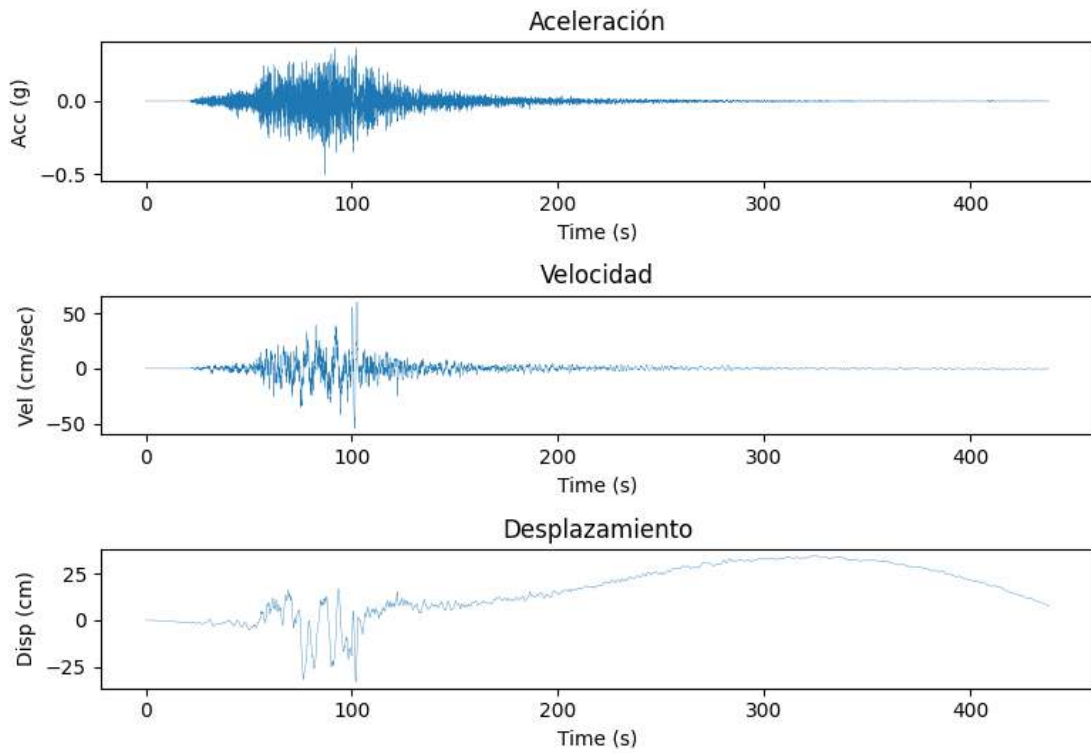
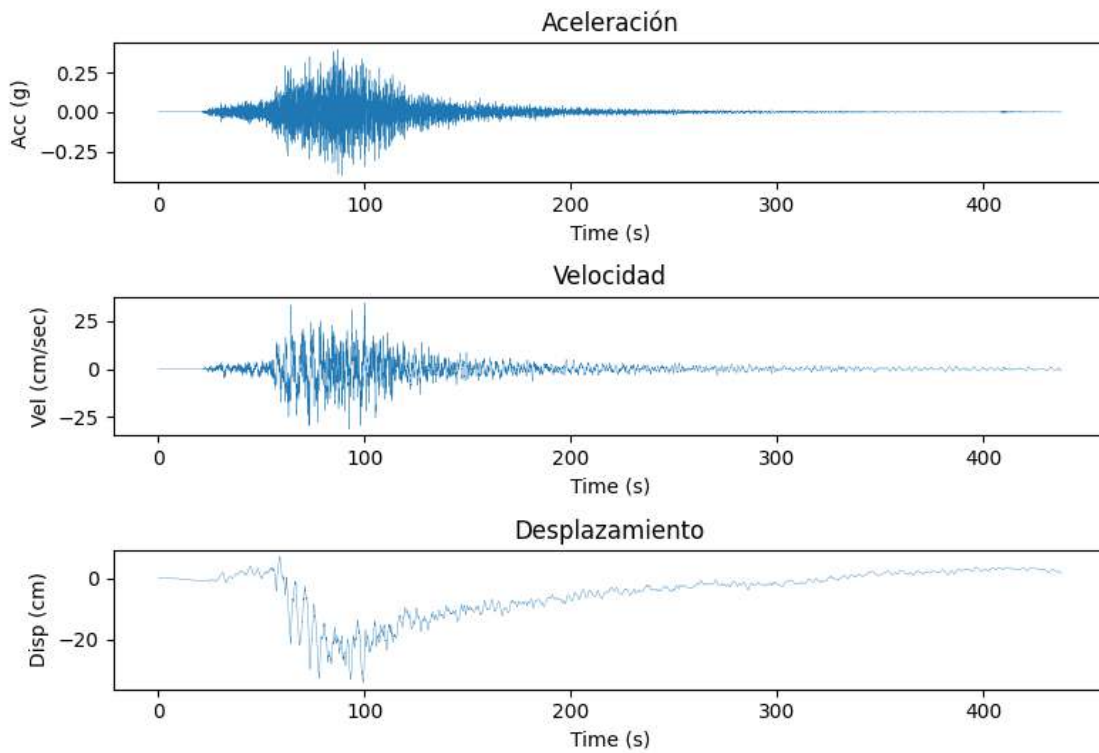


Figura 41

Registro sísmico corregido PGA, PGV y PGD corregido en la dirección NS.



g) Registro Sísmico de Loreto (2021-11-28-SCIQU-LORETO)

Figura 42

Registro sísmico corregido PGA, PGV y PGD corregido en la dirección EW.

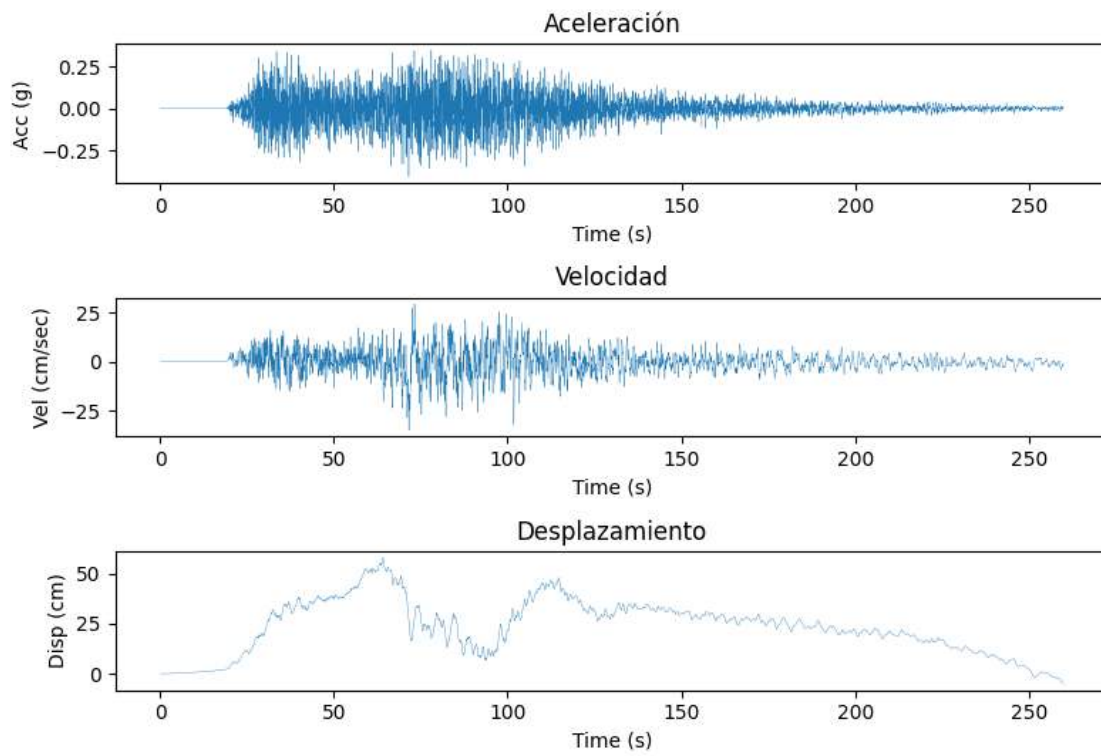
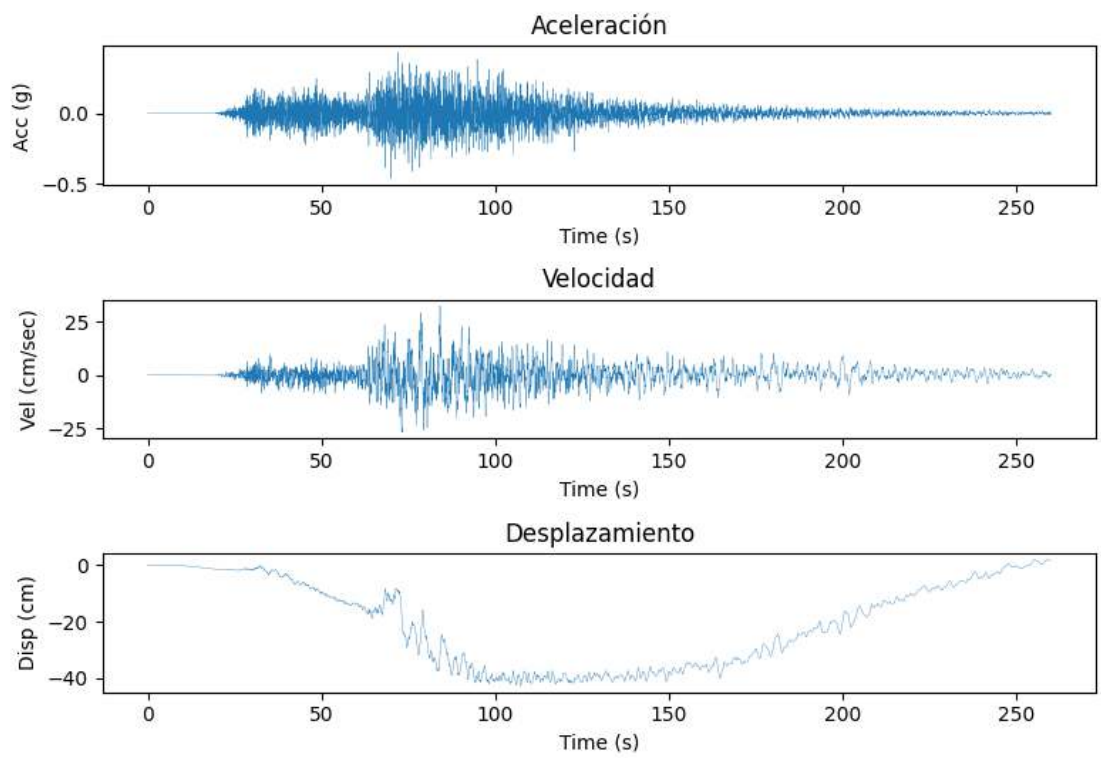


Figura 43

Registro sísmico corregido PGA, PGV y PGD corregido en la dirección NS.



### 3.7.6.3 Espectro de diseño

Se estableció el espectro de diseño de acuerdo con el Manual de Puentes del Ministerio de Transportes y Comunicaciones. El espectro de diseño tiene los parámetros descritos en la tabla 9, que servirán para realizar el pseudo espectro de diseño que se realizara para el análisis de acuerdo con el manual de puentes del MTC teniendo como resultado un espectro de respuesta que se muestra en la figura 44:

Tabla 9  
Parámetros del espectro de diseño.

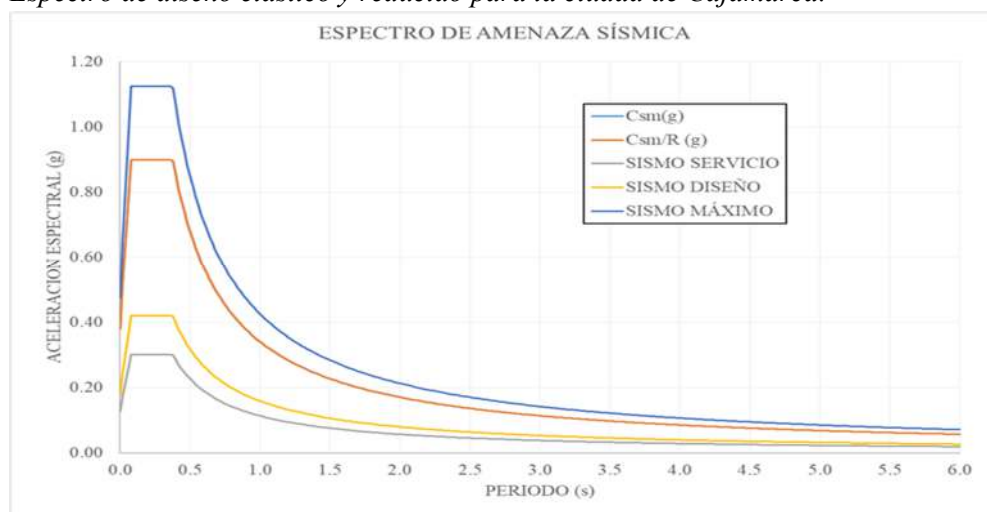
<i>Parámetros</i>	<i>Tipo B</i>		
<i>Peak Ground Acceleration</i>	<i>PGA</i>	<i>0.380</i>	<i>g</i>
<i>Aceleración espectral</i>	<i>Ss</i>	<i>0.900</i>	<i>g</i>
<i>Aceleración espectral t=1s</i>	<i>S1</i>	<i>0.340</i>	<i>g</i>
<i>Factor de amplificación para PGA</i>	<i>Fpga</i>	<i>1.000</i>	
<i>Factor de amplificación para Ss</i>	<i>Fa</i>	<i>1.000</i>	
<i>Factor de amplificación para S1</i>	<i>Fv</i>	<i>1.000</i>	
<i>Aceleración de diseño</i>	<i>As</i>	<i>0.380</i>	<i>g</i>
<i>Aceleración espectral de diseño</i>	<i>SDS</i>	<i>0.900</i>	<i>g</i>
<i>Aceleración espectral de diseño t=1s</i>	<i>SD1</i>	<i>0.340</i>	<i>g</i>
<i>Periodo de transición corto</i>	<i>T0</i>	<i>0.076</i>	<i>s</i>
<i>Periodo de transición largo</i>	<i>Ts</i>	<i>0.378</i>	<i>s</i>
<i>Periodo limite</i>	<i>TL</i>	<i>6.000</i>	<i>s</i>
<i>Factor de reducción sísmica</i>	<i>R</i>	<i>1.000</i>	

Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018)

Se realizó un análisis para determinar el espectro, utilizando un lenguaje de programación de Python, utilizando librerías como numpy, matplotlib, scipy, obspy, pandas y matplotlib obteniendo como resultado la figura 44, que muestra el espectro de diseño para diferentes periodos de retorno; mediante una solución de las ecuaciones planteadas para Csm, se estableció el código siguiente apoyado para los gráficos con Excel:

Figura 44

Espectro de diseño elástico y reducido para la ciudad de Cajamarca.



Fuente: Manual de Puentes (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2018)

### 3.7.6.4 Espectros compatibles y escalados al espectro de diseño

Se analizará los espectros detallados en la tabla 10 en el programa de SeismoMatch con el fin de determinar si son compatibles entre sí y posteriormente escalarlos al espectro de diseño, estas señales escaladas son las que se ingresaran en el software de modelamiento matemático.

Tabla 10

Señales sísmicas usadas en el estudio.

<i>Acelerograma</i>	<i>Convergencia</i>	<i>Error promedio</i>	<i>Error máximo</i>	<i>Iteraciones</i>
1966-10-17-PRQ-LIMA_X	Converged	1.9	29.2	17
1970-05-31-PRQ-ANCASH_X	Converged	4.2	24.2	22
1974-10-03-PRQ-LIMA_X	Converged	1.3	28.9	12
2007-08-15-LIM-ICA_X	Converged	0.9	29.3	56
2019-02-22-SCIQU-LORETO_X	Converged	2.9	19.4	14
2019-05-26-SCIQU-LORETO_X	Converged	4.6	27.6	17
2021-11-28-SCIQU-LORETO_X	Converged	1.6	27.8	35
1966-10-17-PRQ-LIMA_Y	Converged	2.4	26.3	14
1970-05-31-PRQ-ANCASH_Y	Converged	4.1	29.9	9
1974-10-03-PRQ-LIMA_Y	Converged	1.5	28.4	13
2007-08-15-LIM-ICA_Y	Converged	4.9	29.7	36
2019-02-22-SCIQU-LORETO_Y	Converged	7.8	26.9	18
2019-05-26-SCIQU-LORETO_Y	Converged	2.2	28.7	13
2021-11-28-SCIQU-LORETO_Y	Converged	1.3	29.4	24

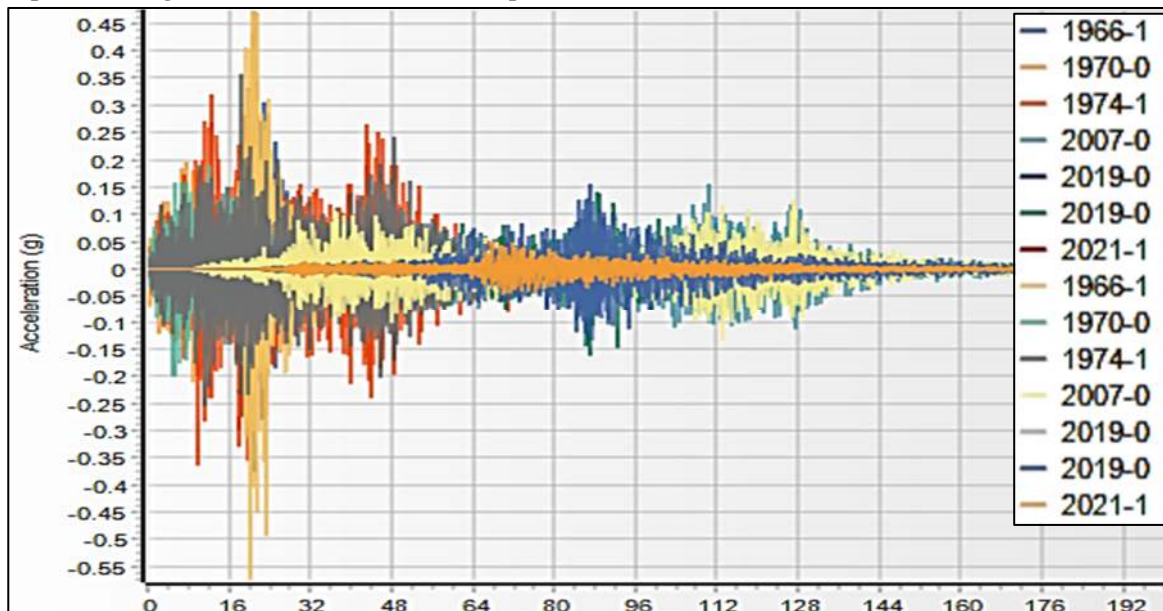
Fuente: Elaboración propia.

Ingresando los datos en el programa, inicialmente se tiene aceleraciones establecidos en la figura 45 para las 14 señales sísmicas en las 2 componentes, siendo x e y, estas señales

deben estar corregidas por línea base y ruido para poder usarlas en el software, en la figura 46, los datos ya escalados y siendo espectros compatibles y escaladas al espectro de diseño.

Figura 45

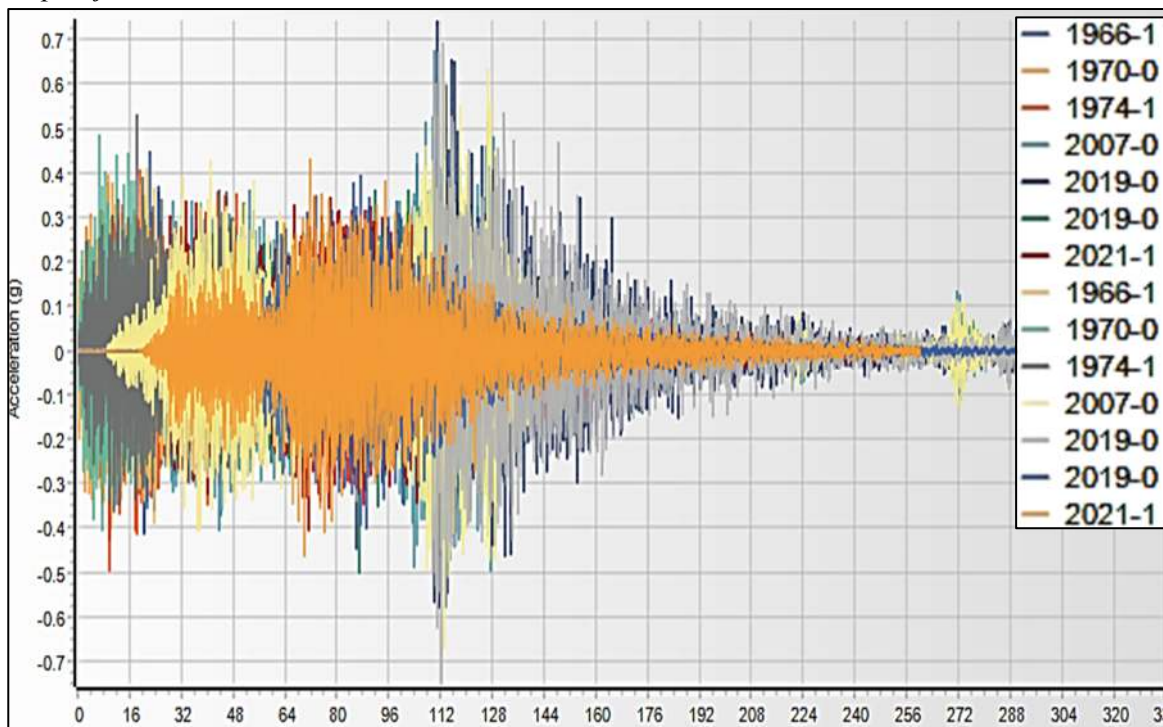
Espectros originales en la historia del tiempo.



Nota. Espectros originales de eventos sísmicos para comparar la intensidad y duración de las ondas. Datos generados con SeismoMatch.

Figura 46

Emparejamiento de señales sísmicas.

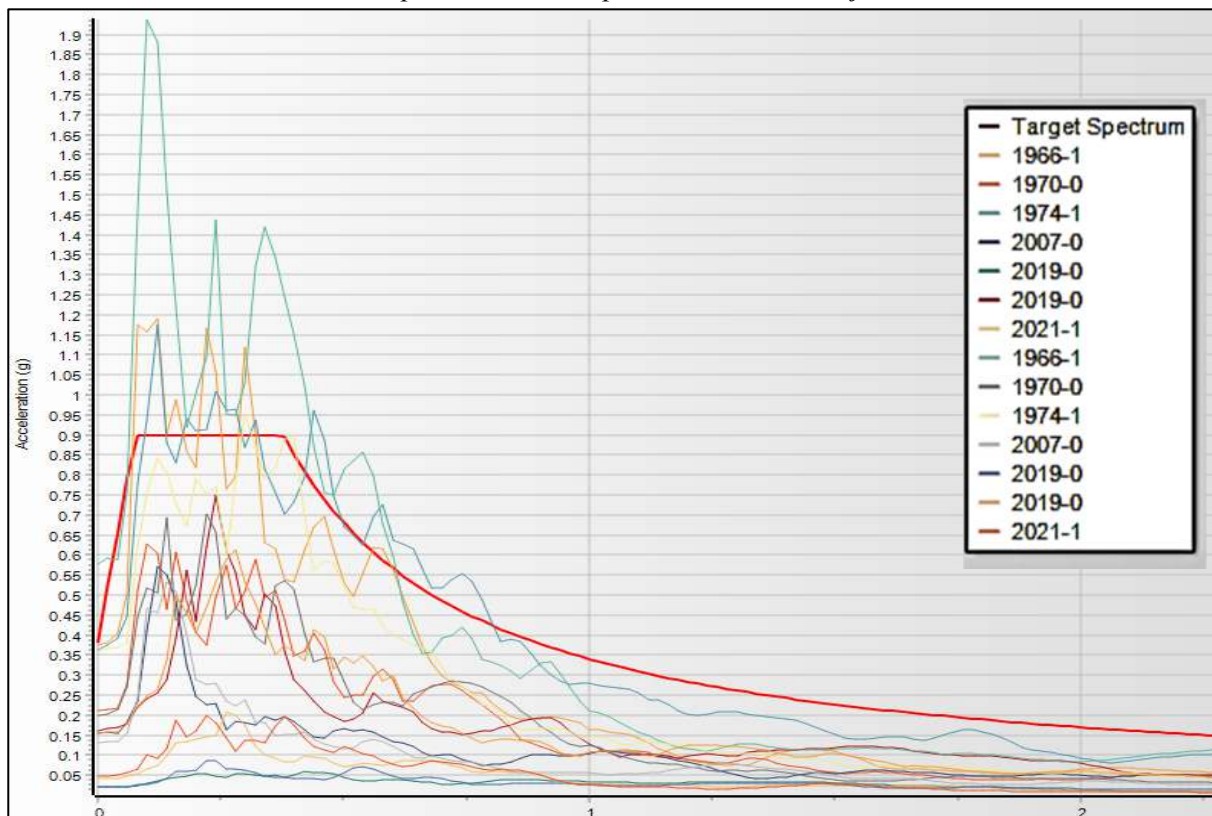


Nota. Emparejamiento de señales sísmicas de diferentes años, comparando las aceleraciones a lo largo del tiempo. Generado con el software SeismoMatch.

Para el análisis espectral, el programa transforma la señal sísmica a espectro, como se muestra en la figura 47, donde se visualizan los 14 registros comparados con el espectro de diseño. En esta figura, se aprecian diferentes registros, algunos de los cuales sobresalen y otros son inferiores al espectro de diseño. Tras escalar las señales sísmicas, se obtiene la figura 48, en la que las señales se alinean de manera más precisa con el espectro de diseño para ambas componentes X e Y. Este ajuste es crucial para garantizar que los datos sísmicos sean representativos y útiles en el análisis estructural, permitiendo una evaluación más precisa de las condiciones sísmicas y facilitando el diseño de infraestructuras que puedan resistir eventos sísmicos futuros.

Figura 47

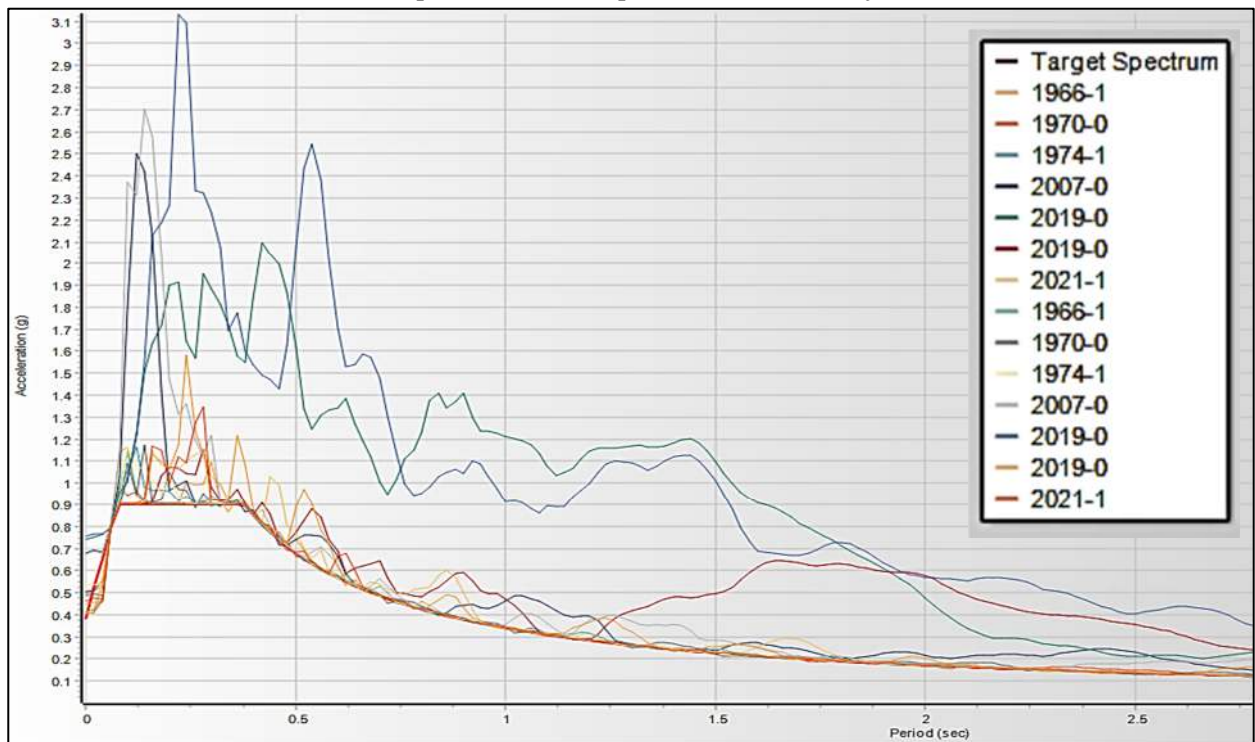
Señales sísmicas iniciales en el espectro de diseño para la ciudad de Cajamarca.



Nota. señales sísmicas históricas con el espectro de diseño, utilizando datos de varios años.  
Generado con el software SeismoMatch.

Figura 48

Señales sísmicas escaladas en el espectro de diseño para la ciudad de Cajamarca.



Nota. Señales sísmicas escaladas comparadas con el espectro de diseño. Generado por Software SeismoMatch.

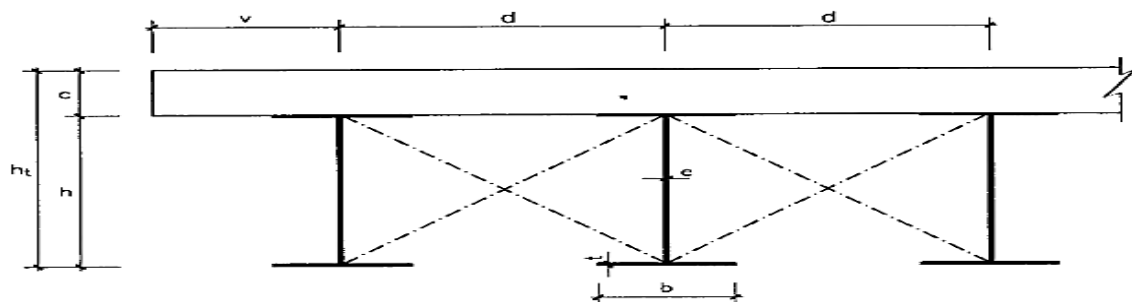
### 3.7.7 Determinación de parámetros del puente

#### 3.7.7.1 Parámetros Iniciales de Puente

Para determinar el diseño del puente, es necesario tener referencia de los elementos estructurales que participaran en el puente propiamente dicho, por ello se tiene la figura 49, siendo referencial para los parámetros del puente a analizar de acuerdo con Obras de Paso de Nueva Construcción (2000):

Figura 49

Diagrama de predimensionamiento de componentes de puente.



Fuente: (Dirección General de Carreteras, 2000)

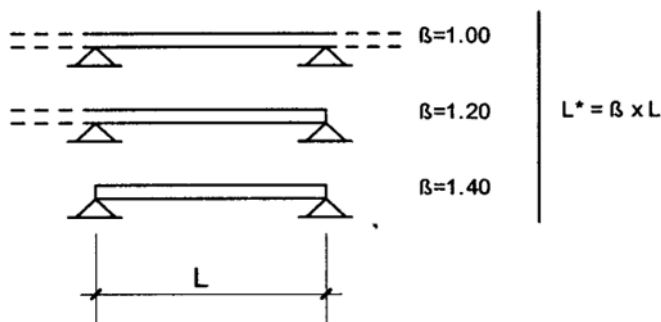
Donde:

- ✓ Vuelo lateral de la losa:  $v \leq 1.75 h \leq 3.50 \text{ m}$
- ✓ Distancia entre ejes de vigas:  $d \leq 3.50 h$
- ✓ Canto de la losa:  $c = 0.10 v; \geq 0.20 \text{ m}; \leq 0.30 \text{ m}$
- ✓ El espesor del alma de las vigas “e” normalmente estará comprendido entre  $h/80$  y  $h/200$  si no se disponen rigidizadores longitudinales, siendo “h” el canto de la viga metálica. En cualquier caso, el espesor cumplirá la condición “e”  $\geq 8 \text{ mm}$ .
- ✓ Espesor “t” de las alas de las vigas cumplirá las siguientes condiciones:
  - $t > b/20$ ; si están comprimidas
  - $t > b/30$ ; si están traccionadassiendo “b” el ancho de las alas.

Los cantos totales (viga + losa) de esta tipología están comprendidos entre los siguientes valores:  $L/22$  a  $L/28$ , siendo “L” la luz del vano en estructuras continuas. Para otras condiciones de sustentación se tomará la luz equivalente “L\*” definida por la figura 51:

Figura 50

Predimensionamiento para la luz equivalente.



Nota. Geometría de puente metálico (Dirección General de Carreteras, 2000)

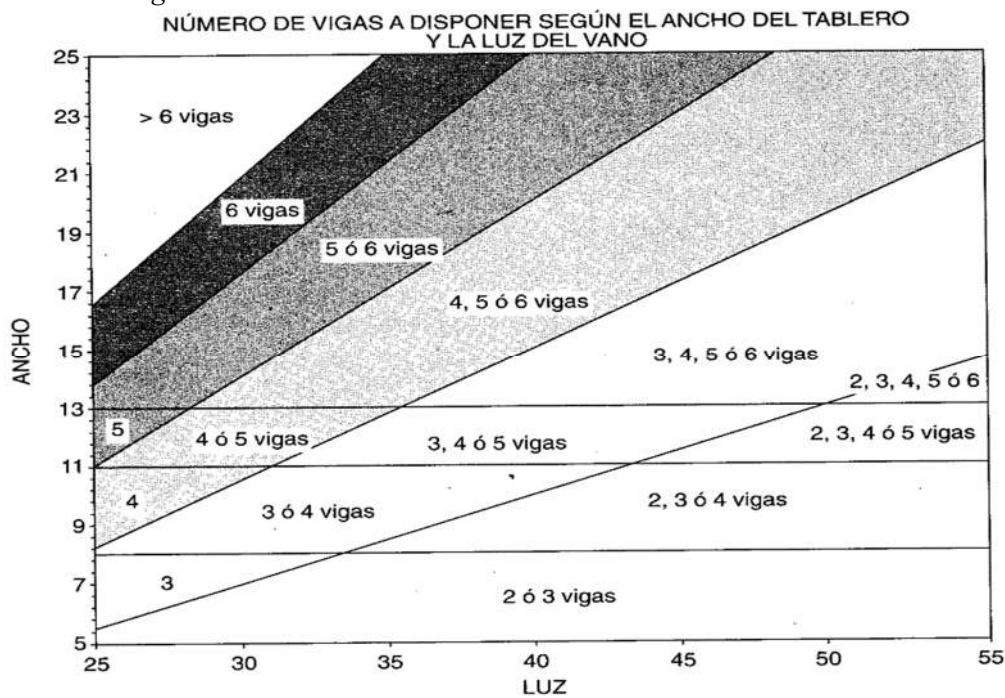
La distancia entre los planos de arriostamiento transversal está comprendida normalmente entre los valores:  $3h$  y  $5h$ , siendo “h” el canto de la viga metálica.

Los criterios para hallar el número de vigas se plantean de acuerdo con la figura 51.



Figura 51

Numero de vigas de acuerdo con la luz.



Fuente: (Dirección General de Carreteras , 2000)

Consideraciones de la AASHTO LRFD 2020 para el peralte mínimo (incluyendo tablero) “ht”, de acuerdo con la tabla 2.5.2.6.3-1 Peraltes mínimos para superestructuras de sección constante, correspondiéndole: Espesor de viga I compuesta para un tramo simple el valor de  $0.033L$ , teniendo un peralte mínimo de 1m.

Teniendo los siguientes resultados del predimensionamiento descritos en la tabla 11, estos valores serán ingresados en el programa para el modelamiento matemático, así como un gráfico referencial de las dimensiones establecidas en la figura 52.

Tabla 11

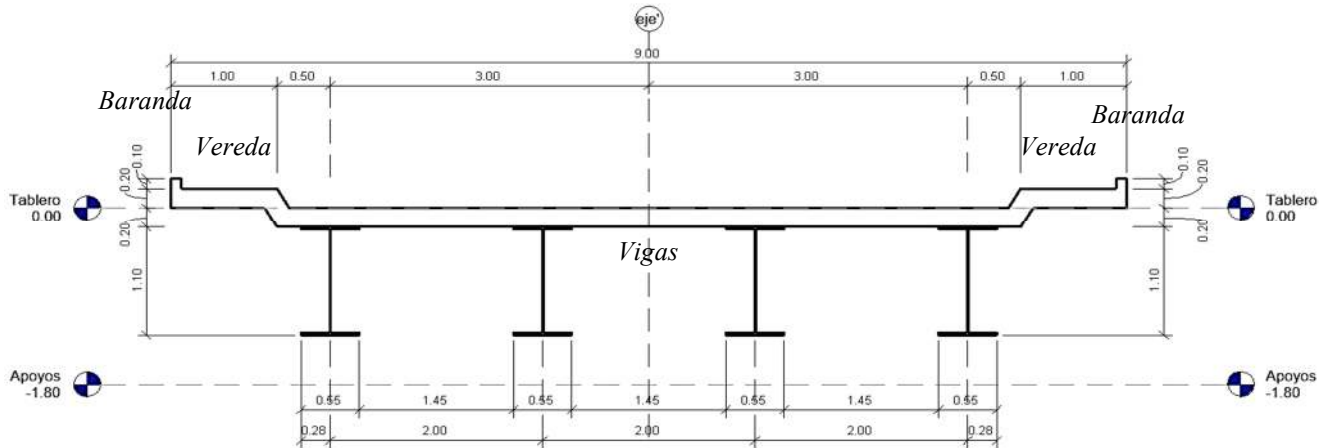
Parámetros de la estructura del puente.

Ítem	Valor	Unidad
Largo Puente	30.00	m
Ancho Puente	9.80	m
Número Vigas	4.00	
Altura total (ht)	1.30	m
Canto de losa (c)	0.20	m
Canto de la viga (h)	1.10	m
Vuelo lateral (v)	1.50	m
Ancho de viga (b)	0.55	m
Distancia entre ejes (d)	2.00	m

<i>Espesor de alma (e)</i>	8.00	mm
<i>Espesor ala (t)</i>	27.00	mm

Fuente: Elaboración propia.

Figura 52  
Sección típica predimensionada del puente.



Fuente: Elaboración propia.

### 3.7.7.2 Disipador

Teniendo los siguientes parámetros establecidos en la tabla 12, para ingresar al software de Midas Civil mediante su herramienta de Enlace General (generallink) como se muestra en la figura 53.

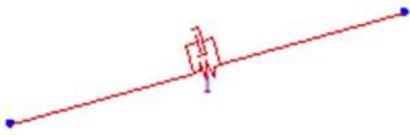
Tabla 12  
Parámetros del disipador.

<i>Ítem</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
<i>Perfil</i>	HSS 20x0.375	cm
<i>Longitud</i>	253.00	cm
<i>Variación Altura</i>	20.00	cm
<i>Área</i>	138.00	cm
<i>Rigidez</i>	152873.00	tonf/m
<i>Masa</i>	0.50	tonf
$\delta$	0.05	
<i>Coefficiente de amortiguamiento</i>	4153.86	tonf. s/m
<i>Exponente de amortiguamiento</i>	0.50	

Fuente: Elaboración propia.

El enlace general se utilizada en análisis estructurales para modelar el comportamiento de los disipadores en términos de sus propiedades matemáticas o físicas, representado en Midas Civil como la figura 53.

Figura 53  
Representación matemática de dissipador.

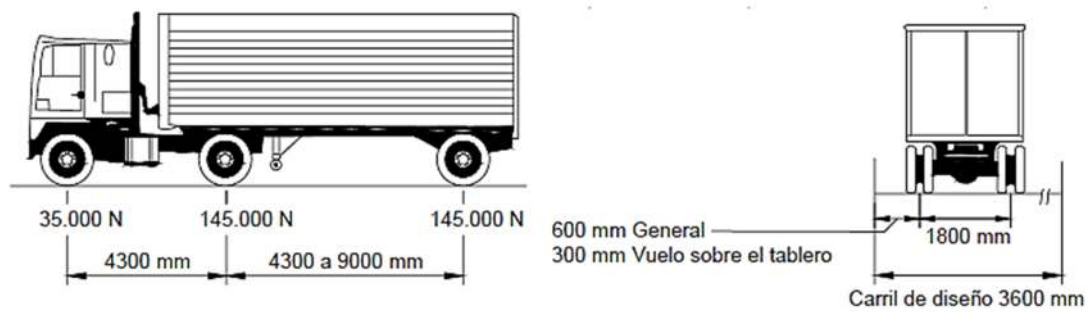


Nota. Enlace general graficado por el software Midas Civil para asignar enlaces especiales.

### 3.7.7.3 Definición del camión de diseño

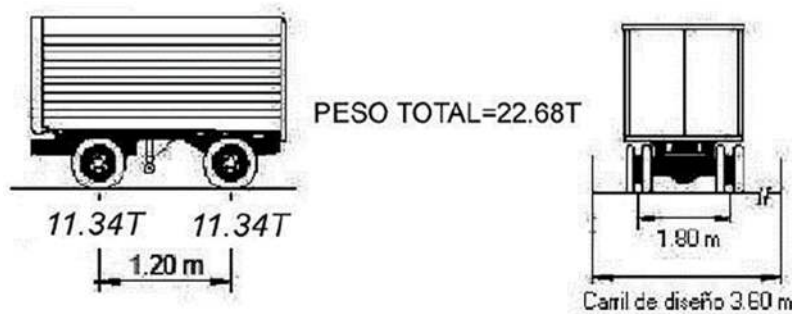
El camión de diseño será el HL-93, teniendo los siguientes parámetros como dimensiones y cargas establecidas en la figura 54 y 55, siendo el camión típico usado en el Perú, especificada como camión estándar en la AASHTO-LRFD 2020.

Figura 54  
Camión de diseño HL-93.



Fuente: Fig.3.6.1.2.2-1. AASHTO-LRFD 2020.

Figura 55  
Tándem de diseño HL-93TDM.



Fuente: Fig.3.6.1.2.2-1. AASHTO-LRFD 2020.

El camión de Diseño pertenece a la norma AASHTOO-LRFD 2020 la cual tiene como sistema normalizado en el diseño en el Midas como el HL-93 TRUK y el HL-93 TDM como se muestra en la tabla 13.

Tabla 13

Porcentaje de incremento por cargas dinámicas (IM).

<b>Componente</b>	<b>IM</b>
Juntas del tablero - Todos los Estados Límites	75%
Todos los demás componentes	
- Estado Límite de fatiga y fractura	15%
- Todos los demás Estados Límites	33%

Fuente: según la AASHTO-LRFD 2020.

- HL-93TRK: Este caso, combina los efectos del camión HL-93TDM + Carga Distribuida del Carril + 33% de impacto de la carga por el eje del camión: este proporcionara el máximo momento positivo a continuación.
- HL-93TRK: Este caso, combina los efectos del camión HL-93TDM + Carga Distribuida del Carril + 33% de impacto de la carga por el eje del camión: este proporcionara el máximo momento positivo a continuación.
- HL-93TDM: Este caso, combina los efectos del camión Tándem + Carga Distribuida del Carril + 33% del impacto de la carga por el eje del camión; este proporcionara el máximo corte.

#### 3.7.7.4 Definición de cargas estáticas actuantes en el puente

Los casos de carga que se definieron en el software MIDAS CIVIL 2022, son los siguientes:

##### **PESO PROPIO (SW):**

Carga de Peso Propio de la Estructura (SW): Esta carga es creada de forma automática por el programa Midas Civil V – 2022, Dicha carga comprende el peso de todos los elementos estructurales tales como Vigas, Losas y Diafragmas

Esta carga se calcula al asignar el factor (-1) al programa Midas Civil V.2022, que considera la densidad específica del material asignado, y las propiedades geométricas de cada

elemento para el modelamiento estructural; el producto entre la densidad específica y la sección del elemento causa el peso propio o carga muerta de la estructura.

#### **BARANDA (DL):**

De tuberías de acero para la protección peatonal, cuya carga se considera carga muerta.

Estos elementos metálicos sirven de protección al peatón con una altura de 1.00 m.

Por lo tanto, se agregará una carga distribuida lineal de 0.10 tn/ml el cual estará direccionado en el sentido de la gravedad y ubicado en los extremos del puente.

#### **ASFALTO (DW):**

Se considerará una capa de rodadura de carpeta asfáltica de espesor  $e = 0.05$  m, con fines de mantenimiento y aumento del espesor.

Esta carga se obtiene al multiplicar la densidad específica del asfalto por su espesor, que genera una carga superficial que se aplicará a los carriles de la estructura.

$$DW = 2.25 \frac{tn}{m^3} \times 0.050m = 0.113 \text{ tn}/m^2 \quad (24)$$

#### **FRENADO (BRK):**

Esta carga es producto de la aplicación de la carga por efecto de frenado a una altura de 1.80m de la cara superior del tablero esta carga se toma en cuenta para los efectos inerciales del frenado.

Según la AASHTO– LRFD - 2020 para cargas de frenado estipula lo siguiente.

La fuerza de frenado se deberá aplicar a todos los carriles de diseño según norma. De acuerdo con estas especificaciones la fuerza de frenado será:

- Lo que estipula la norma en el capítulo BR (3.6.5) Según la AASHTO– LRFD – 2020, es que: 25% de los peatones de los pesos por eje del camión de diseño a tándem de diseño o 5% del tándem de diseño más la carga del carril.

Considerando que el puente tendrá en algún momento será sometido as tráfico en ambos carriles en una dirección y considerando un factor de presencial múltiple de  $m=1.00$  se tiene:

$$Fre = (\text{Máximo BR}) (\# \text{ de Carriles}) (\text{Factor de Presencia Múltiple})$$

$$Fre = (8160.00 \times 2 \times 1) = 16\,330.00 \text{ kg.}$$

Esta fuerza se considera a 1.80m de altura sobre el tablero y su efecto se considera en ambos carriles, y en la misma dirección para producir los efectos máximos.

*Tabla 14*

*Factor de presencia múltiple.*

<i>Número de carriles cargados</i>	<i>Factores de presencia múltiple, m</i>
1	1.2
2	1
3	0.85
>3	0.65

*Fuente: AASHTO – LRFD 2020.*

**FUERZA CENTRIFUGA (CF):** carga generada por efectos de la curvatura del puente, en el MIDAS – CIVIL V – 2022 es considerada Centrifuga, fuerza centrífuga (FC).

Esta fuerza se asignará horizontalmente a 1.80m sobre la superficie de rodadura, cuya magnitud se determinará con la siguiente expresión de AASHTO-LRDD 2020 (3.6.3-1).

$$FC = \frac{0.0011WV^2}{R} \quad (25)$$

$$W = 35.6 \text{ kN} + 2 \times 71.15 \text{ kN} = 177.9 \text{ kN}$$

$$Fc = 0.0704 \times 177.9 \text{ kN}$$

$$F_c = 12.52 \text{ kN}$$

### **PEATÓN (L):**

Estas cargas se estipulan en el código AASHTO-LRFD 2020, en el capítulo de cargas acápite 3.6.1.6. Se deberá aplicar una carga peatonal de  $3.60 \times 10^3$  MPa en todas las aceras de más de 600mm de ancho, y esta carga se deberá considerar simultáneamente con la sobrecarga vehicular de diseño.

$$L = 0.75 \text{ kN/m}^2 \text{ o } L = 4.1 \text{ kN/m}^2 \quad (26)$$

$$L = 4.1 \text{ kN/m}^2$$

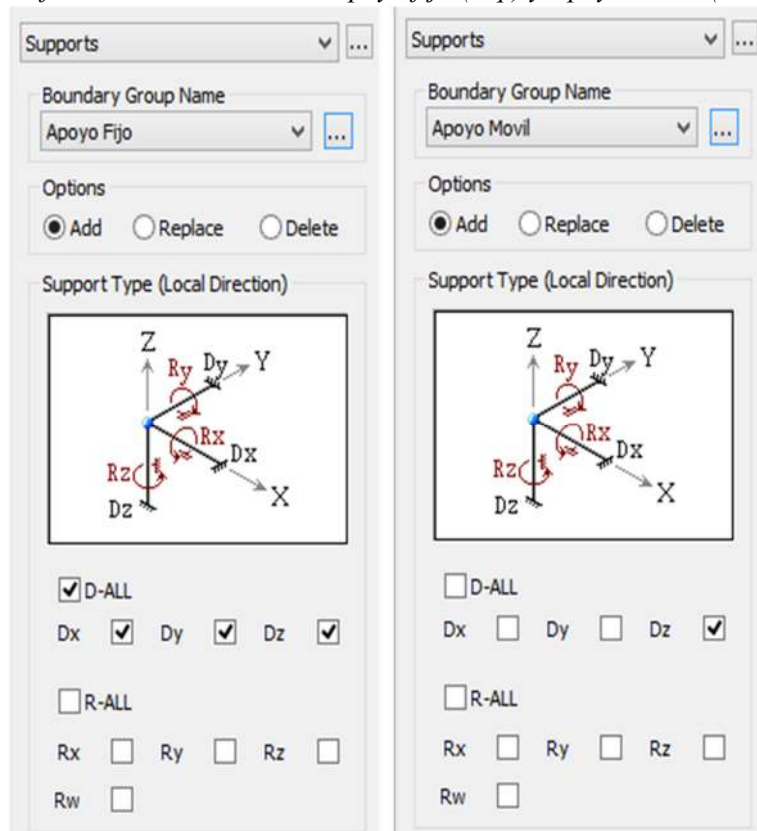
#### **3.7.7.5 Condiciones para el apoyo del puente**

Los apoyos del puente se definen según su grado de libertad utilizando el software Midas Civil V2022. Un apoyo fijo restringe los movimientos en los ejes X, Y e Z, lo cual garantiza la estabilidad estructural en estos puntos críticos. En contraste, un apoyo móvil permite deslizamiento en los ejes X e Y, pero restringe el movimiento en el eje Z. Esta distinción es crucial para la correcta distribución de cargas y fuerzas dentro de la estructura del puente. En la figura 56 se muestra la definición de cada apoyo y su grado de libertad, lo que se agrega al modelo matemático del puente en el software.

Esta configuración asegura que las condiciones de borde se adapten a los requerimientos de diseño especificados, proporcionando estabilidad y desempeño óptimo en la estructura del puente. Además, el uso de Midas Civil permite una simulación precisa de las condiciones reales del puente, facilitando el análisis de distintos escenarios de carga. De esta manera, se puede garantizar que el diseño cumpla con los estándares de seguridad y eficiencia establecidos por el código AASHTO LRFD 2020, asegurando un desempeño adecuado durante la vida útil de la estructura.

Figura 56

Definición de elementos de apoyo fijo (Izq.) y Apoyo Móvil (Der.).



Nota. Configuración en Midas Civil para un apoyo fijo que restringe todos los movimientos y un apoyo móvil que permite deslizamiento en los ejes X e Y, pero restringe el movimiento. Generado en Midas Civil V2022.

### 3.7.7.6 Estados límites de diseño

La finalidad de diseñar mediante estados límites es alcanzar puntos de desempeño óptimo en constructibilidad y serviciabilidad. De acuerdo con el código AASHTO LRFD 2020 en el apartado 3.4 Factores y Combinaciones de carga específica los estados límites de diseño que deben cumplir cada elemento que conforma la estructura del puente; la tabla 15 se detalla estos parámetros de resistencia a evaluar:

Tabla 15

Definición de los estados límites aplicados al puente.

<b>Estados Límites</b>	<b>Definición</b>
Resistencia I	Combinación básica de cargas del uso normal del puente sin viento. Combinación de cargas que representan el cálculo de vehículos de diseños especiales especificados por el propietario, vehículos de circulación restringida o ambos, sin viento.
Resistencia II	



<i>Resistencia III</i>	<i>Combinación de cargas que representa el puente expuesto a vientos de velocidades superiores a 90 km/h.</i>
<i>Resistencia IV</i>	<i>Combinación de cargas que representa el puente expuesto a vientos de velocidades superiores a 90 km/h.</i>
<i>Resistencia V</i>	<i>Combinación de cargas que representan el uso del puente por vehículos normales con un viento de 90 km/h.</i>
<i>Evento Extremo I</i>	<i>Combinación de cargas incluye sismos.</i>
<i>Evento Extremo II</i>	<i>Combinación de Cargas que incluye cargas de hielo, colisión de embarcaciones y vehículos y ciertos eventos hidráulicos con una sobrecarga.</i>
<i>Servicio I</i>	<i>Combinación de cargas que representan la operación normal del puente con un viento de 90 km/h, tomando todas las cargas sus valores normales.</i>
<i>Servicio II</i>	<i>Combinación de cargas cuya intención es controlar la fluencia de las estructuras de acero y el resbalamiento que provoca la sobrecarga vehicular en las conexiones de resbalamiento crítico.</i>

---

Fuente: AASHTO LRFD - 2020 3.4.

### **3.7.7.7 Combinaciones de carga**

Las combinaciones de carga para diferentes eventos y servicios se analizan según el manual de puentes, incluyendo Fuerza I, Evento Extremo I, Servicio II y Fatiga I.

- ✓ DC es la Carga debida al peso de los componentes estructurales y accesorios no estructurales\*.
- ✓ DW es la Carga debida al peso de las superficies de rodamiento y las instalaciones de servicios públicos\*.
- ✓ LL es el Sobre Carga Vehicular.
- ✓ CE es la Fuerzas Centrifugas.
- ✓ BR es la Fuerza de Frenado.
- ✓ PL es Sobre Carga Peatonal.
- ✓ LS es Sobre Carga de la carga viva.
- ✓ W es el Viento sobre la estructura.
- ✓ EQ es Sobrecarga debido a sismo\*.

Tabla 16

Cuadro de factores de carga.

		<i>Utilice uno de estos a la vez</i>													
	DC														
	DD														
	DW														
	EH														
Estado límite de combinación de carga	EV LL														
	ES IM														
	EL CE														
	PS BR														
	CR PL														
	SH	LS	WA	WS	WL	FR	TU		TG	SE	EQ	BL	IC	CT	CV
Strength I (unless noted)	$\gamma_p$	1.75	1.00			1.00	0.50/1.20		$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$					
Strength II	$\gamma_p$	1.35	1.00			1.00	0.50/1.20		$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$					
Strength III	$\gamma_p$		1.00	1.00		1.00	0.50/1.20		$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$					
Strength IV	$\gamma_p$		1.00			1.00	0.50/1.20								
Strength V	$\gamma_p$	1.35	1.00	1.00	1.00	1.00	0.50/1.20		$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$					
Extreme Event I	1.00	$\gamma_{EQ}$	1.00			1.00					1.00				
Extreme Event II	1.00	0.50	1.00			1.00						1.00	1.00	1.00	1.00
Service I	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00/1.20		$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$					
Service II	1.00	1.30	1.00			1.00	1.00/1.20								
Service III	1.00	$\gamma_{LL}$	1.00			1.00	1.00/1.20		$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$					
Service IV	1.00		1.00	1.00		1.00	1.00/1.20			1.00					
Fatigue I - LL, IM & CE only		1.75													
Fatigue II - LL, IM & CE only		0.80													

Fuente: AASHTO LRFD - 2020 3.4.

### Estado de resistencia y servicio

Tabla 17

Cuadro de resumen.

<b>Combinación de Carga</b>	<b>DC</b>	<b>DW</b>	<b>EH</b>	<b>EV</b>	<b>LL+IM</b>	<b>LS</b>	<b>BR</b>
Resistencia I	1.3	1.5	1.8	1.4	1.75	1.8	1.8
Servicio II	1	1	1	1	1.3	1.3	1.3
Fatiga I					1.5		

Fuente: AASHTO LRFD - 2020 3.4

### Evento Extremo

Tabla 18

Cuadro de resumen.

<b>Combinación de Carga</b>	<b>DC</b>	<b>DW</b>	<b>EH</b>	<b>EQ</b>
Evento			1.5 (Activa)	
Extremo I	1.3	1.5	1.35 (Reposo)	1.4

Fuente: AASHTO LRFD - 2020 3.4.1-1

### 3.7.7.8 Factores de carga para cargas Permanentes

Tabla 19

Cuadro de factores de cargas permanentes.

Type of Load, Foundation Type, and Method Used to Calculate Downdrag	Load Factor		
	Maximum	Minimum	
DC: Component and Attachments	1.25	0.90	
DC: Strength IV only	1.50	0.90	
DD: Downdrag Piles, $\alpha$ Tomlinson Method	1.40	0.25	
	Piles, $\lambda$ Method	1.05	0.30
	Drilled shafts, O'Neill and Reese (2010) Method	1.25	0.35
DW: Wearing Surfaces and Utilities	1.50	0.65	
EH: Horizontal Earth Pressure			
• Active	1.50	0.90	
• At-Rest	1.35	0.90	
• AEP for anchored walls	1.35	N/A	
EL: Locked-in Construction Stresses	1.00	1.00	
EV: Vertical Earth Pressure			
• Overall and Compound Stability	1.00	N/A	
• Retaining Walls and Abutments	1.35	1.00	
• MSE wall internal stability soil reinforcement loads			
○ Stiffness Method			
• Reinforcement and connection rupture	1.35	N/A	
• Soil failure – geosynthetics (Service I)	1.20	N/A	
○ Coherent Gravity Method	1.35	N/A	
• Rigid Buried Structure	1.30	0.90	
• Rigid Frames	1.35	0.90	
• Flexible Buried Structures			
○ Metal Box Culverts, Structural Plate Culverts with Deep Corrugations, and Fiberglass Culverts	1.50	0.90	
○ Thermoplastic Culverts	1.30	0.90	
○ All others	1.95	0.90	
• Internal and Compound Stability for Soil Failure in Soil Nail Walls	1.00	N/A	
ES: Earth Surcharge	1.50	0.75	

Fuente: AASHTO LRFD - 2020 3.4.

### 3.7.7.9 Modificadores de carga n propuestos

Para el diseño por factores de cargas y resistencia (LRFD) requiere satisfacer la siguiente ecuación dada por el apartado 1.3.2.1 del AASHTO –LRFD 2020 para los elementos de acero, mediante el diseño por esfuerzos admisibles de Modificadores de carga n propuestos.

$$\sum \eta_i \gamma_i Q_i \leq R_r = \phi R_n \quad (27)$$

$$n = n_D n_R n_I \geq 0.95$$

Donde:

- ✓  $\gamma_i$  es el factor de carga (es un multiplicador obtenido estadísticamente que se aplica a los efectos de fuerza).

- ✓  $\phi_i$  es el factor de resistencia (es un multiplicador obtenido estadísticamente que se aplica a la resistencia nominal de acuerdo con el material y/o elemento).
- ✓  $\eta$  es el factor que vincula la ductilidad, la redundancia y la importancia operativa.
- ✓  $\eta_D$  es el factor que se refiere a la ductilidad.
- ✓  $\eta_R$  es el factor que se refiere a la redundancia.
- ✓  $\eta_I$  es el factor que se refiere a la importancia operacional.
- ✓  $Q_i$  es el efecto de fuerza.
- ✓  $R_n$  es la resistencia nominal.
- ✓  $R_r$  es la resistencia factorizada  $\phi_i R_n$

De acuerdo con la AASHTO LRFD - 2020, sección 3.4, el factor  $\eta_D$  se considera igual a 1.0, ya que la estructura presenta un nivel estándar de ductilidad. Esto significa que el puente en cuestión cumple con los requerimientos mínimos de deformación plástica antes de la falla.

El factor  $\eta_R$  tiene un valor de 1.05 debido a que el puente no cuenta con múltiples vías para soportar cargas en caso de una falla parcial en su funcionamiento. Este valor refleja la necesidad de considerar un mayor factor de seguridad debido a la falta de redundancia en el sistema estructural del puente. Asimismo, el factor  $\eta_I$  se establece en 1.05 considerando que el puente tiene una importancia operativa significativa y, por lo tanto, debe ser diseñado con un nivel de seguridad superior. Este factor toma en cuenta la relevancia del puente en la red vial y su rol crucial en el mantenimiento del flujo de tráfico y la conectividad.

Estos factores quedan reflejados en la tabla 20 del cuadro de resumen de factores modificados de carga, lo que asegura que el diseño del puente cumple con los estándares de seguridad y funcionalidad establecidos.

Tabla 20

Cuadro de resumen factor modificado de carga.

<b>Factores Modificadores de Carga</b>				
	<b>Resistencia</b>	<b>Servicio</b>	<b>Fatiga</b>	<b>Evento Extremo</b>
$\eta_D$	1.00	1.00	1.00	1.00
$\eta_R$	1.05	1.05	1.05	1.05
$\eta_I$	1.05	-	-	1.05
$\eta_i = \eta_D \eta_R \eta_I$	1.10	1.05	1.05	1.10
$\eta_i \geq 0.95$	OK	OK	OK	OK

Fuente: Elaboración propia.

### 3.7.7.10 Propiedades No Lineales de los elementos del puente

#### a) Para las vigas metálicas

Las propiedades no lineales de las vigas metálicas se definen para capturar el comportamiento real de la estructura. Se establecen las propiedades de rigidez tanto horizontal como vertical, así como la rigidez efectiva en las direcciones  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Estas propiedades incluyen la respuesta elasto - plástica del material, representada mediante un modelo bilineal que considera el endurecimiento del material tras alcanzar el límite elástico. La relación constitutiva para el modelo bilineal se expresa como:

$$\begin{cases} E \cdot \varepsilon & \text{si } \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ \sigma_y + H(\varepsilon - \varepsilon_y) & \text{si } \varepsilon > \varepsilon_y \end{cases} \quad (28)$$

Donde:

- ✓  $\sigma$  es la tensión,
- ✓  $E$  es el módulo de elasticidad,
- ✓  $\varepsilon$  es la deformación,
- ✓  $\varepsilon_y$  es la deformación en el punto de fluencia,
- ✓  $\sigma_y$  es la tensión de fluencia,
- ✓  $H$  es el módulo de endurecimiento.

#### b) Para los disipadores sísmicos

Las propiedades no lineales de los disipadores sísmicos se determinan a través de un análisis mecánico detallado. Estas propiedades se modelan utilizando el modelo de Kelvin-Voigt, que considera el comportamiento viscoelástico del material. Sin embargo, en este estudio se ha empleado el modelo de Maxwell para representar mejor la respuesta de los disipadores bajo cargas dinámicas. El modelo de Maxwell combina un elemento elástico y uno viscoso en serie, y su comportamiento se describe mediante la siguiente relación diferencial:

$$\sigma + \frac{n}{E} \frac{d\sigma}{dt} = n \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (29)$$

Donde:

- ✓  $\sigma$  es la tensión
- ✓  $n$  es el coeficiente de viscosidad,
- ✓  $E$  es el módulo de elasticidad,
- ✓  $\varepsilon$  es la deformación,
- ✓  $\frac{d\sigma}{dt}$  es la tasa de cambio de tensión,
- ✓  $\frac{d\varepsilon}{dt}$  es la tasa de cambio de la deformación.

Estas propiedades se integran en el modelo matemático del puente para simular de manera precisa la respuesta sísmica y evaluar la efectividad de los disipadores sísmicos en la mitigación de las fuerzas inducidas por eventos sísmicos.

### **3.8 TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS**

El diseño preliminar hace referencia a la verificación de los puentes mediante la verificación de desplazamiento del predimensionamiento y la verificación de los elementos para la definición del puente recto.

### 3.8.1 Deformación

La deformación para el caso de puentes vehiculares de acero de acuerdo con la AASHTO LRFD 2020 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2020), establece que  $L/800$ .

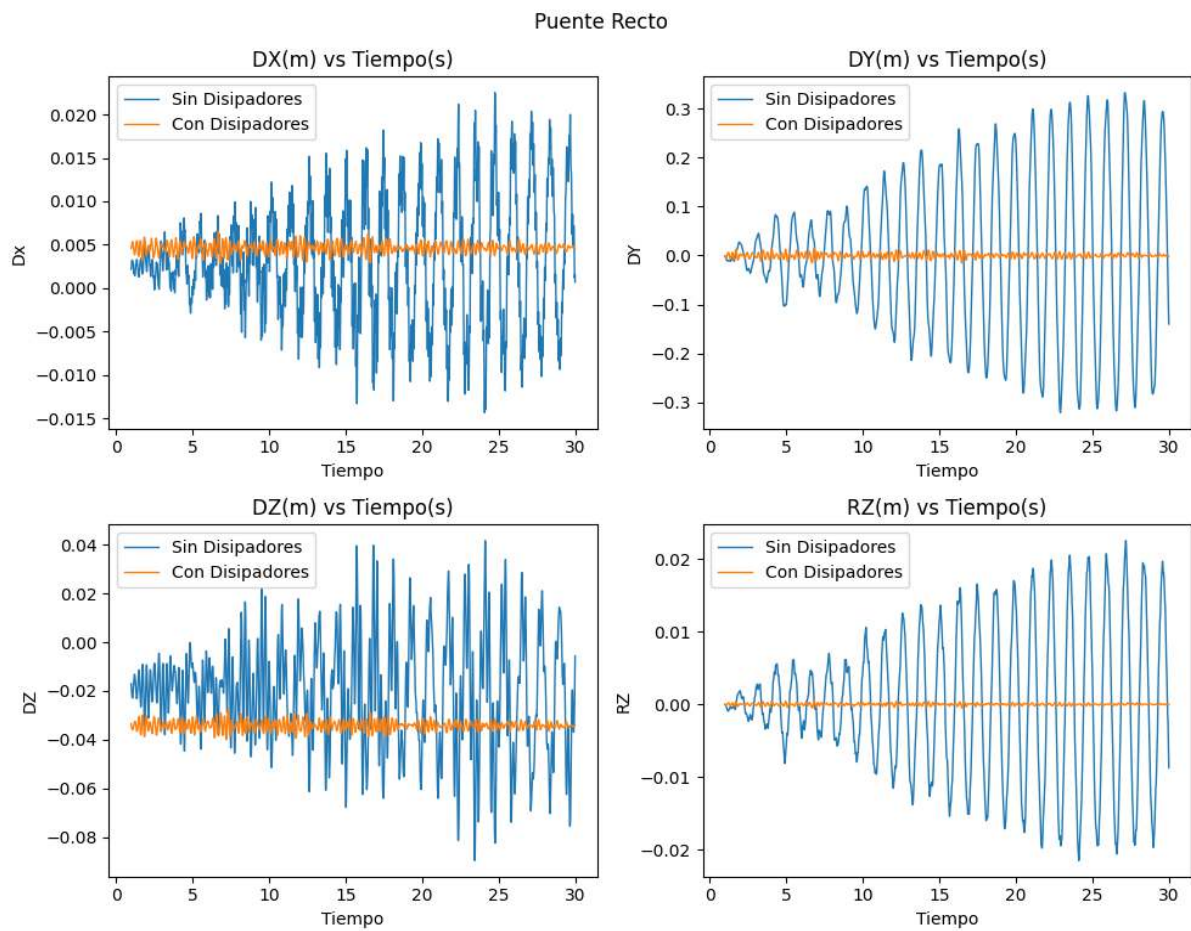
Donde:

- ✓  $L$  es la luz o la longitud libre de la viga o el tramo considerado.
- ✓  $L/800$  es el máximo desplazamiento permisible bajo la carga vehicular.

#### 3.8.1.1 Puente recto

Figura 57

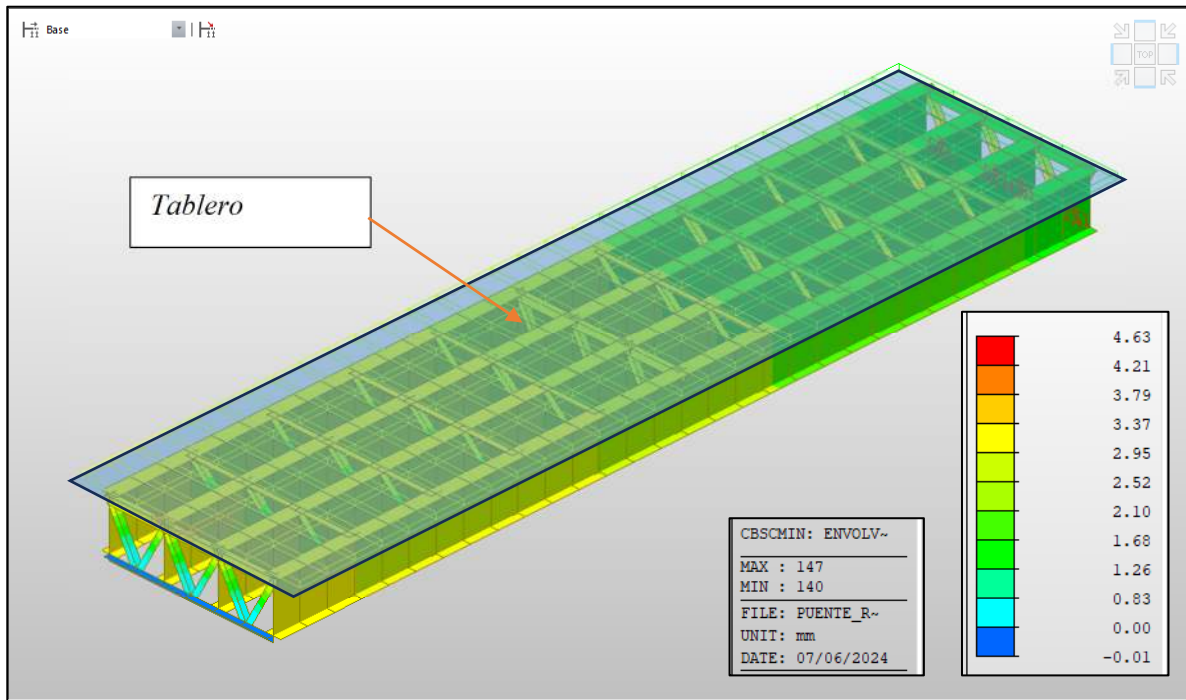
Deformación de puente recto.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 58

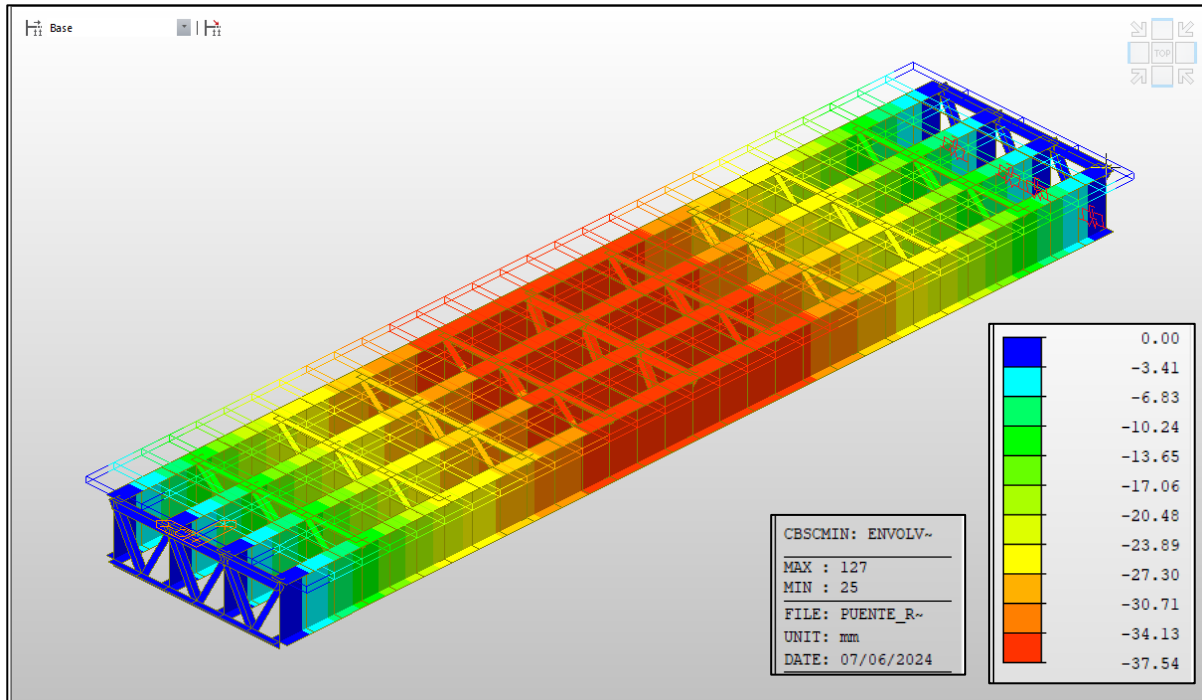
Deformación de puente recto mediante la envolvente en la dirección X.



Fuente: Elaboración propia del software Midas Civil 2022.

Figura 59

Deformación de puente recto mediante la envolvente en la dirección Y.

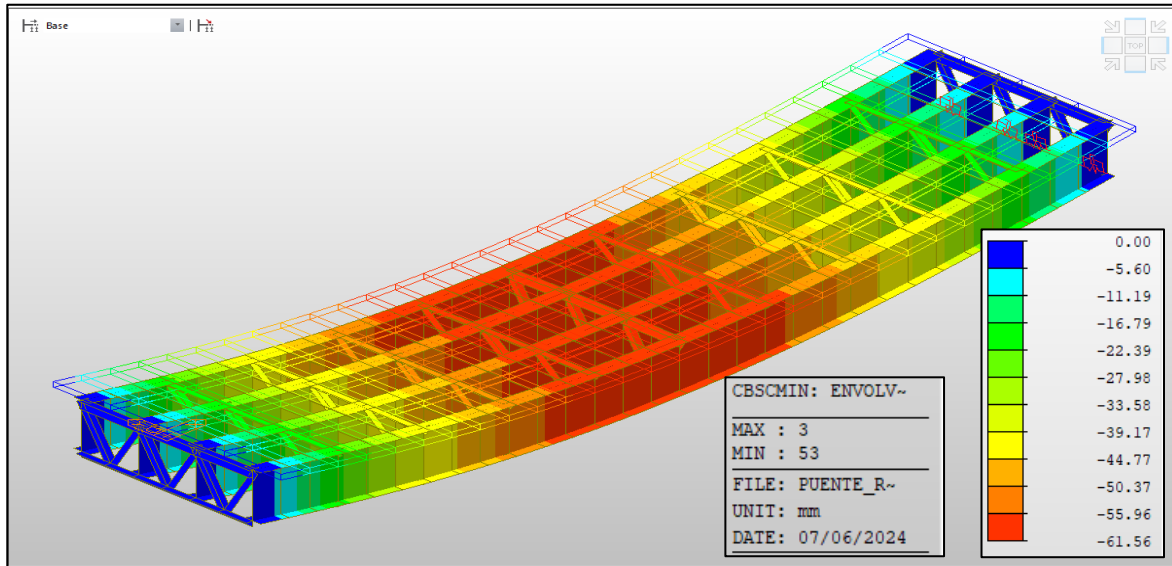


Fuente: Elaboración propia del software Midas Civil 2022.



Figura 60

Deformación de puente recto mediante la envolvente en la dirección Z.

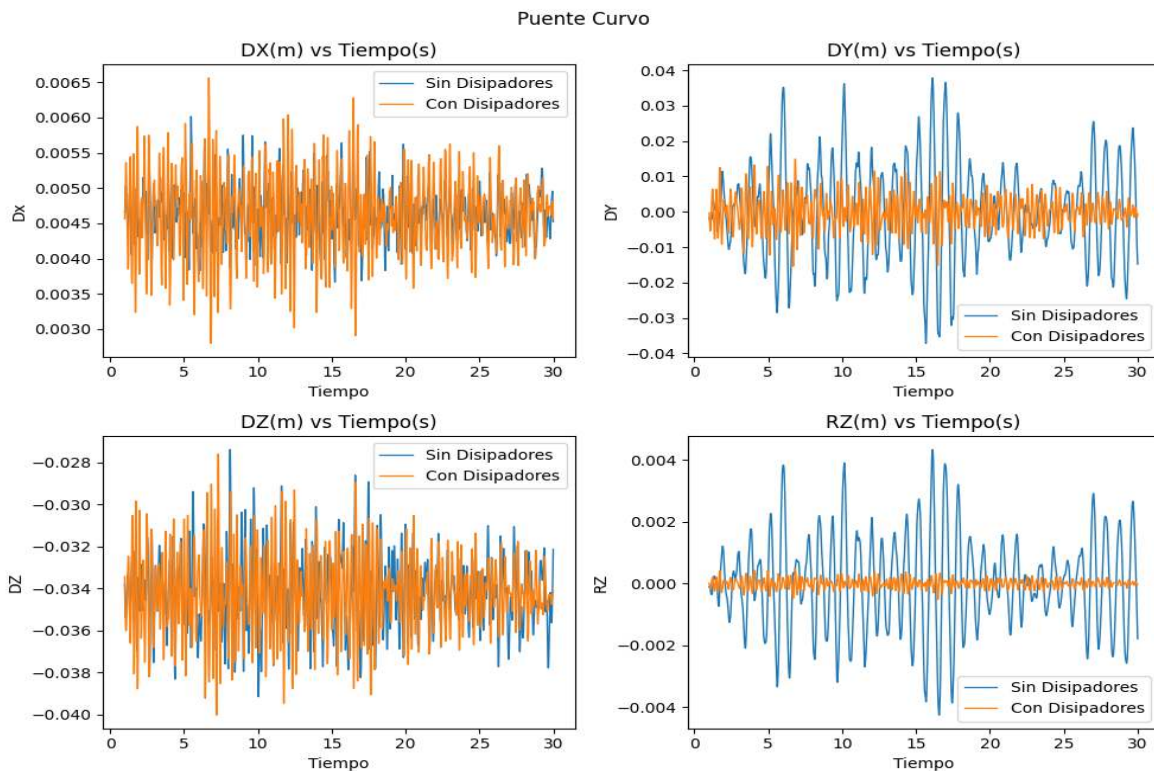


Fuente: Elaboración propia del software Midas Civil 2022.

### 3.8.1.2 Puente curvo

Figura 61

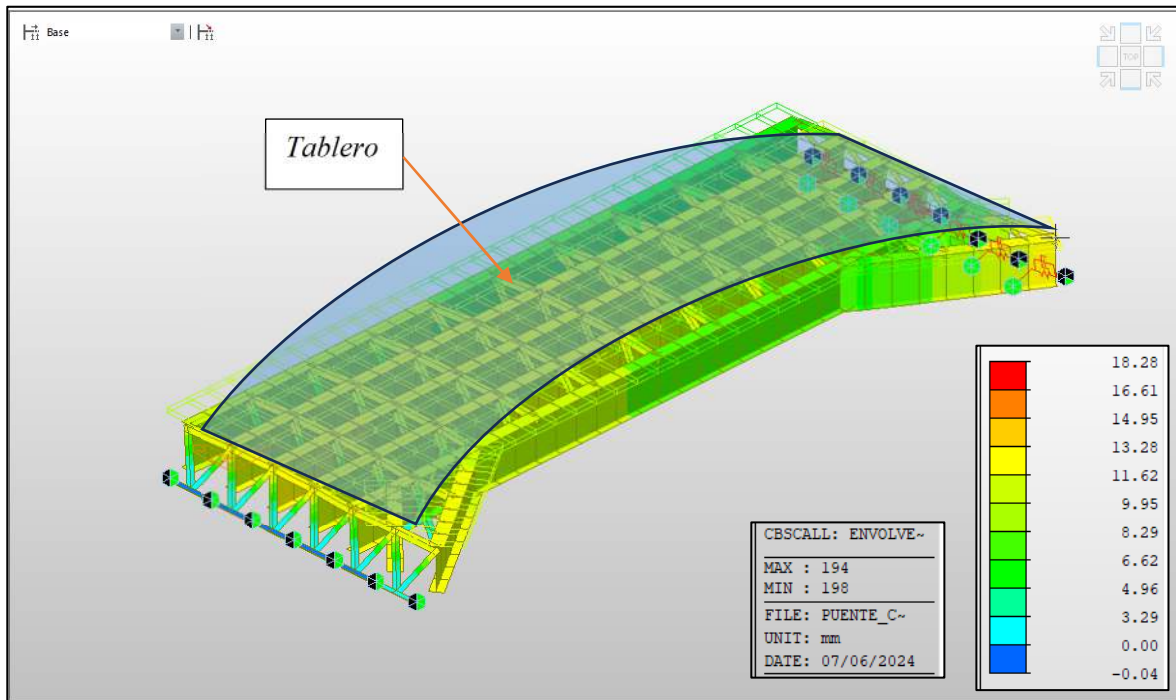
Deformación de puente curvo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 62

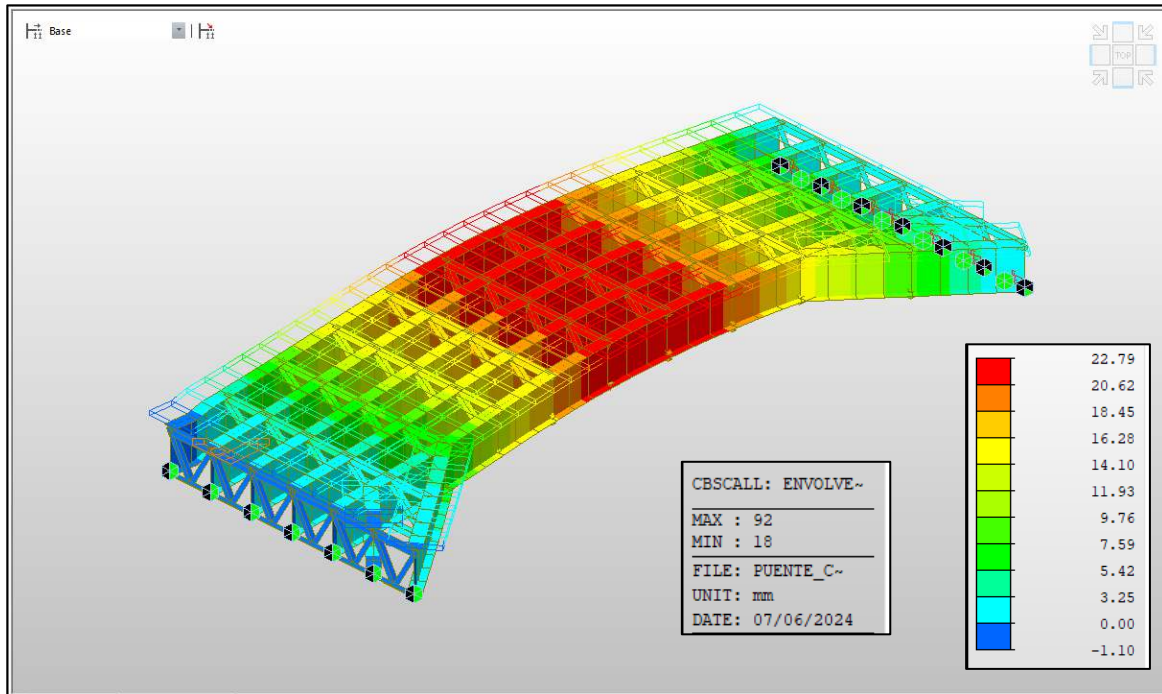
Deformación de puente curvo mediante la envolvente en la dirección X.



Fuente: Elaboración propia del software Midas Civil 2022.

Figura 63

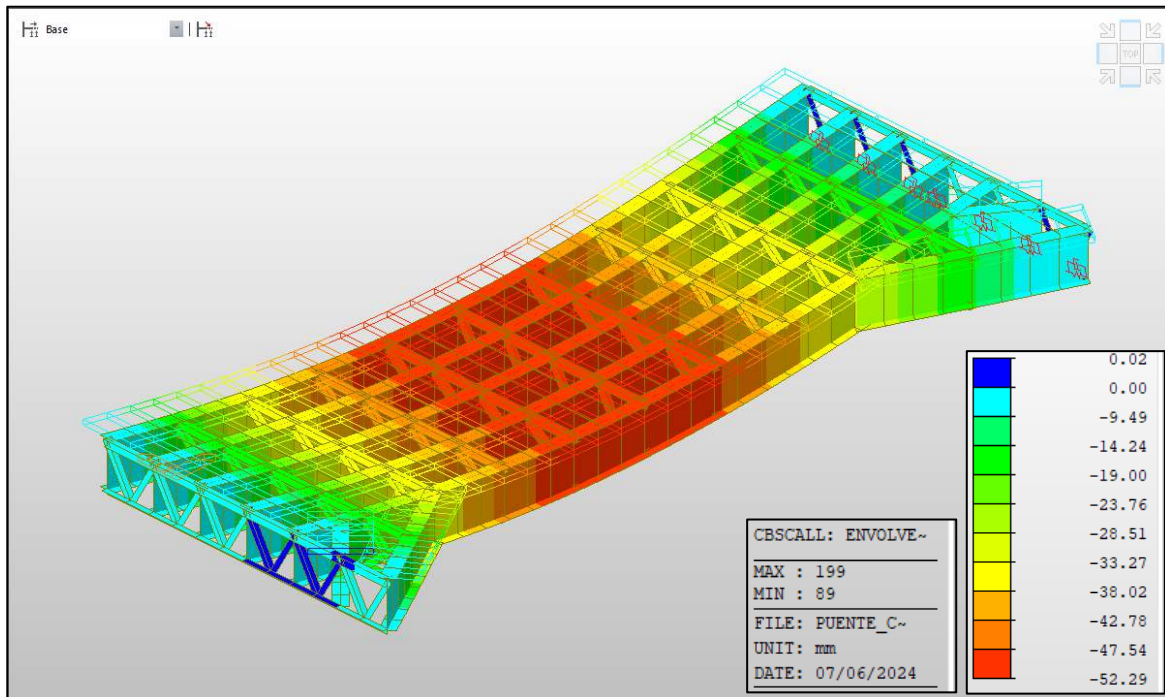
Deformación de puente curvo mediante la envolvente en la dirección Y.



Fuente: Elaboración propia del software Midas Civil 2022.

Figura 64

Deformación de puente curvo mediante la envolvente en la dirección Z.



Fuente: Elaboración propia del software Midas Civil 2022.

### 3.8.2 Respuesta modal espectral

Los resultados de la respuesta de la estructura se presentarán para el puente recto y curvo, con y sin aisladores, para facilitar un mejor entendimiento del comportamiento bajo cargas sísmicas y proporcionar un análisis más completo.

La comparación permitirá evaluar el efecto de los aisladores en la respuesta dinámica, identificando cómo influyen en los periodos de vibración, las fuerzas inerciales, y la disipación de energía en ambos tipos de puentes. Así, se obtendrá una visión más clara de las ventajas estructurales de los aisladores en cuanto a estabilidad y reducción de desplazamientos torsionales y laterales.

#### 3.8.2.1 Puente recto sin disipadores

Tabla 21

Análisis modal, periodos y frecuencias con disipador sísmico.

Modo No	Frecuencia (rad/sec)	Frecuencia (cycle/sec)	Periodo (sec)	Tolerancia
1	5.184848	0.825194	1.211836	0.00E+00
2	23.345116	3.715491	0.269143	0.00E+00

3	24.246594	3.858965	0.259137	0.00E+00
4	29.340027	4.66961	0.214151	0.00E+00
5	71.221277	11.335218	0.088221	0.00E+00
6	83.668403	13.31624	0.075096	0.00E+00
7	83.717104	13.323991	0.075053	0.00E+00
8	124.723894	19.850424	0.050377	2.03E-128
9	127.331861	20.265495	0.049345	1.10E-125
10	134.012367	21.328731	0.046885	1.92E-120
11	150.948897	24.024263	0.041625	8.20E-109
12	175.654959	27.956355	0.03577	1.17E-87
13	184.539617	29.370392	0.034048	5.36E-80
14	190.120319	30.258589	0.033048	6.47E-76
15	195.735265	31.152235	0.0321	9.84E-73
16	202.360063	32.206604	0.03105	2.67E-68
17	213.9309	34.04816	0.02937	1.31E-60
18	220.206051	35.046882	0.028533	4.35E-56
19	223.79654	35.618326	0.028075	2.99E-54
20	230.951721	36.757108	0.027206	5.13E-50

Fuente: Elaboración propia.

### 3.8.2.2 Puente recto con disipadores

Tabla 22

Análisis modal, periodos y frecuencias con disipador sísmico.

Modo No	Frecuencia (rad/sec)	Frecuencia (cycle/sec)	Periodo (sec)	Tolerancia
1	17.202295	2.73783	0.365253	0.00E+00
2	24.23931	3.857806	0.259215	0.00E+00
3	25.76175	4.10011	0.243896	0.00E+00
4	56.026483	8.916892	0.112147	0.00E+00
5	83.452488	13.281876	0.075291	0.00E+00
6	83.65633	13.314318	0.075107	0.00E+00
7	111.344559	17.721037	0.05643	1.09E-142
8	126.977609	20.209114	0.049483	1.69E-128
9	127.77012	20.335246	0.049176	3.32E-128
10	150.492233	23.951583	0.041751	1.22E-107
11	166.745981	26.538447	0.037681	1.10E-94
12	175.145347	27.875248	0.035874	8.80E-89
13	187.936887	29.911085	0.033432	1.28E-78
14	195.730632	31.151498	0.032101	1.20E-73
15	202.360122	32.206614	0.03105	1.16E-68
16	207.15094	32.969096	0.030331	1.13E-65
17	213.909484	34.044752	0.029373	3.93E-61
18	220.220304	35.04915	0.028531	4.47E-57
19	231.028491	36.769326	0.027197	8.33E-50
20	231.911891	36.909924	0.027093	7.03E-49

Fuente:

Elaboración propia.

### 3.8.2.3 Puente curvo sin disipadores

Tabla 23

Análisis modal, periodos y frecuencias con disipador sísmico.

Modo No	Frecuencia (rad/sec)	Frecuencia (cycle/sec)	Periodo (sec)	Tolerancia
1	7.287959	1.159915	0.862132	0.00E+00
2	24.664572	3.925489	0.254745	0.00E+00

3	28.155073	4.481019	0.223164	0.00E+00
4	33.44643	5.323165	0.187858	0.00E+00
5	76.090329	12.110152	0.082575	0.00E+00
6	82.551096	13.138415	0.076113	0.00E+00
7	87.072962	13.858092	0.07216	0.00E+00
8	111.272993	17.709647	0.056466	1.28E-123
9	127.275199	20.256477	0.049367	2.92E-107
10	135.499049	21.565343	0.046371	5.40E-100
11	141.546983	22.527902	0.044389	1.51E-94
12	147.405183	23.460264	0.042625	1.35E-89
13	152.853426	24.327378	0.041106	3.15E-85
14	165.148125	26.28414	0.038046	3.00E-75
15	168.800808	26.865483	0.037222	4.99E-71
16	174.120847	27.712193	0.036085	1.32E-68
17	180.883833	28.788556	0.034736	3.10E-63
18	187.48872	29.839757	0.033512	1.51E-59
19	197.450365	31.425202	0.031822	1.21E-52
20	198.995734	31.671155	0.031574	1.56E-51

Fuente: Elaboración propia.

### 3.8.2.4 Puente curvo con disipadores

Tabla 24

Análisis modal, periodos y frecuencias con disipador sísmico.

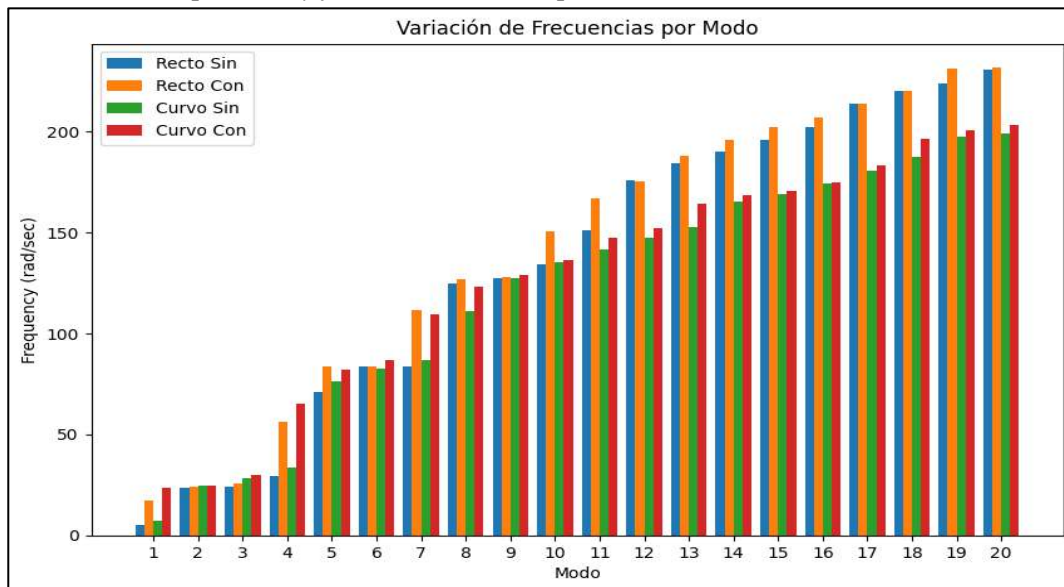
<b>Modo No</b>	<b>Frecuencia (rad/sec)</b>	<b>Frecuencia (cycle/sec)</b>	<b>Periodo (sec)</b>	<b>Tolerancia</b>
1	23.667381	3.766781	0.265479	0.00E+00
2	24.656704	3.924236	0.254827	0.00E+00
3	29.915304	4.761169	0.210032	0.00E+00
4	65.179486	10.373637	0.096398	0.00E+00
5	82.124869	13.070579	0.076508	0.00E+00
6	86.578742	13.779435	0.072572	0.00E+00
7	109.674428	17.455227	0.057289	5.25E-125
8	123.416508	19.642347	0.05091	3.23E-111
9	129.125799	20.551009	0.048659	8.22E-106
10	136.465165	21.719106	0.046042	4.46E-100
11	147.300785	23.443648	0.042655	1.73E-90
12	151.9171	24.178357	0.041359	1.09E-86
13	164.379088	26.161744	0.038224	5.60E-76
14	168.366543	26.796368	0.037318	4.44E-72
15	170.714306	27.170026	0.036805	8.71E-71
16	174.995006	27.85132	0.035905	2.99E-68
17	183.477009	29.201273	0.034245	1.33E-62
18	196.678615	31.302374	0.031946	1.63E-53
19	200.754561	31.951081	0.031298	7.64E-51
20	203.41321	32.374218	0.030889	7.02E-49

Fuente: Elaboración propia.

### 3.8.2.5 Análisis de la respuesta espectral

Tabla 25

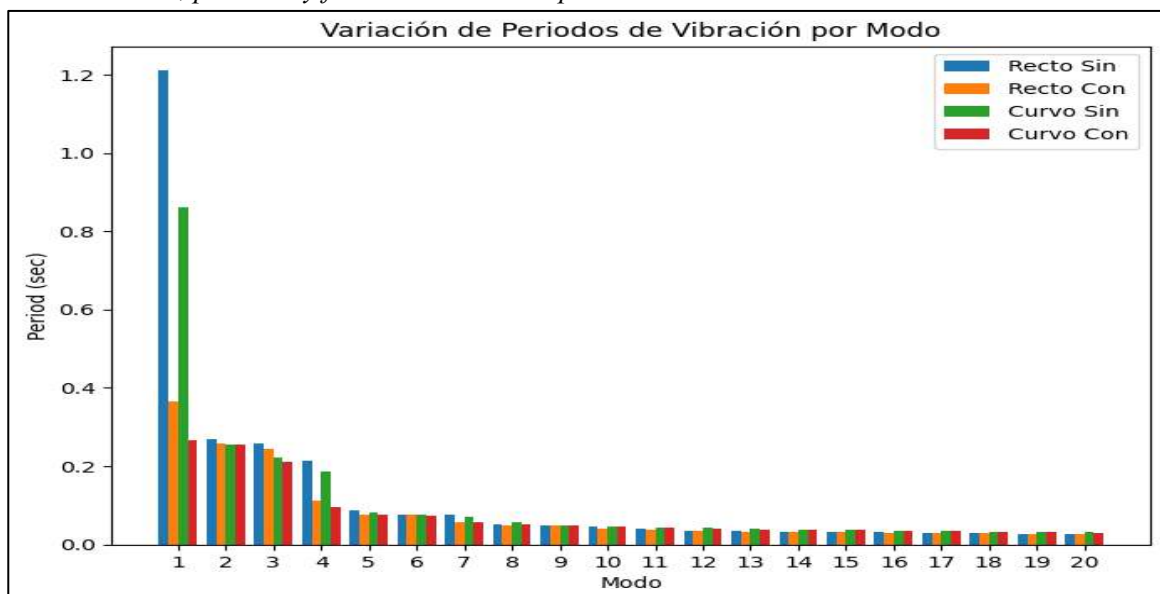
Análisis modal, periodos y frecuencias con disipador sísmico.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26

Análisis modal, periodos y frecuencias con disipador sísmico.



Fuente: Elaboración propia.

### 3.8.3 Esfuerzos internos con y sin disipadores

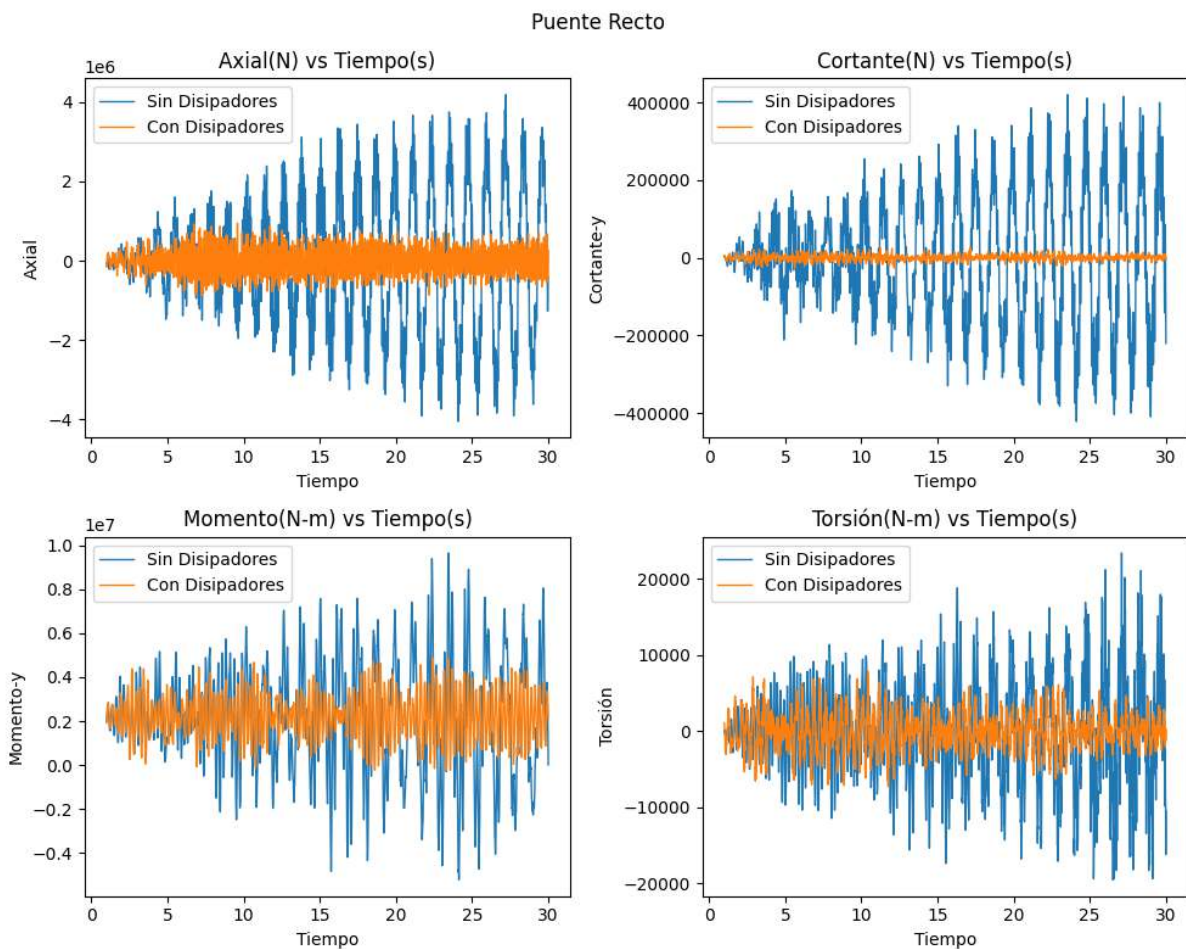
Para poder obtener un resultado óptimo para la estructura, es necesario la recolección de los datos esenciales para de los esfuerzos que se producen en los elementos estructurales, para ello se presenta para el puente curvo y para el puente recto.

### 3.8.3.1 Puente recto con y sin disipadores

Los resultados obtenidos están en función al tiempo, donde se puede apreciar diferentes modificaciones de las fuerzas en cada periodo.

Figura 65

Resultado de esfuerzos para la viga crítica del puente recto con y sin disipadores.



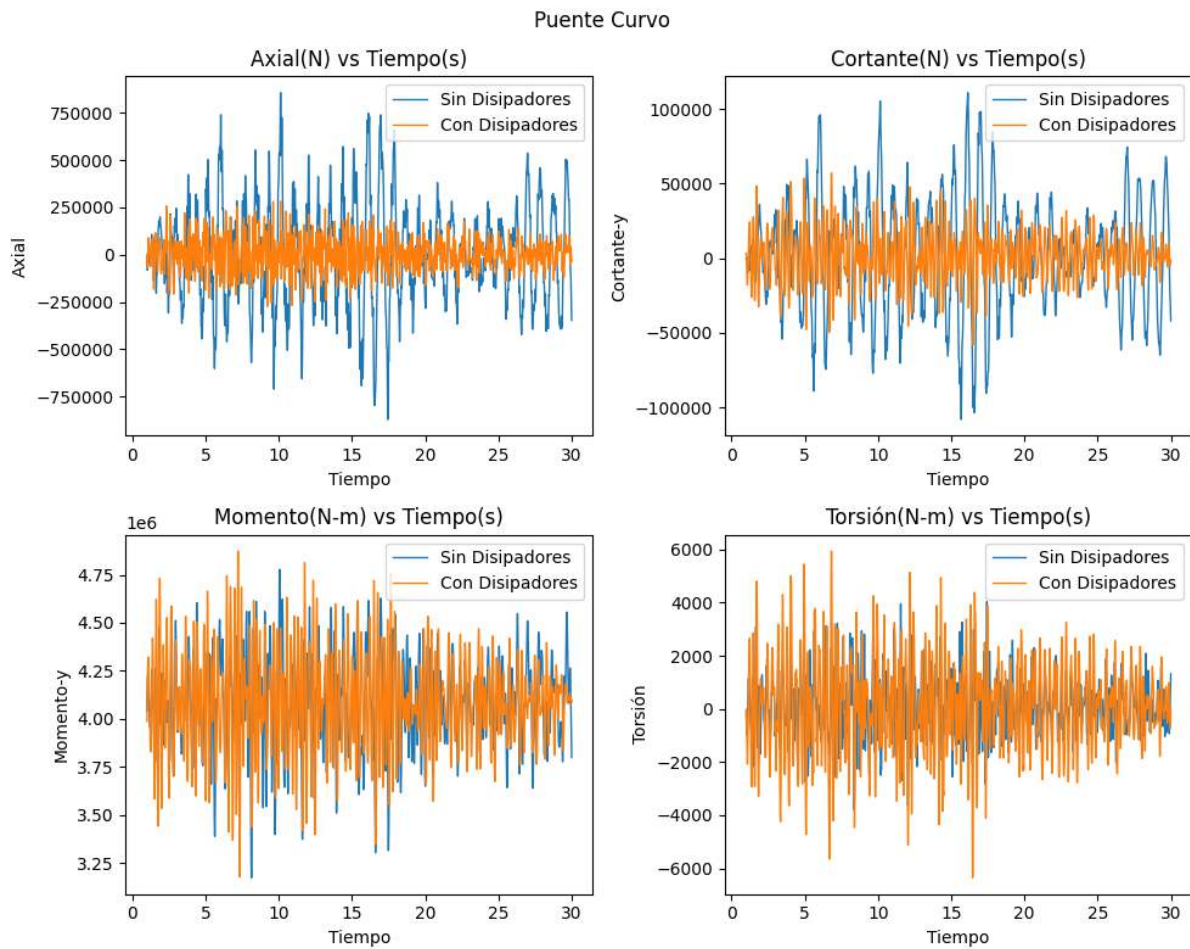
Nota. Resultados del comportamiento del puente con y sin disipadores durante el paso del tiempo para el máximo de los resultados obtenidos de las EQ 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7.

### 3.8.3.2 Puente curvo con y sin aisladores

De la misma manera que los resultados obtenidos del puente recto, se aprecia diferentes modificaciones de las fuerzas en cada periodo, teniendo un análisis con y sin disipadores.

Figura 66

Resultado de esfuerzos para la viga crítica del puente curvo con y sin disipadores.



Nota. Resultados del comportamiento del puente con y sin disipadores durante el paso del tiempo para el máximo de los resultados obtenidos de las EQ 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7.

### 3.8.4 Comportamiento de la estructura con y sin disipadores sísmicos

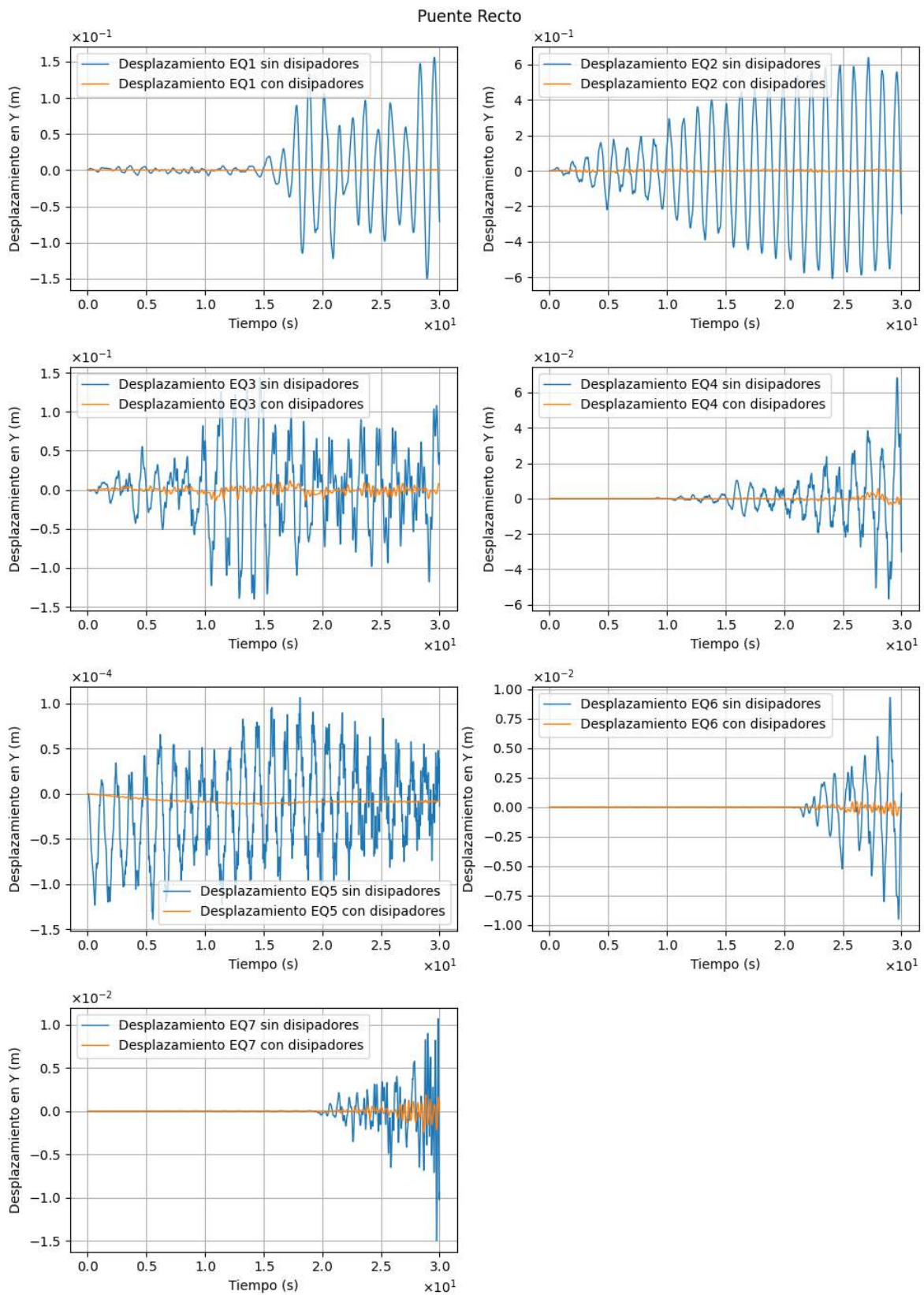
Para el análisis completo de la estructura, se evaluará el comportamiento global comparando puentes con y sin disipadores. Los resultados obtenidos permiten analizar desplazamientos, fuerzas internas y la capacidad de disipación de energía, evidenciando cómo los disipadores mejoran la respuesta dinámica al reducir las demandas sísmicas y controlar las deformaciones. Esta comparación es esencial para comprender las diferencias en el rendimiento estructural y apoyar la toma de decisiones en el diseño y refuerzo de puentes bajo cargas sísmicas.



### 3.8.4.1 Puente recto

Figura 67

Desplazamientos de puente recto con y sin disipadores.

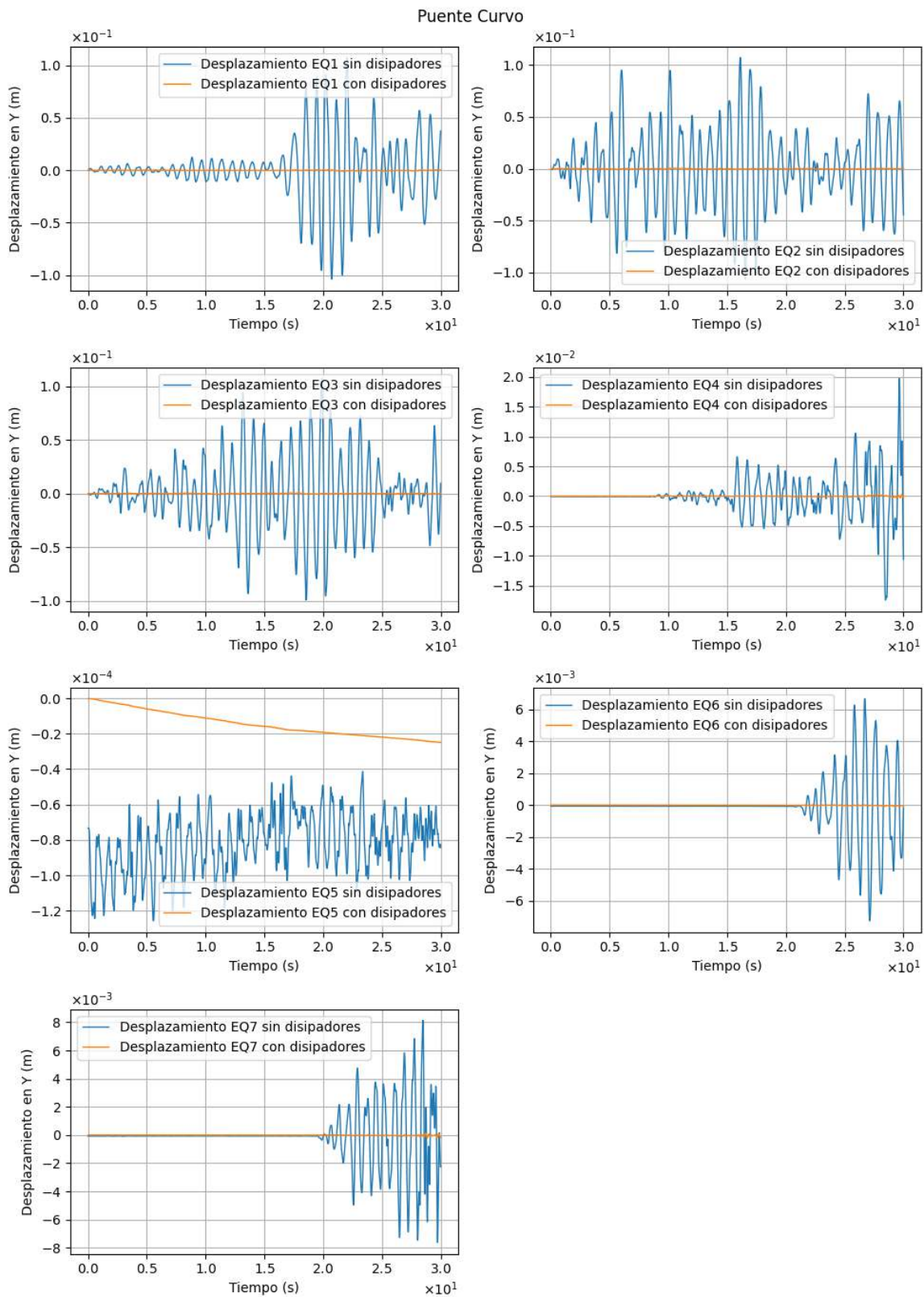


Fuente: Elaboración propia.

### 3.8.4.2 Puente curvo

Figura 68

Desplazamientos de puente curvo con y sin disipadores.



Fuente: Elaboración propia.

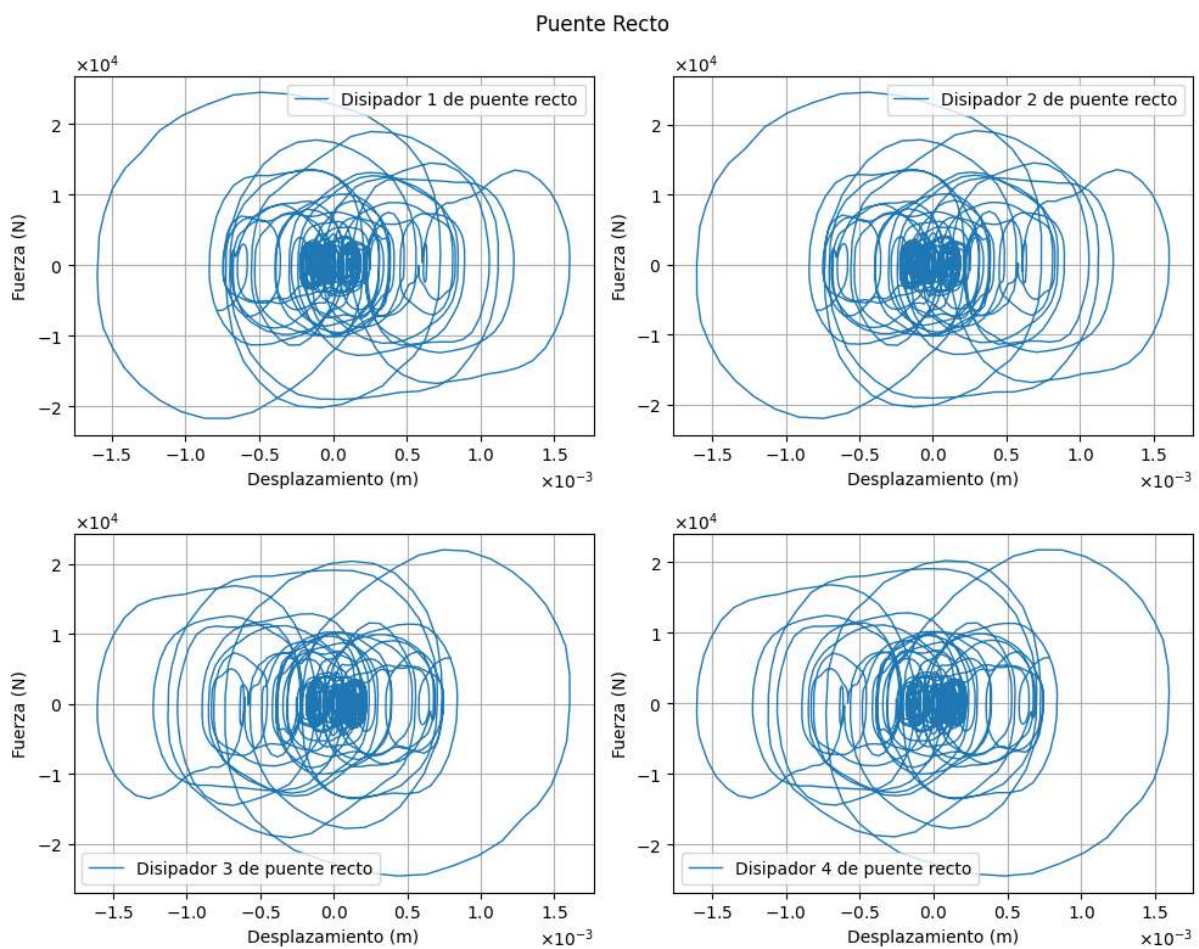
### 3.8.5 Historia del disipador

Se determina el grafico de comportamiento de deformación del disipador al pasar el tiempo, dando como resultado la excitación del elemento estructural, así como se muestra en la figura 69 y figuras siguientes de los diagramas de Fuerza vs Desplazamiento.

#### 3.8.5.1 Puente recto

Figura 69

Desplazamiento en la historia del tiempo del puente recto con disipadores y sin disipadores en las coordenadas X e Y. Obtenido mediante Midas Civil.

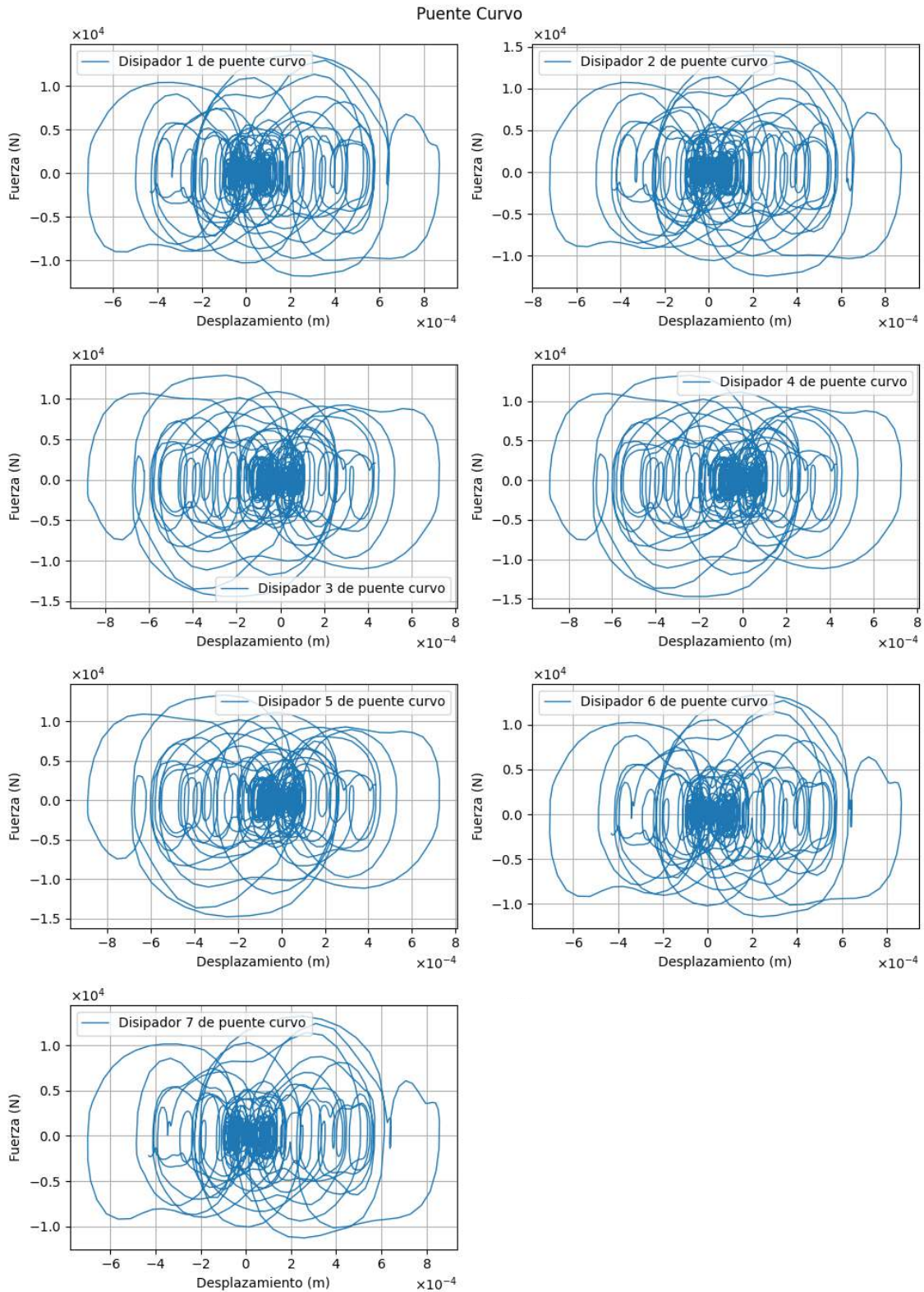


Nota. Teniendo el grafico de Fuerza vs Desplazamiento, para los disipadores colocados en cada tipo de puente, este presenta un gráfico histerético de tipo circular.

### 3.8.5.2 Puente curvo

Figura 70

Desplazamiento en la historia del tiempo del puente curvo con disipadores y sin disipadores en las coordenadas X e Y. Obtenido mediante Midas Civil.



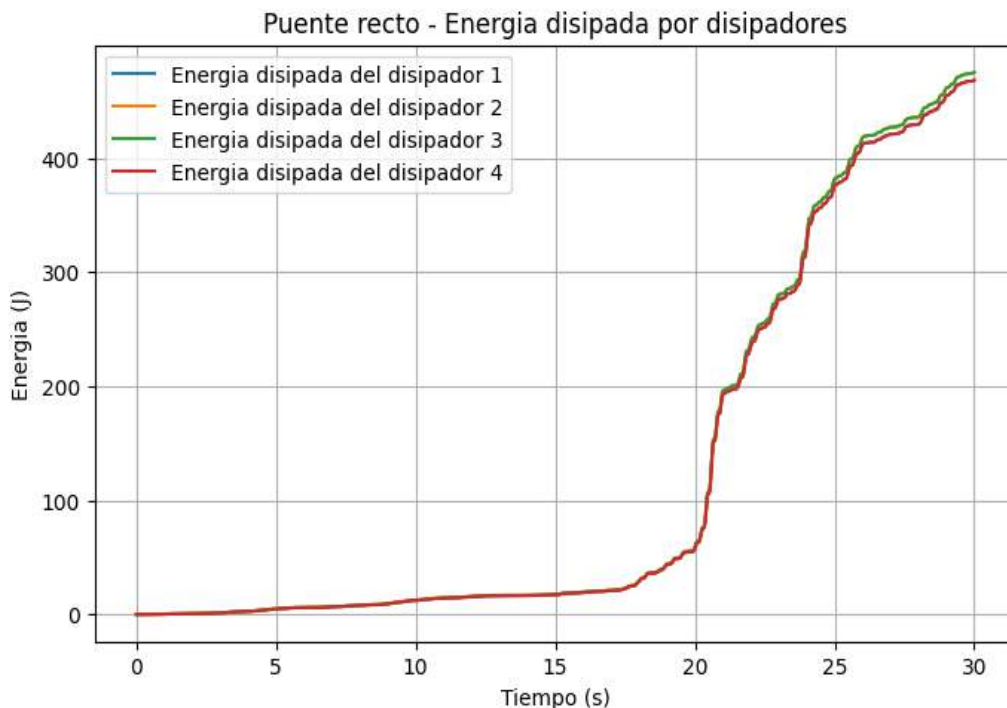
Nota. Teniendo el gráfico de Fuerza vs Desplazamiento, para los disipadores colocados en cada tipo de puente, este presenta un gráfico histerético de tipo circular.

### 3.8.5.3 Energía disipada

De acuerdo con los resultados obtenidos del disipador, se puede establecer la energía que se disipa durante un evento sísmico. Esto permite evaluar la eficiencia de los dispositivos en la protección de la estructura, asegurando que los puentes mantengan su integridad y estabilidad frente a fuerzas externas.

Figura 71

Energía disipada por los disipadores sísmicos incorporados en el puente recto.

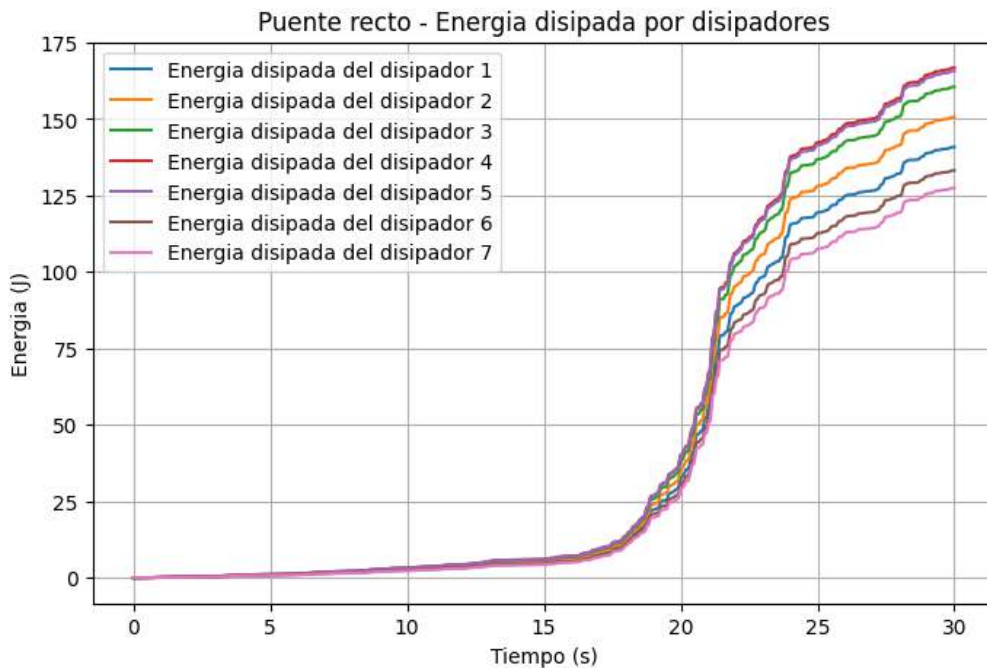


Nota. La figura muestra que los cuatro disipadores de un puente recto disipan energía de manera similar durante un sismo, especialmente después de los 20 segundos, lo que ayuda a proteger la estructura del puente.

Los resultados muestran que la energía disipada por los dispositivos presenta valores similares: el disipador 1 alcanzó 468.29 J, el disipador 2 registró un valor de 475.17 J, el disipador 3 mostró una disipación similar con 475.16 J y el disipador 4 nuevamente en 468.28 J. Esto indica una consistencia en la capacidad de disipación entre los dispositivos evaluados, lo cual es crucial para mantener la estabilidad estructural del puente durante un evento sísmico. La eficiencia de estos dispositivos asegura que la estructura se mantenga íntegra frente a las fuerzas externas, minimizando los daños y prolongando su vida útil.

Figura 72

Energía disipada por los disipadores sísmicos incorporados en el puente curvo.



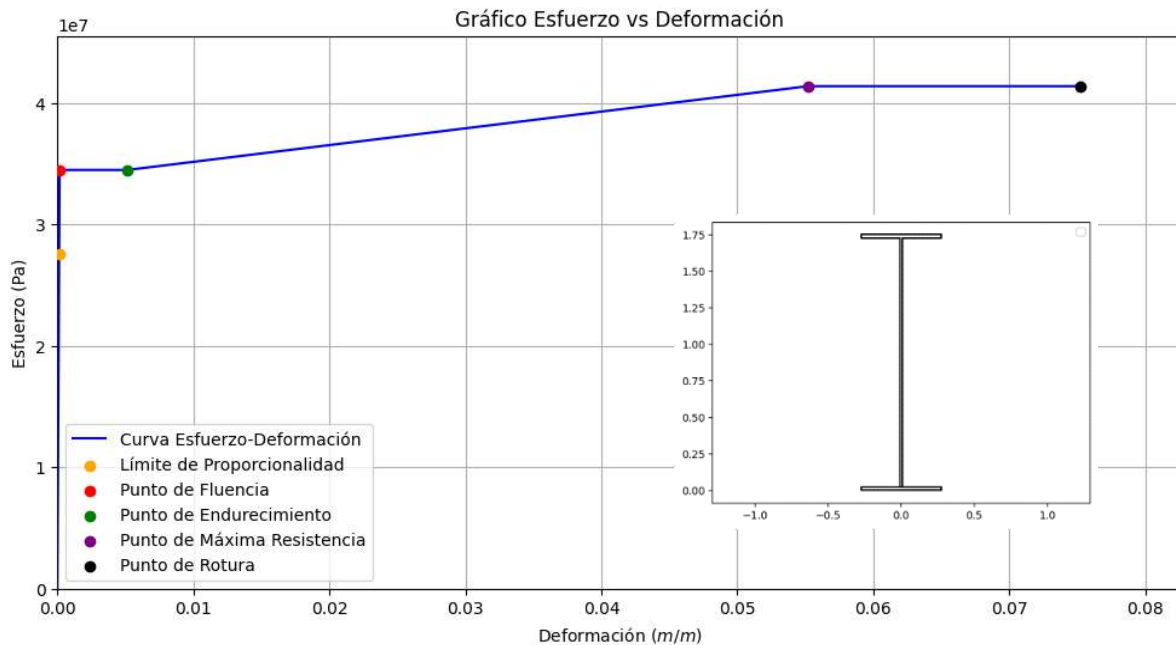
Nota. Se muestra cómo cada uno de los siete disipadores de un puente recto absorbe energía durante un sismo, aumentando su capacidad de disipación a lo largo del tiempo. Esto ayuda a proteger la estructura del daño sísmico.

Los resultados indican una variación en la energía disipada por los dispositivos, con el disipador 1 registrando 140.90 J, seguido por el disipador 2 con 150.64 J y el disipador 3 con 160.53 J. El disipador 4 alcanzó el valor más alto de 166.79 J, mientras que el disipador 5 mostró una disipación similar con 165.76 J. Por otro lado, el disipador 6 y el disipador 7 presentaron los valores más bajos, con 133.25 J y 127.50 J respectivamente, evidenciando una diferencia notable en la capacidad de disipación entre algunos dispositivos.

### 3.8.6 Curvatura de esfuerzo deformación

La curva de capacidad elaborada con la norma ATC 40, se evaluará según el FEMA 440, según el análisis de capacidad encontrar el punto de desempeño sísmico cuando se incorporen espectros de respuesta para escalas de raro, muy raro y extremo. Se tendrá que determinar el diagrama de momento curvatura teniendo una figura 73, la cual establece el rango elástico y plástico de la estructura.

Figura 73  
Diagrama esfuerzo – deformación.



Fuente: Elaboración propia.

Para el puente recto, los gráficos comparan el esfuerzo y la deformación en un puente recto bajo siete escenarios sísmicos (EQ1 a EQ7), mostrando que en todos los casos los disipadores reducen significativamente los esfuerzos. Por ejemplo, en EQ1 el esfuerzo disminuye de 8 MPa a 6 MPa para  $\pm 4 \times 10^{-8}$  de deformación, en EQ2 baja de  $4 \times 10^1$  MPa a  $3 \times 10^1$  MPa para  $\pm 2 \times 10^{-7}$ , y en EQ3 se reduce de  $1 \times 10^1$  MPa a  $0.8 \times 10^1$  MPa para  $\pm 6 \times 10^{-8}$ . Similarmente, en EQ4, EQ5, EQ6 y EQ7, los esfuerzos se reducen en distintos grados, evidenciando que los disipadores mejoran el comportamiento sísmico del puente al disminuir las demandas internas en toda la gama de deformaciones analizadas.

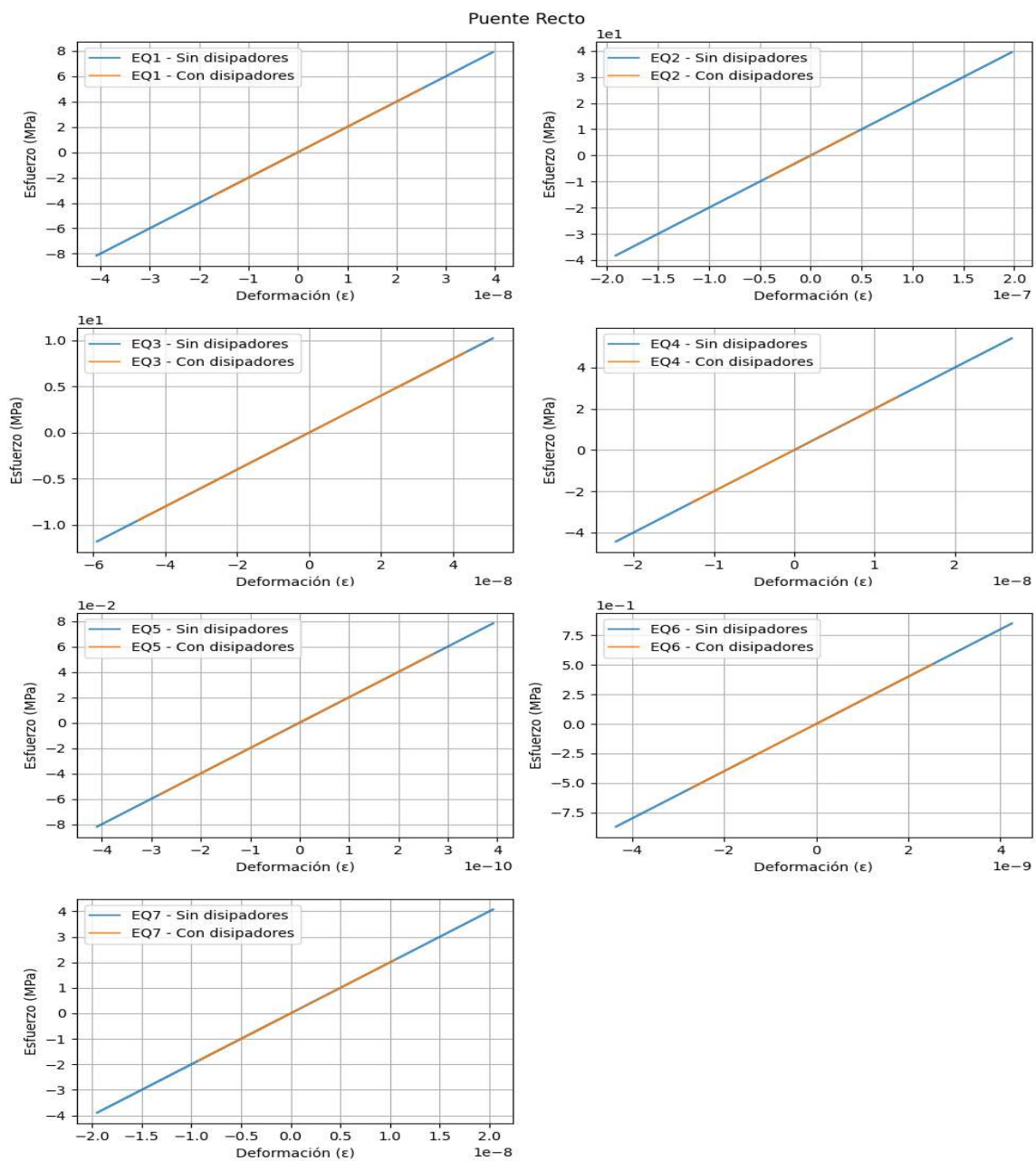
Para el puente curvo, los gráficos muestran la relación entre esfuerzo y deformación en un puente curvo bajo siete escenarios sísmicos (EQ1 a EQ7), comparando los casos con y sin disipadores. En todos los casos, los modelos con disipadores presentan una reducción en los esfuerzos. Por ejemplo, en EQ1 el esfuerzo disminuye de 8 MPa a 6 MPa para deformaciones de  $\pm 4 \times 10^{-8}$ , y en EQ2 de 8 MPa a 5 MPa para la misma deformación. En EQ3 y EQ4, los esfuerzos se reducen de 8 MPa a aproximadamente 6 MPa en  $\pm 4 \times 10^{-8}$  y  $\pm 1.5 \times 10^{-8}$ ,

respectivamente. Para EQ5, el esfuerzo baja de  $2 \times 10^{-2}$  MPa a  $1.5 \times 10^{-2}$  MPa, en EQ6 de  $2.5 \times 10^{-1}$  MPa a  $1.5 \times 10^{-1}$  MPa, y en EQ7 de 2 MPa a 1.5 MPa para  $\pm 7.5 \times 10^{-9}$ . Esto evidencia que los disipadores mejoran la respuesta sísmica del puente curvo al reducir los esfuerzos en todas las situaciones analizadas.

### 3.8.6.1 Puente recto

Figura 74

Diagrama esfuerzo – deformación para diferentes casos de estudio para el puente recto con y sin disipadores.



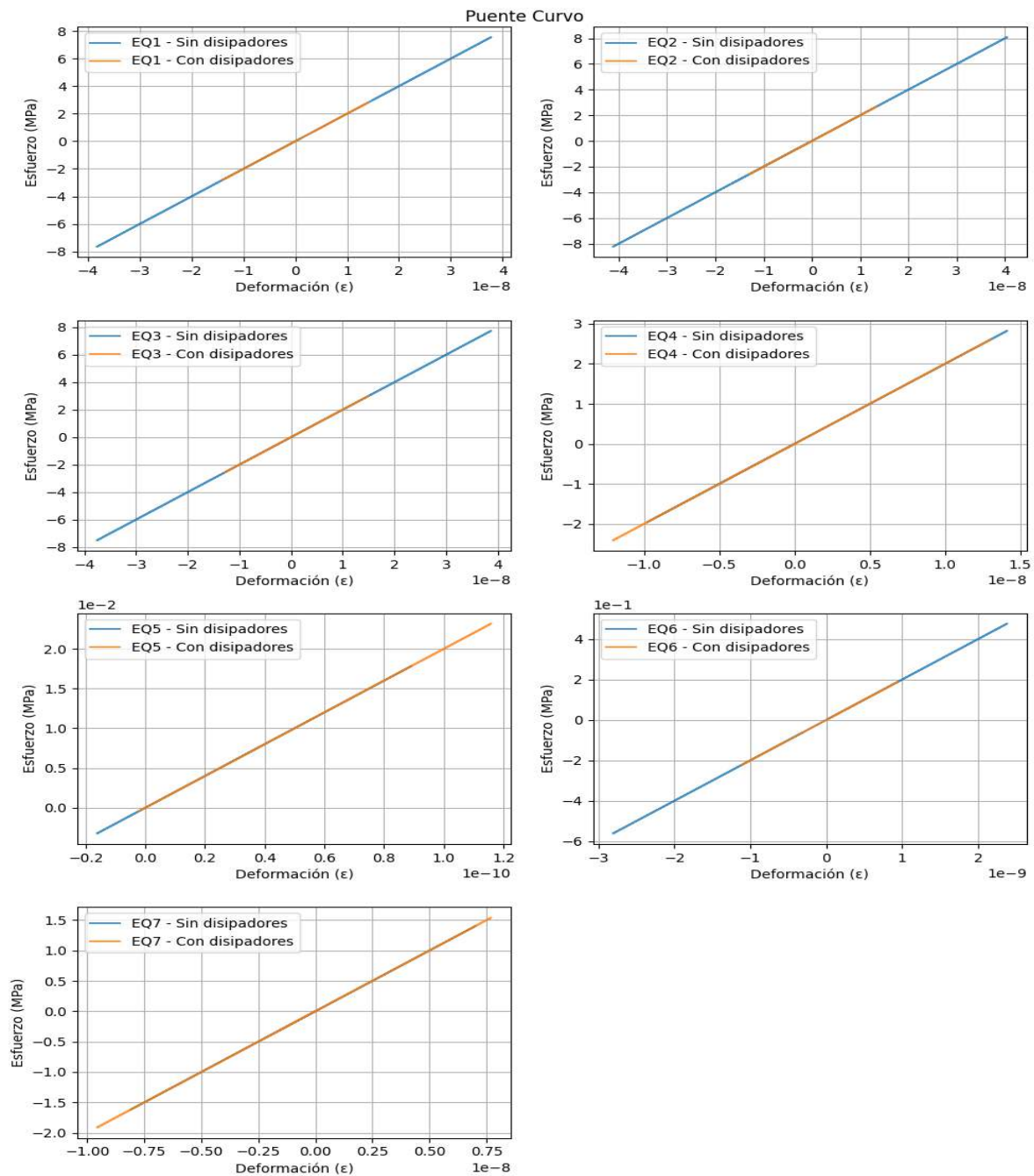
Fuente: Elaboración propia.



### 3.8.6.2 Puente curvo

Figura 75

Diagrama esfuerzo – deformación para diferentes casos de estudio para el puente curvo con y sin disipadores.



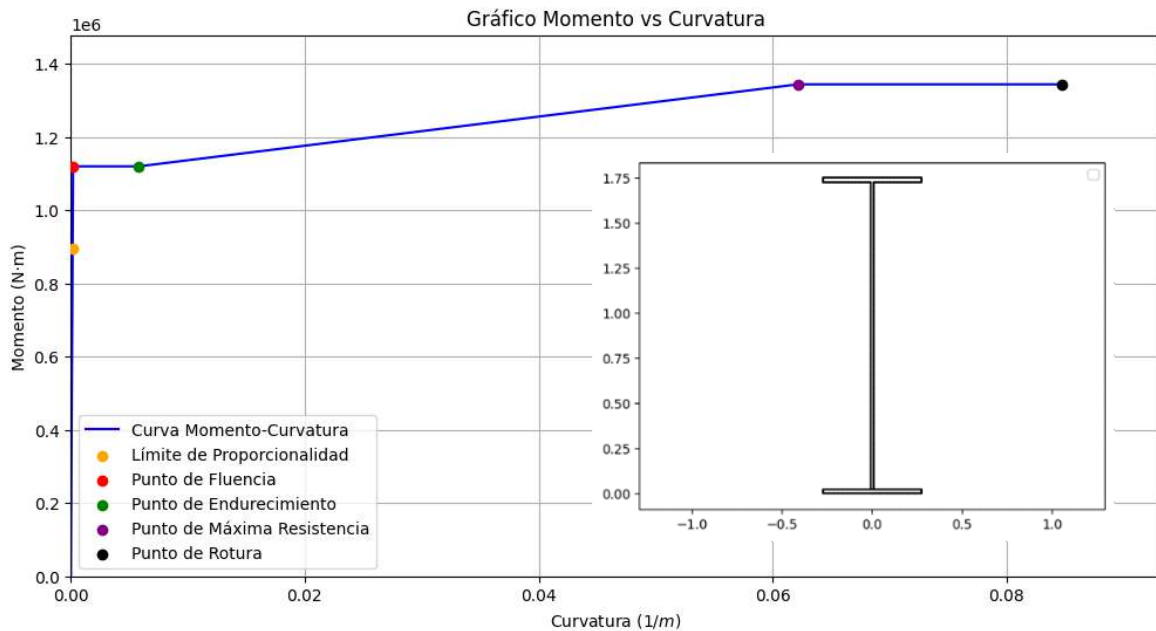
Fuente: Elaboración propia.

### 3.8.7 Diagrama de momento curvatura

La viga presenta el diagrama momento curvatura, así como se muestra en la figura 76, este es referente al uso de las vigas metálicas en forma de I, tipológicamente de acuerdo con el

AISC se consideran de tipo W se muestra en la figura 76, se tiene un gráfico bilineal histerético, el cual se tendrá que evaluar para obtener la curva de capacidad.

Figura 76  
Diagrama momento – curvatura.



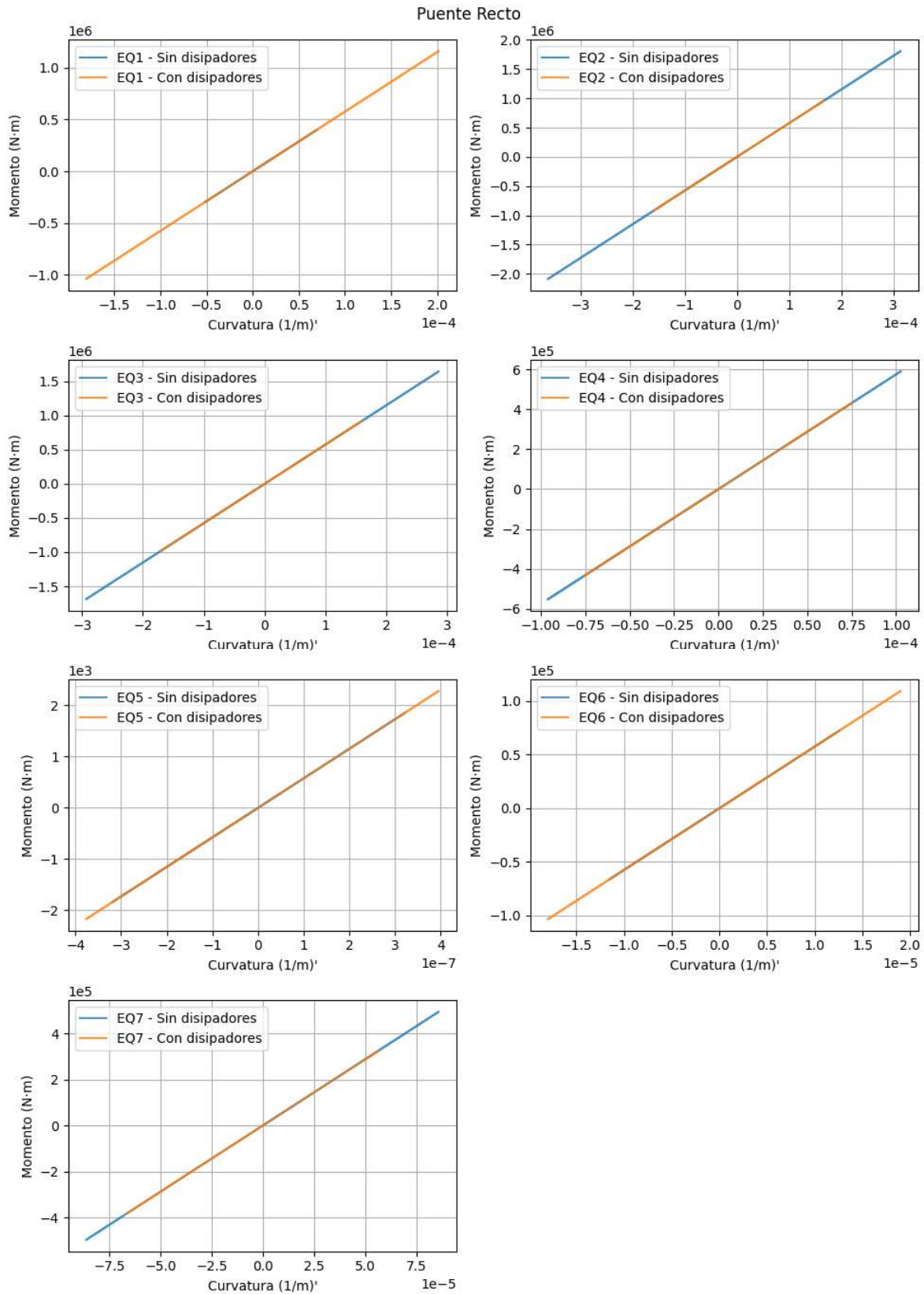
Fuente: Elaboración propia.

Los gráficos comparan la relación entre momento y curvatura en puentes recto y curvo bajo siete escenarios sísmicos (EQ1 a EQ7), mostrando que, en ambos tipos de puente, el uso de disipadores reduce significativamente los momentos. En el puente recto, el momento máximo en EQ1 se reduce de  $1.2 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{m}$  a  $1.0 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{m}$  para  $\pm 2 \times 10^{-4} \text{ 1/m}$ , mientras que en el puente curvo baja de  $6 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{m}$  a  $5 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{m}$  para  $\pm 1 \times 10^{-4} \text{ 1/m}$ . De manera similar, en EQ2, el momento en el puente recto disminuye de  $2.0 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{m}$  a  $1.8 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{m}$ , y en el puente curvo de  $6 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{m}$  a  $4 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{m}$  para deformaciones comparables. Los escenarios restantes (EQ3 a EQ7) muestran reducciones consistentes en los momentos, lo que evidencia la efectividad de los disipadores en mejorar la respuesta sísmica de ambas estructuras al disminuir las demandas de momento en distintas condiciones de curvatura.

### 3.8.7.1 Puente recto

Figura 77

Diagrama momento – curvatura para diferentes espectros con y sin disipadores para el puente recto.

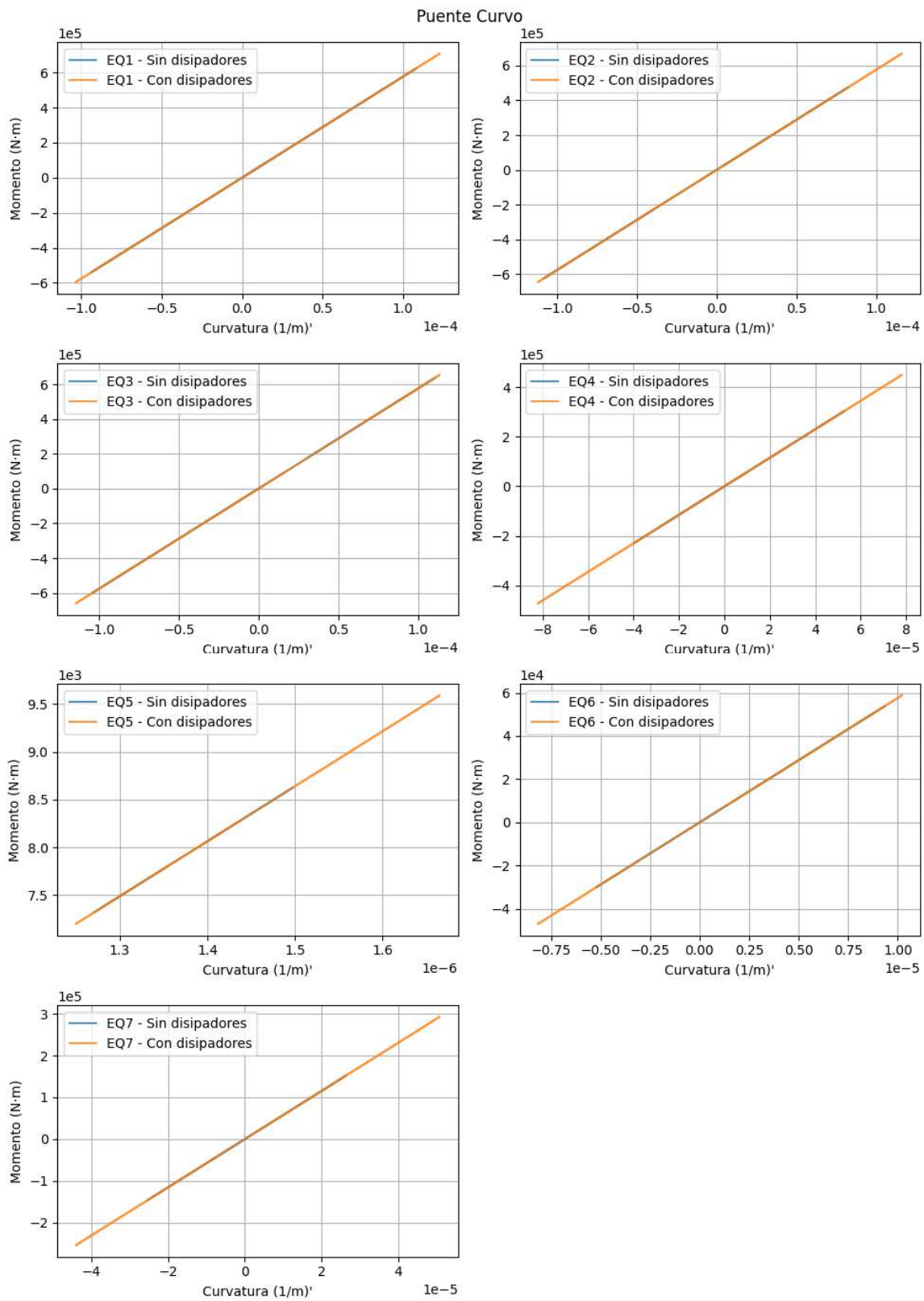


Fuente: Elaboración propia.

### 3.8.7.2 Puente curvo

Figura 78

Diagrama momento – curvatura para diferentes espectros con y sin disipadores para el puente curvo.



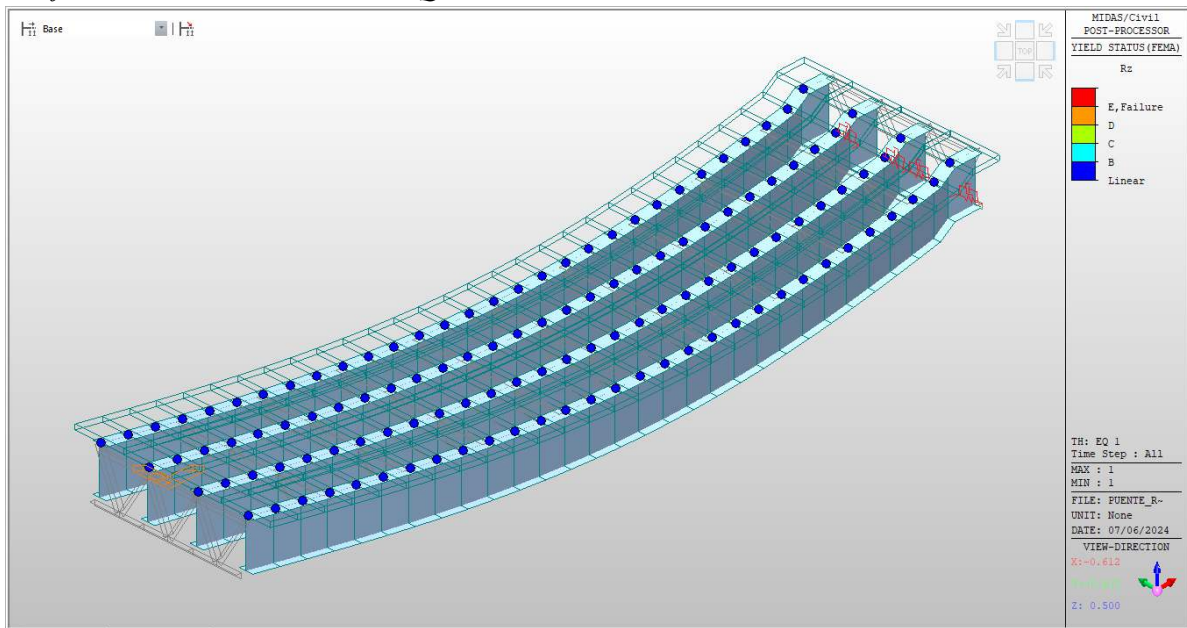
Fuente: Elaboración propia.

### 3.8.8 Rotulas plásticas y su comportamiento

Determinación de acuerdo con el FEMA 440 de las rotulas asignadas a las vigas metálicas del puente recto:

Figura 79

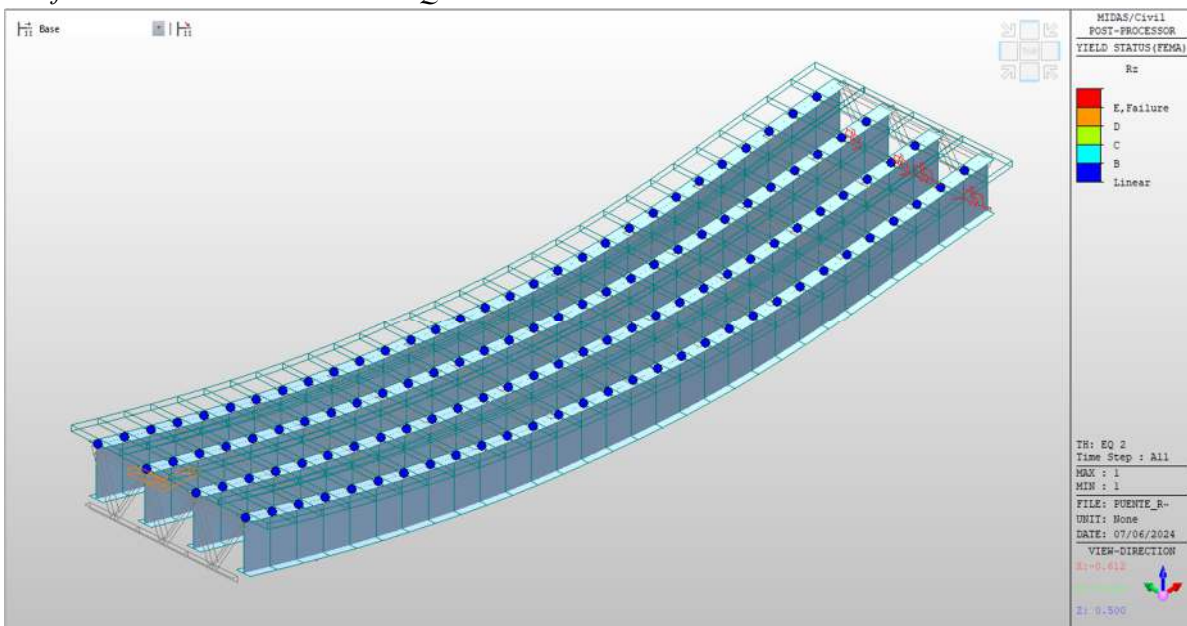
Verificación de rótulas del sismo EQ 1 de acuerdo con la normativa FEMA 440.



Fuente: Elaboración propia del software Midas Civil 2022.

Figura 80

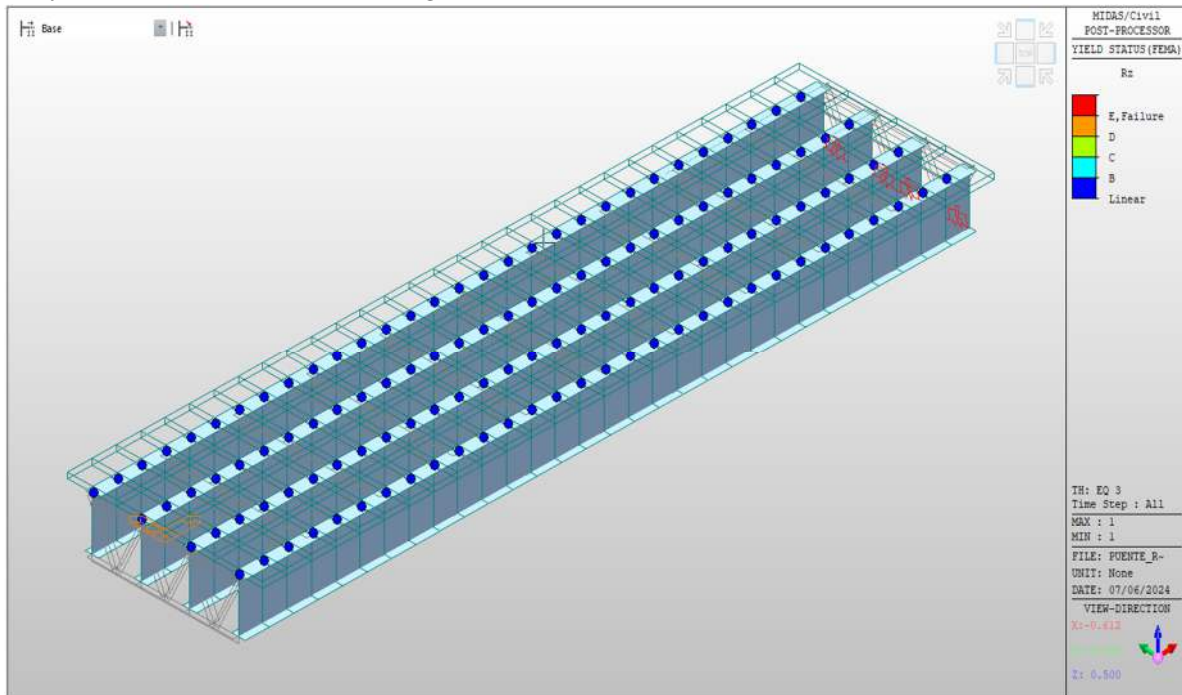
Verificación de rótulas del sismo EQ 2 de acuerdo con la normativa FEMA 440.



Fuente: Elaboración propia del software Midas Civil 2022.

Figura 81

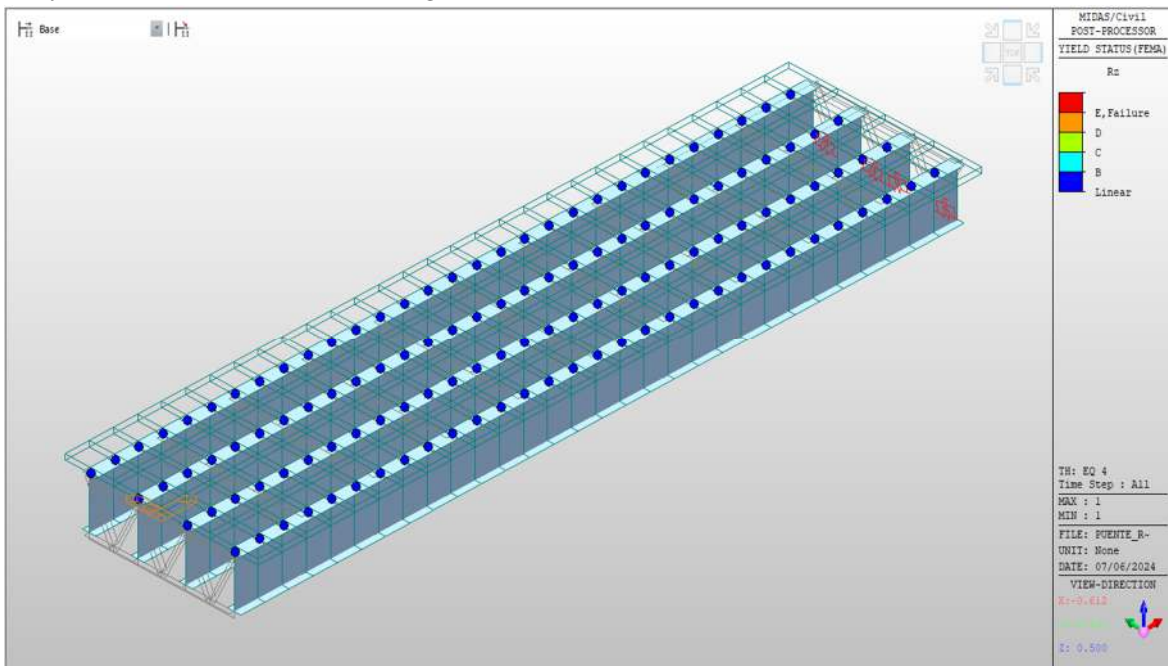
Verificación de rótulas del sismo EQ 3 de acuerdo con la normativa FEMA 440.



Fuente: Elaboración propia del software Midas Civil 2022.

Figura 82

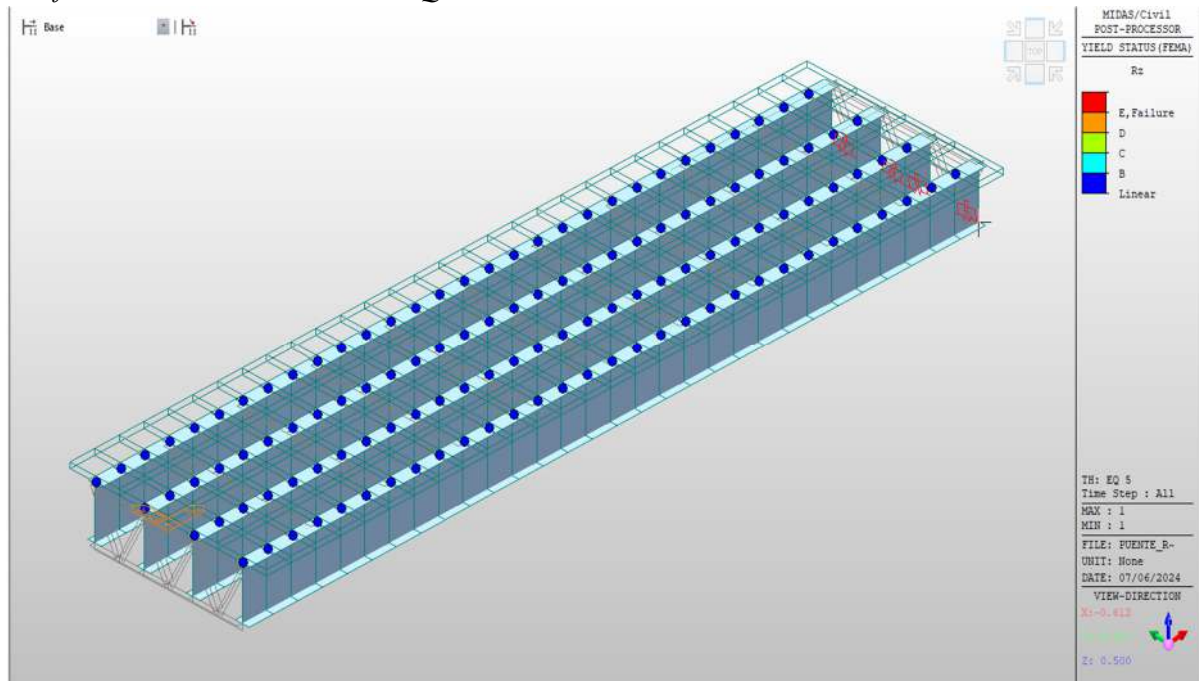
Verificación de rótulas del sismo EQ 4 de acuerdo con la normativa FEMA 440.



Fuente: Elaboración propia del software Midas Civil 2022.

Figura 83

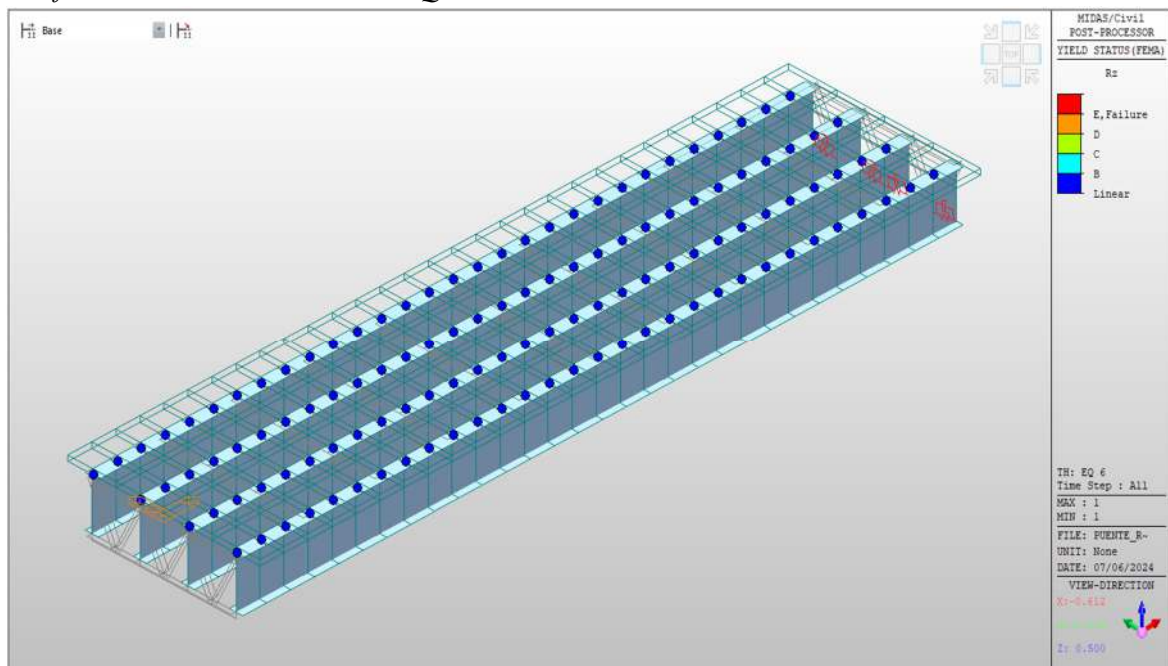
Verificación de rótulas del sismo EQ 5 de acuerdo con la normativa FEMA 440.



Fuente: Elaboración propia del software Midas Civil 2022.

Figura 84

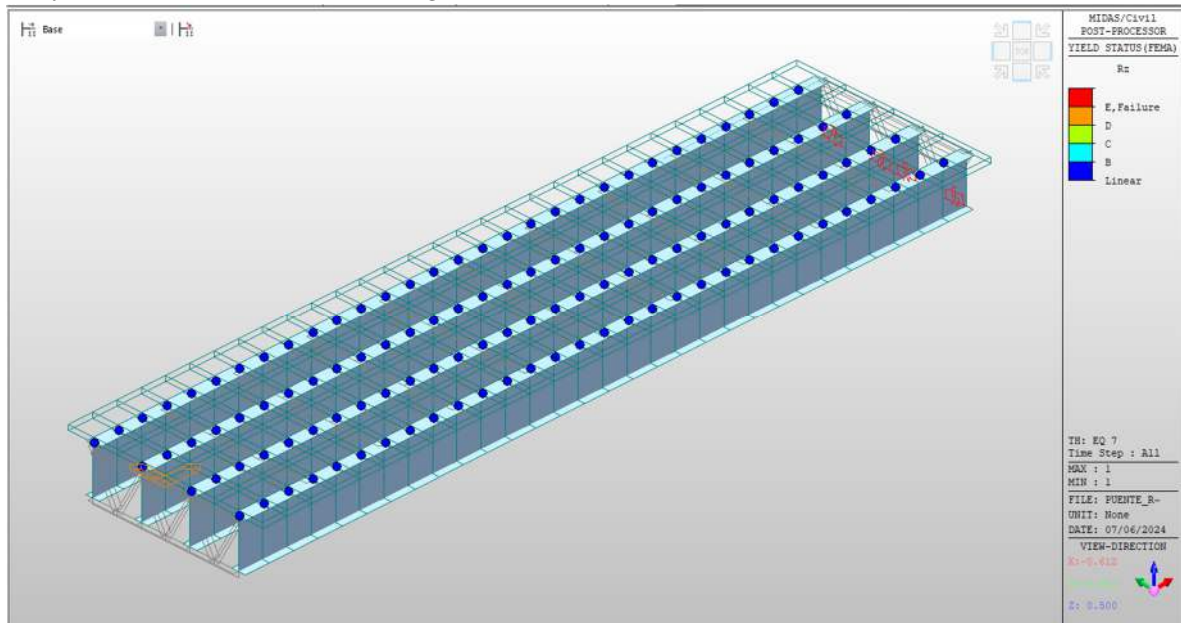
Verificación de rótulas del sismo EQ 6 de acuerdo con la normativa FEMA 440.



Fuente: Elaboración propia del software Midas Civil 2022.

Figura 85

Verificación de rótulas del sismo EQ 7 de acuerdo con la normativa FEMA 440.

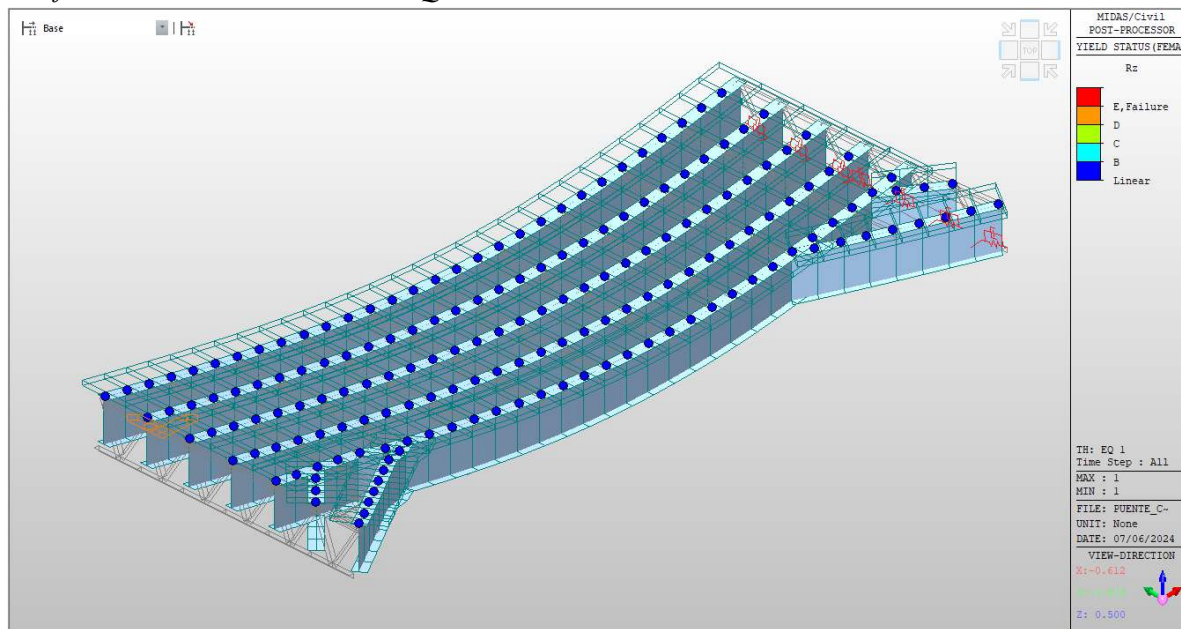


Fuente: Elaboración propia del software Midas Civil 2022.

Determinación de acuerdo con el FEMA 440 de las rótulas asignadas a las vigas metálicas del puente curvo:

Figura 86

Verificación de rótulas del sismo EQ 1 de acuerdo con la normativa FEMA 440.

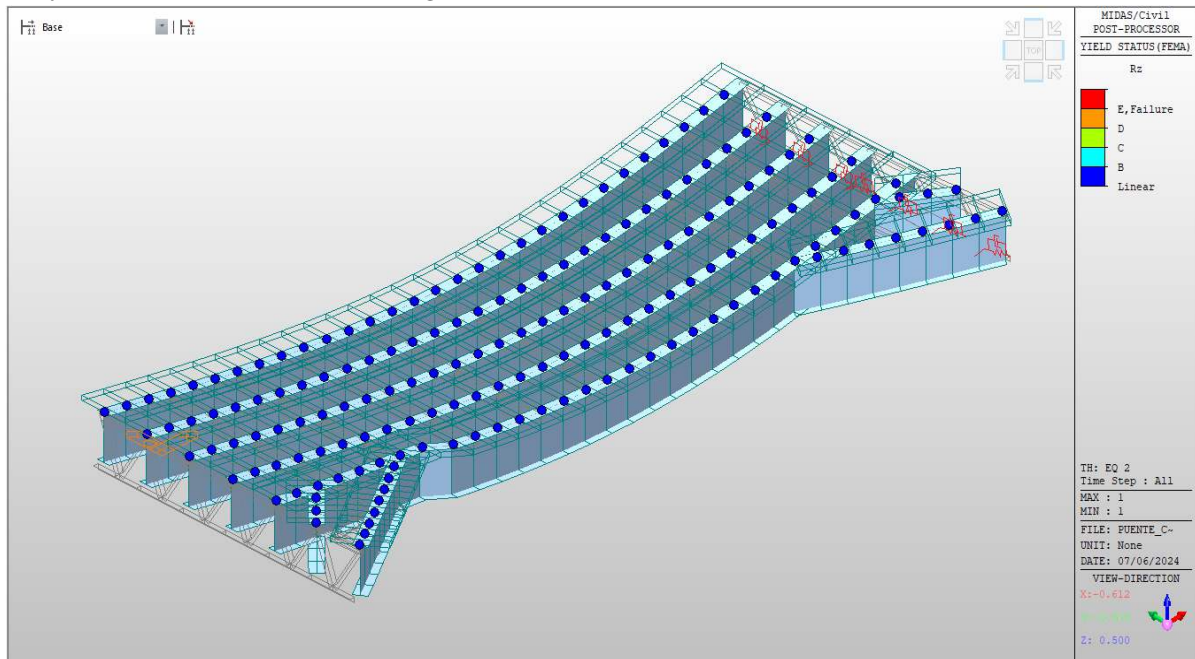


Fuente: Elaboración propia del software Midas Civil 2022.



Figura 87

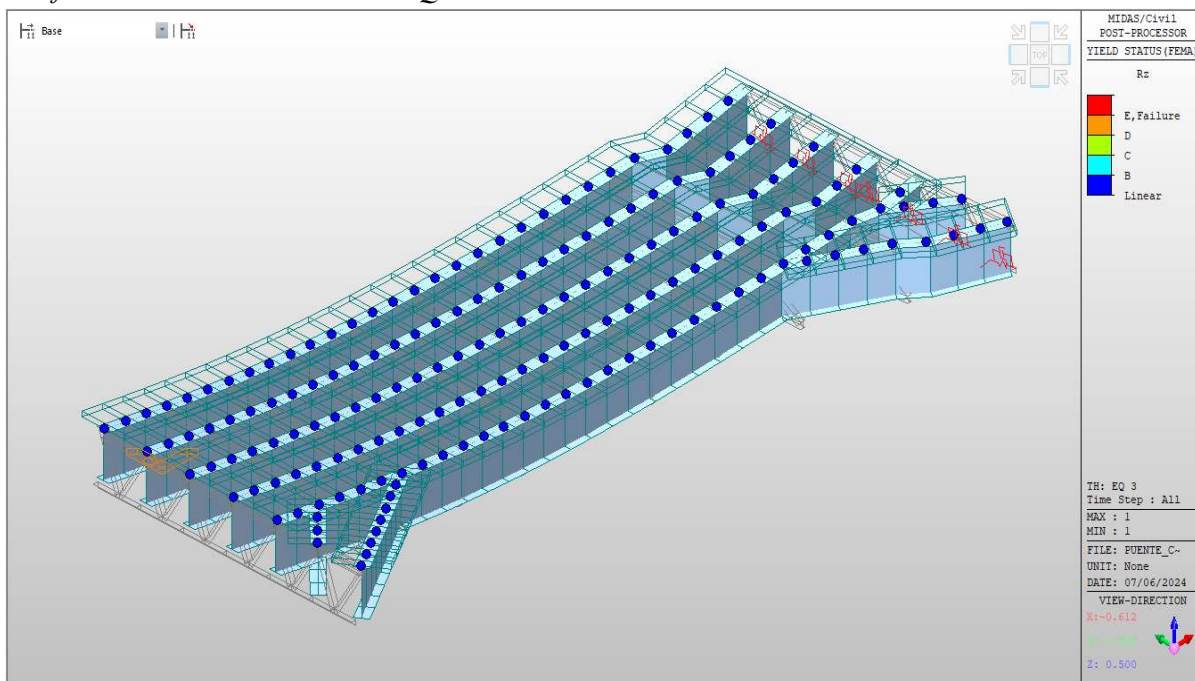
Verificación de rótulas del sismo EQ 2 de acuerdo con la normativa FEMA 440.



Fuente: Elaboración propia del software Midas Civil 2022.

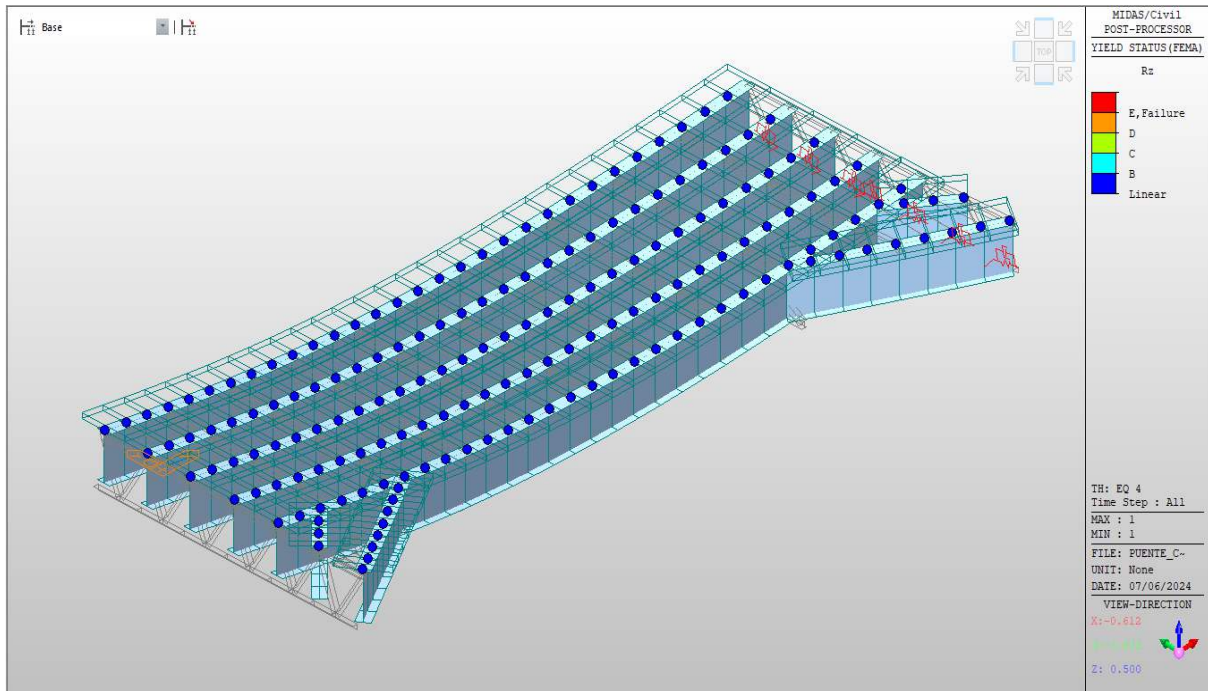
Figura 88

Verificación de rótulas del sismo EQ 3 de acuerdo con la normativa FEMA 440.



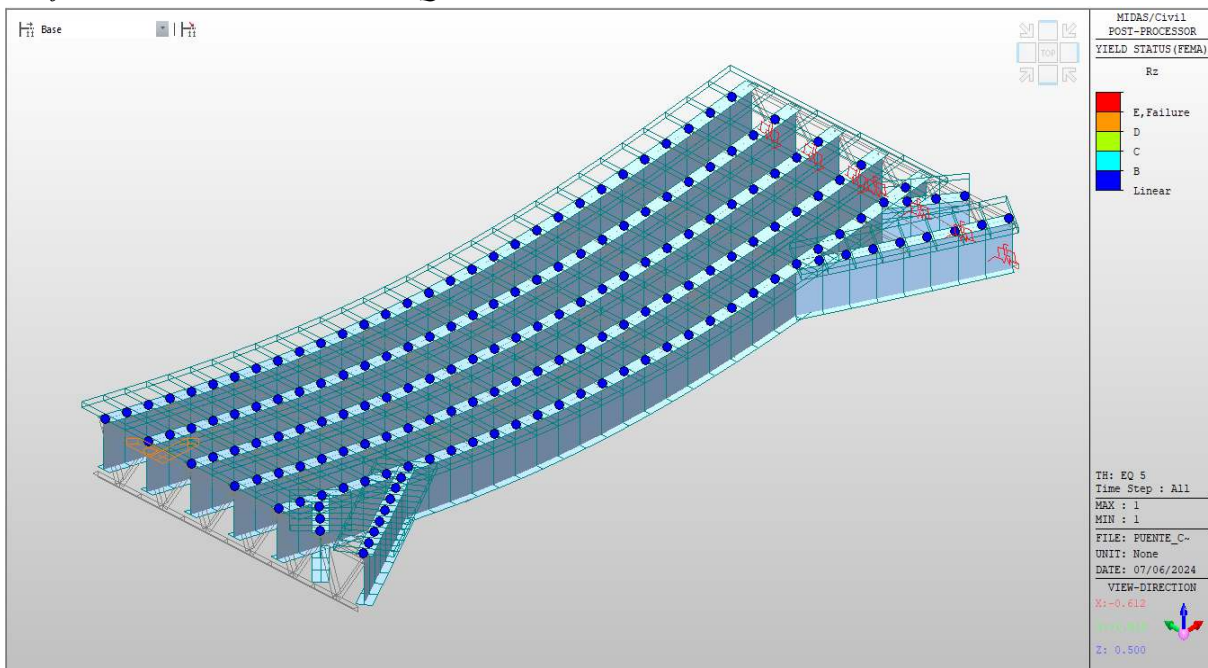
Fuente: Elaboración propia del software Midas Civil 2022.

Figura 89  
 Verificación de rótulas del sismo EQ 4 de acuerdo con la normativa FEMA 440.



Fuente: Elaboración propia del software Midas Civil 2022.

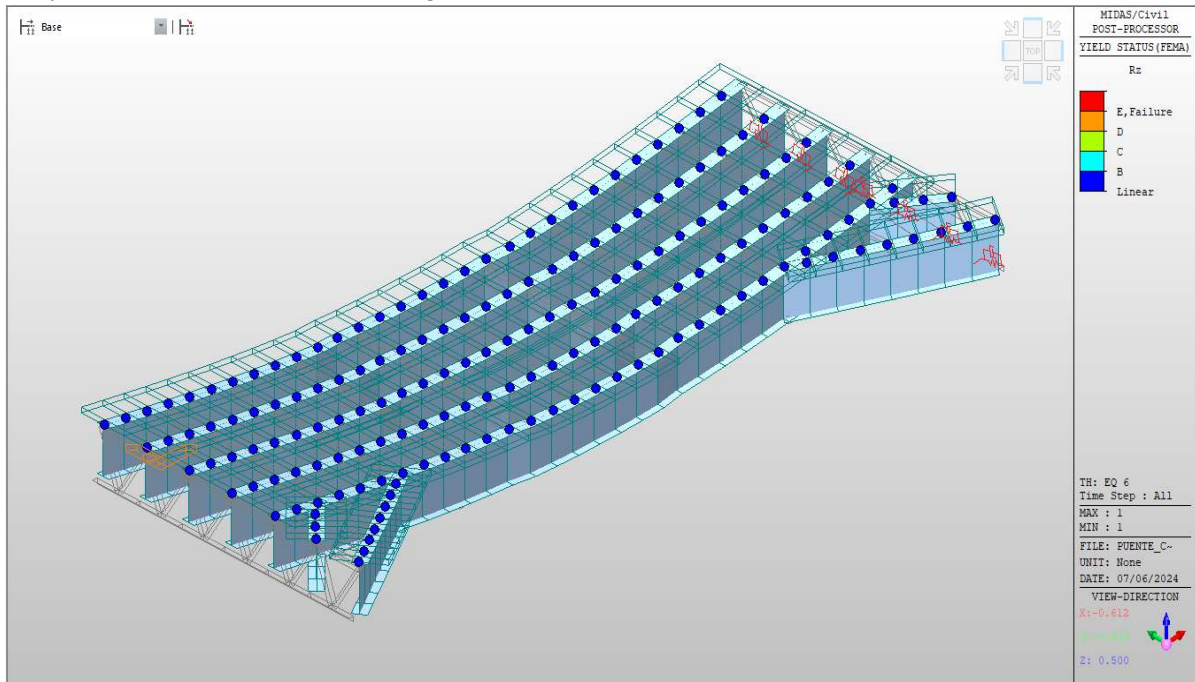
Figura 90  
 Verificación de rótulas del sismo EQ 5 de acuerdo con la normativa FEMA 440.



Fuente: Elaboración propia del software Midas Civil 2022.

Figura 91

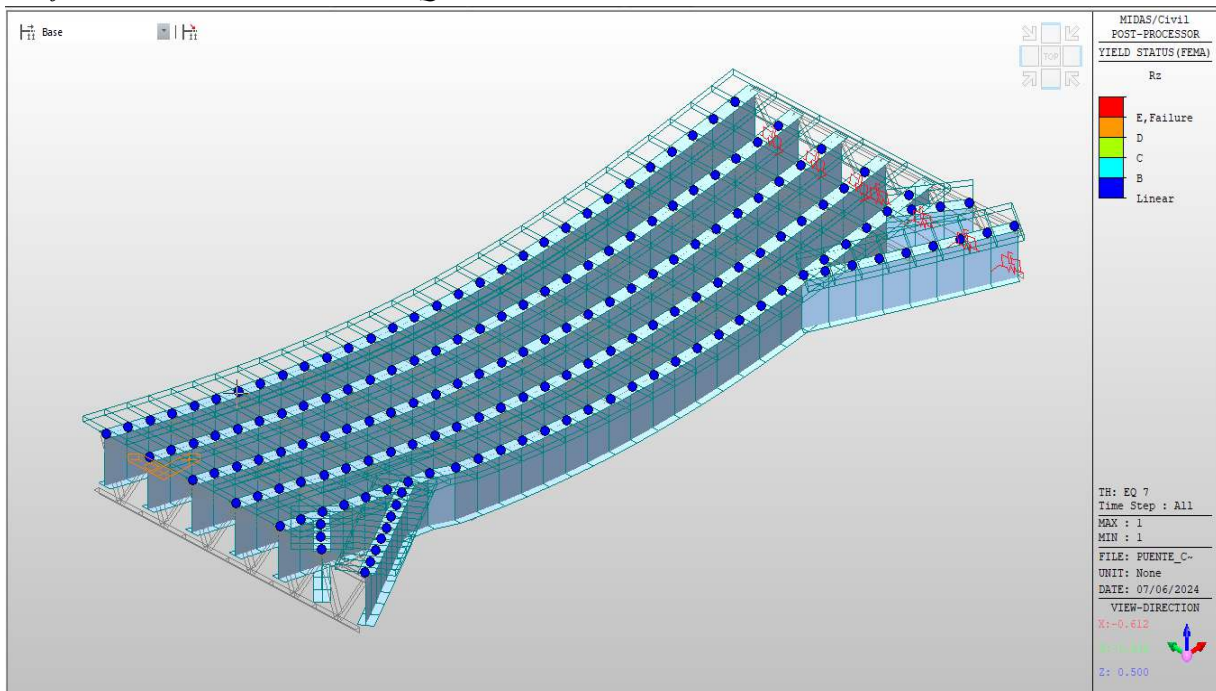
Verificación de rótulas del sismo EQ 6 de acuerdo con la normativa FEMA 440.



Fuente: Elaboración propia del software Midas Civil 2022.

Figura 92

Verificación de rótulas del sismo EQ 7 de acuerdo con la normativa FEMA 440.



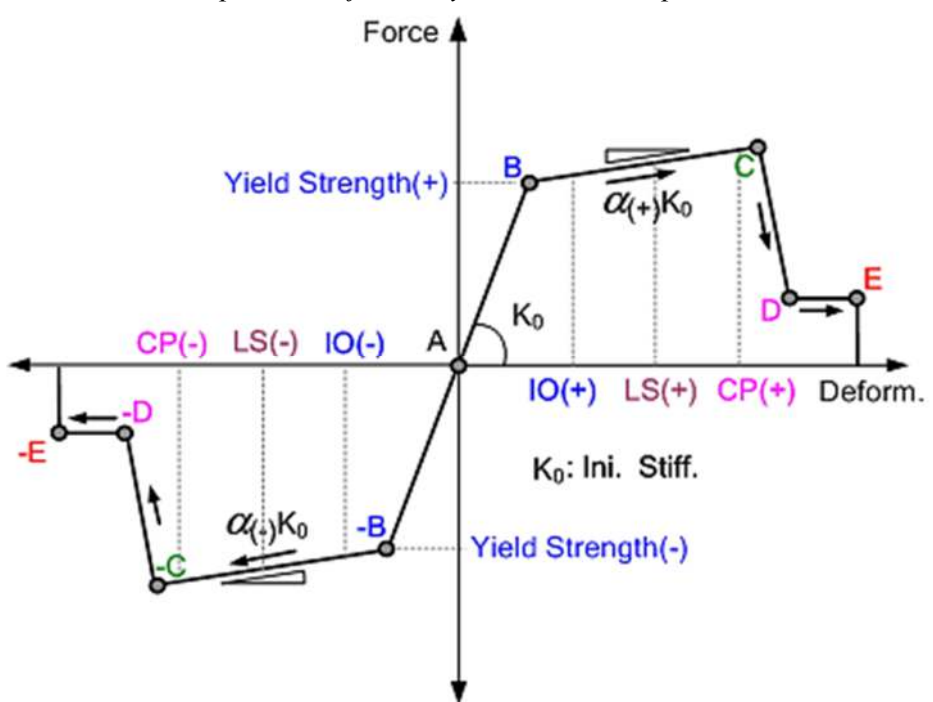
Fuente: Elaboración propia del software Midas Civil 2022.

### 3.8.9 Análisis por desempeño

Establecimiento de los parámetros que regirán que la estructura se encuentre en los diferentes rangos, así como se muestra en la figura 93.

Figura 93

Puntos resaltantes para identificación y análisis del comportamiento de las rotulas en la estructura.



Fuente: Incorporado en el software Midas Civil 2022.

Donde:

- ✓ IO Ocupación Inmediata
- ✓ LS Seguridad de vida
- ✓ CP Prevención al Colapso

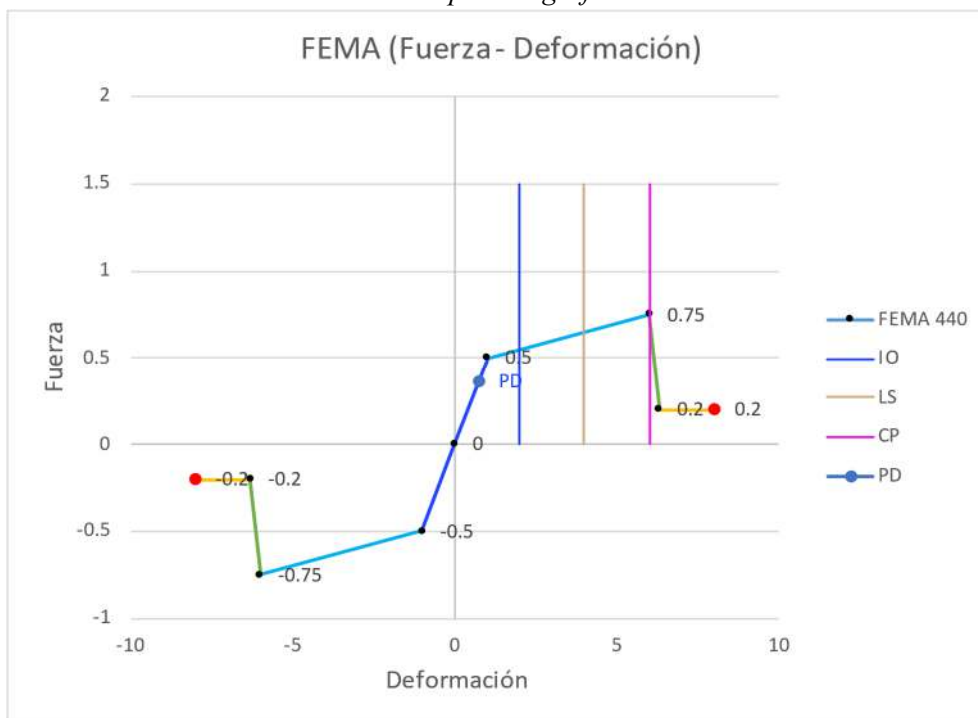
Se determinó los parámetros que establecen el FEMA 440 mediante el cual se evaluará las vigas metálicas, estos parámetros para los coeficientes por el método del espectro de capacidad.

Se dispuso mediante el análisis por espectro de capacidad, este método se fundamenta en la Linealización Equivalente del Espectro de Capacidad, donde se asume que el

desplazamiento máximo de un sistema no lineal con un grado de libertad (GDL) puede estimarse a partir de un sistema elástico lineal equivalente, ajustando su periodo y amortiguamiento. Este sistema lineal equivalente, conocido como Sistema Equivalente o Sustituto, permite calcular el desplazamiento inelástico máximo, denominado Punto de Desempeño, de manera iterativa. El proceso comienza con la generación de la curva de capacidad de la estructura, seguida de la conversión de resultados al formato ADRS, considerando las propiedades dinámicas y la demanda sísmica del sistema. El método supone que el amortiguamiento equivalente es proporcional al área bajo el espectro de capacidad y que el periodo equivalente se determina en función del desplazamiento, haciendo necesaria una solución iterativa para encontrar el Punto de Desempeño, obteniendo la figura 94, donde se incorporara el espectro de respuesta.

Figura 94

Puntos de acuerdo con el FEMA 440 para la gráfica de momento curvatura.



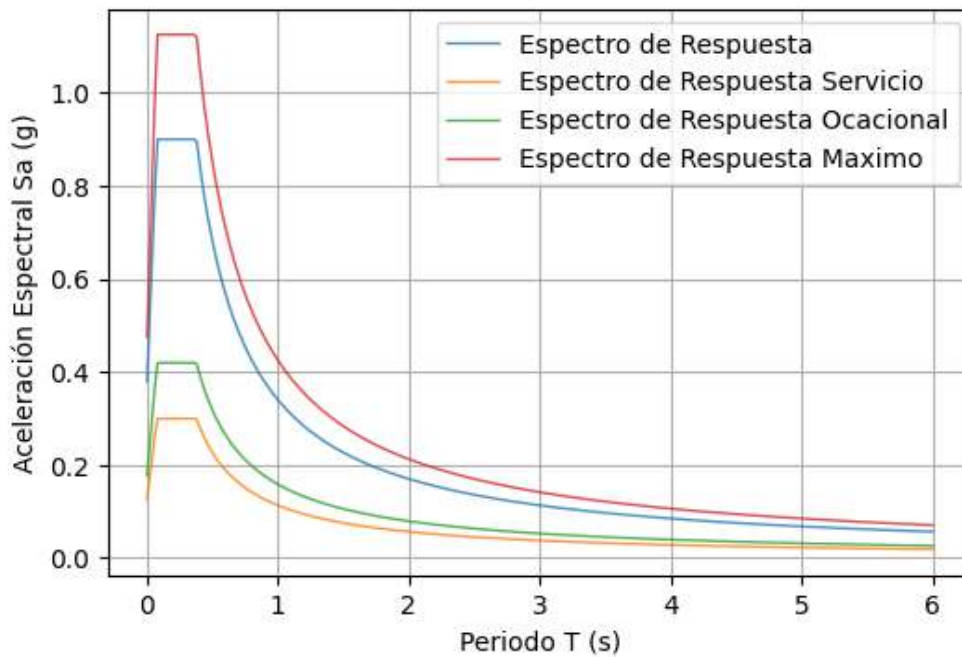
Fuente: Elaboración propia.

El procedimiento se establece según la ATC 40 para encontrar el espectro de capacidad que se transformará en aceleraciones para diferentes tipos de daño. En la figura 94, se muestran

los análisis para encontrar el punto de desempeño. En este contexto, se generan gráficos Sd vs. Sa donde la curva de capacidad se transforma en espectro de capacidad. A través de esta intersección con los espectros de respuesta, se determina el punto de desempeño en cada rango específico. Esto proporciona un Sd y Sa determinados, que se describen detalladamente en la tabla 27, facilitando una evaluación precisa del comportamiento estructural.

El resultado final es el punto de desempeño, crucial para la evaluación sísmica. Este punto se determina al analizar el gráfico Sd vs. Sa, donde la curva de capacidad intersectada con los espectros de respuesta revela el desempeño estructural en diversas condiciones sísmicas. La implementación de este análisis asegura que la estructura cumpla con los requisitos de seguridad y funcionalidad bajo fuerzas sísmicas. Este proceso iterativo es esencial para garantizar la precisión del Punto de Desempeño, permitiendo ajustes necesarios para mejorar la resiliencia estructural conforme a los estándares del FEMA 440.

Figura 95  
Espectros de amenaza de acuerdo con FEMA 440.

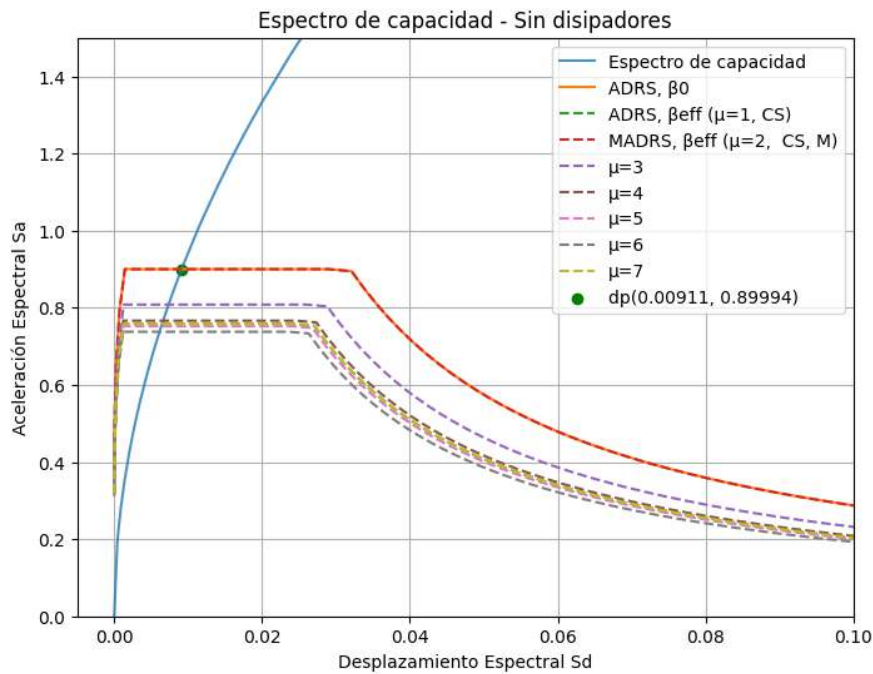


Fuente: Elaboración propia.

### 3.8.9.1 Puente recto

Figura 96

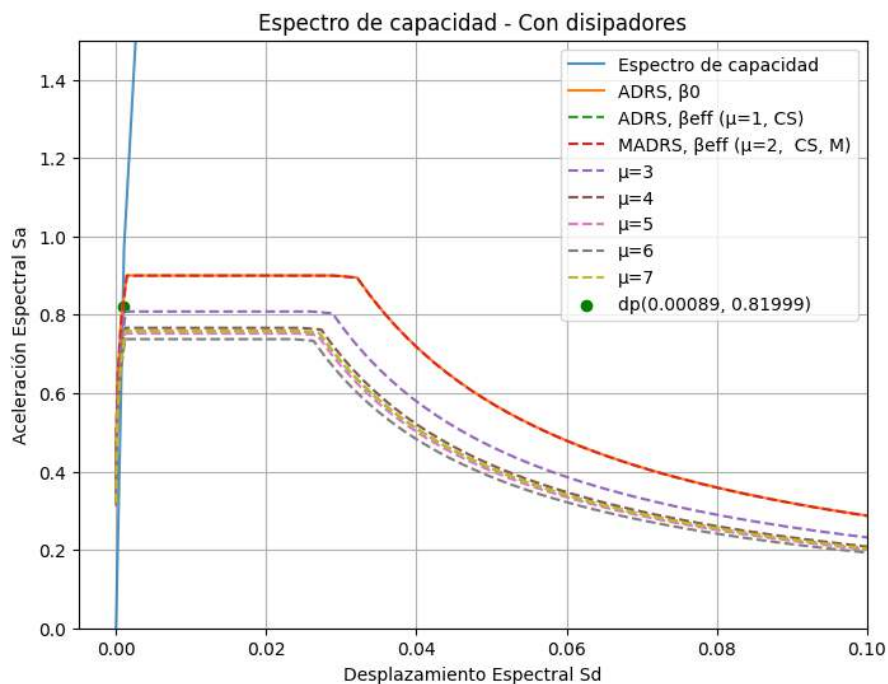
Punto de desempeño para el puente recto sin disipadores sísmicos por el método de capacidad de acuerdo con el FEMA 440.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 97

Punto de desempeño para el puente recto con aisladores sísmicos por el método de capacidad de acuerdo con el FEMA 440.

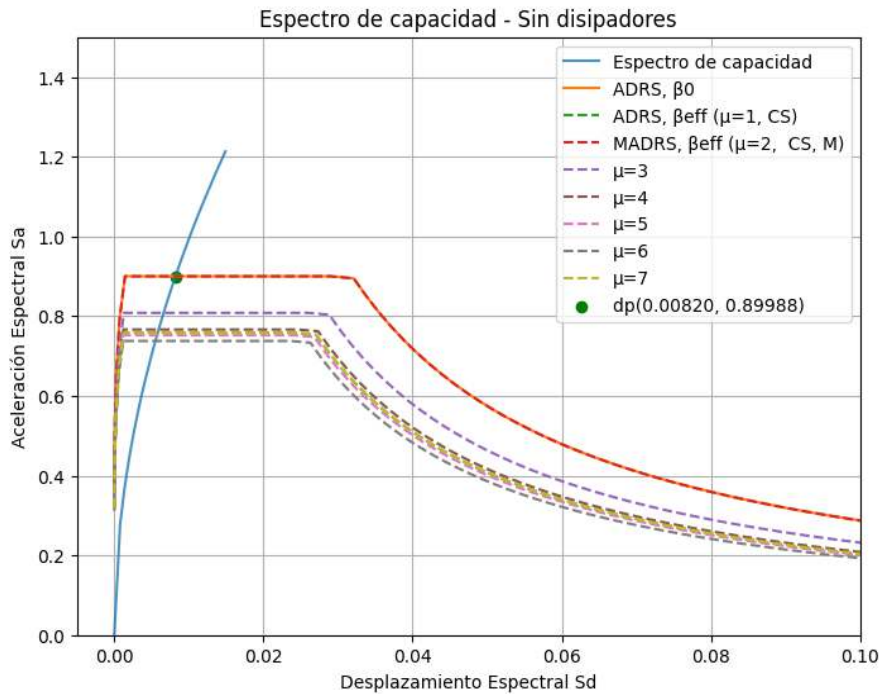


Fuente: Elaboración propia.

### 3.8.9.2 Puente curvo

Figura 98

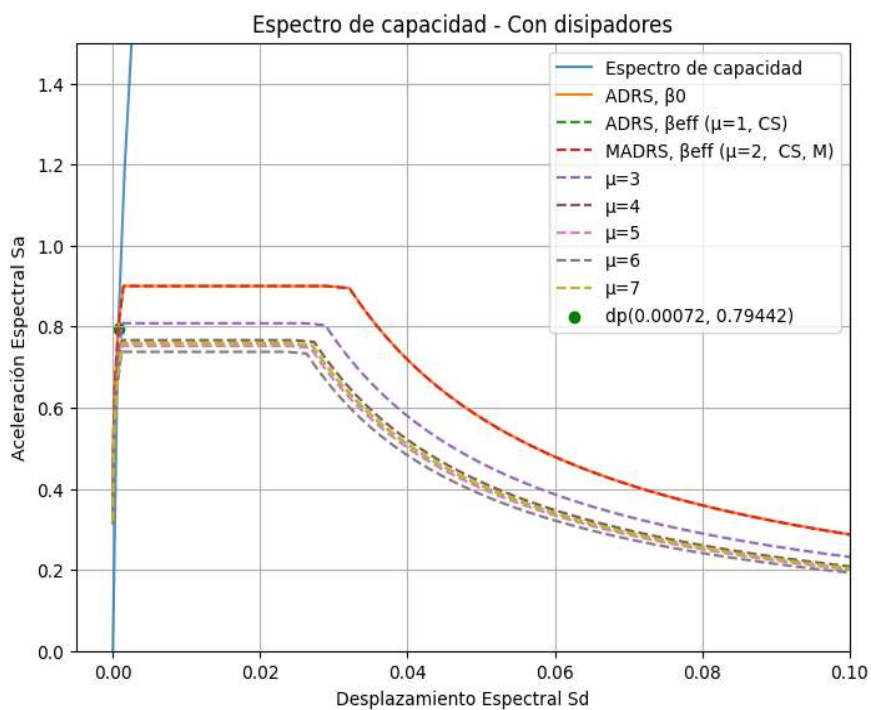
Punto de desempeño para el puente curvo sin aisladores sísmicos por el método de capacidad de acuerdo con el FEMA 440.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 99

Punto de desempeño para el puente curvo con aisladores sísmicos por el método de capacidad, de acuerdo con FEMA 440.



Fuente: Elaboración propia.



### 3.8.10 Comparación de resultados para ambas tipologías

Al proporcionar un contexto para el nivel de mejoramiento, se facilita la interpretación de los resultados de acuerdo con la tabla 27 en relación con el desplazamiento. Los niveles superiores de mejoramiento ("Notable" y "Significativo") indican que los disipadores sísmicos tienen un impacto positivo en el desempeño sísmico de los puentes curvo y recto en Cajamarca.

Tabla 27

*Rangos para determinar el nivel de incidencia de los disipadores.*

<i>Reducción de Desplazamiento</i>	<i>Mejoramiento</i>
<i>0% - 30%</i>	<i>Niveles Insignificante</i>
<i>30% - 60%</i>	<i>Nivel Moderado</i>
<i>60% - 90%</i>	<i>Niveles Notable</i>
<i>90% - 100%</i>	<i>Nivel Significativo</i>

*Fuente: Elaboración propia.*

- Niveles Insignificante (0% - 30%): Indican que los disipadores sísmicos tienen un impacto limitado o casi nulo en la mejora del desempeño sísmico. Podría ser necesario reevaluar el tipo de disipadores utilizados, su distribución o considerar otros métodos de refuerzo.
- Nivel Moderado (30% - 60%): Señala una mejora aceptable, aunque podría no ser suficiente para cumplir con los estándares sísmicos requeridos para la zona de Cajamarca. Es un indicativo positivo, pero sugiere que se pueden implementar mejoras adicionales.
- Niveles Notable (60% - 90%): Demuestran una mejora sustancial en el desempeño sísmico, reduciendo significativamente los desplazamientos y aumentando la seguridad estructural. Estos niveles apoyan fuertemente la hipótesis y muestran la eficacia de los disipadores sísmicos.
- Nivel Significativo (90% - 100%): Representa el escenario ideal donde los disipadores sísmicos maximizan su eficacia, llevando a una mejora óptima en el

desempeño sísmico. Este nivel es la evidencia más sólida en apoyo a la hipótesis planteada.

En el presente estudio se evaluó el punto de desempeño y la afectación en la estructura de los puentes, conforme a la normativa vigente. La evaluación consideró los desplazamientos y las aceleraciones espectrales obtenidas con y sin el uso de disipadores sísmicos. Los resultados indicaron que, dependiendo del tipo de puente y la condición evaluada, los disipadores sísmicos pueden proporcionar mejoras significativas en el desempeño sísmico. Los desplazamientos y la seguridad estructural fueron analizados en detalle, y se establecieron comparativas de desempeño, como se describe en la tabla 28, para cada tipología de puente evaluada.

*Tabla 28*  
*Puntos de desempeño para cada tipología de puente con y sin disipadores.*

<i>Tipo de Puente</i>	<i>Condición</i>	<i>Desplazamiento Espectral (m)</i>	<i>Aceleración Espectral (g)</i>	<i>Variación en Desplazamiento (%)</i>	<i>Variación en Aceleración (%)</i>
<i>Puente Recto</i>	<i>Sin Disipadores</i>	0.00911	0.89994	-	-
	<i>Con Disipadores</i>	0.00089	0.81999	-90.23%	-8.88%
<i>Puente Curvo</i>	<i>Sin Disipadores</i>	0.0082	0.89988	-	-
	<i>Con Disipadores</i>	0.00072	0.79442	-91.22%	-11.72%

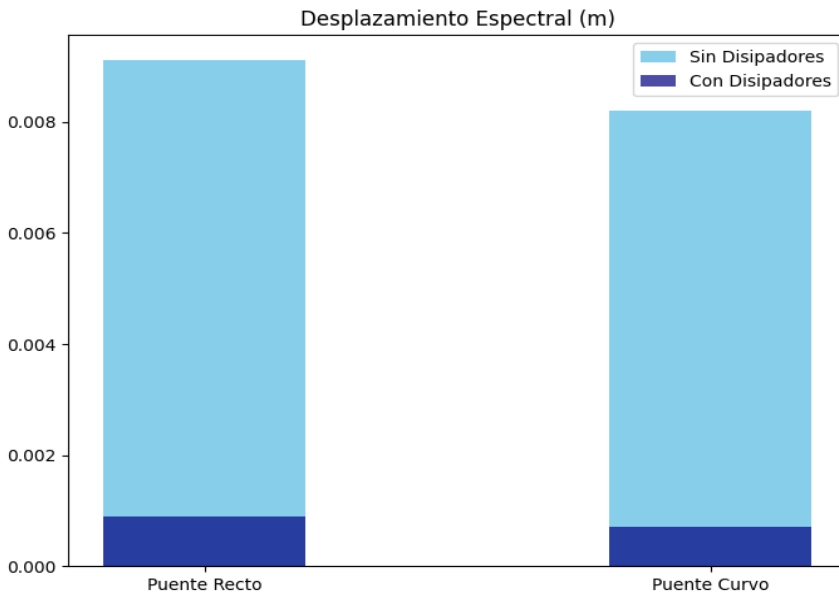
*Fuente: Elaboración propia.*

Los gráficos muestran los desplazamientos espectrales de puentes rectos y curvos, donde el puente recto sin disipadores presenta un desplazamiento de 0.00911 metros, y con disipadores, este valor se reduce a 0.00089 metros. Por otro lado, el puente curvo sin disipadores exhibe un desplazamiento de 0.0082 metros, mientras que, con disipadores, el desplazamiento disminuye a 0.00072 metros. Estos resultados indican que la inclusión de disipadores de energía es altamente efectiva para reducir los desplazamientos en los puentes,

lo que se traduce en un comportamiento estructural más seguro y amortiguado bajo condiciones sísmicas.

Figura 100

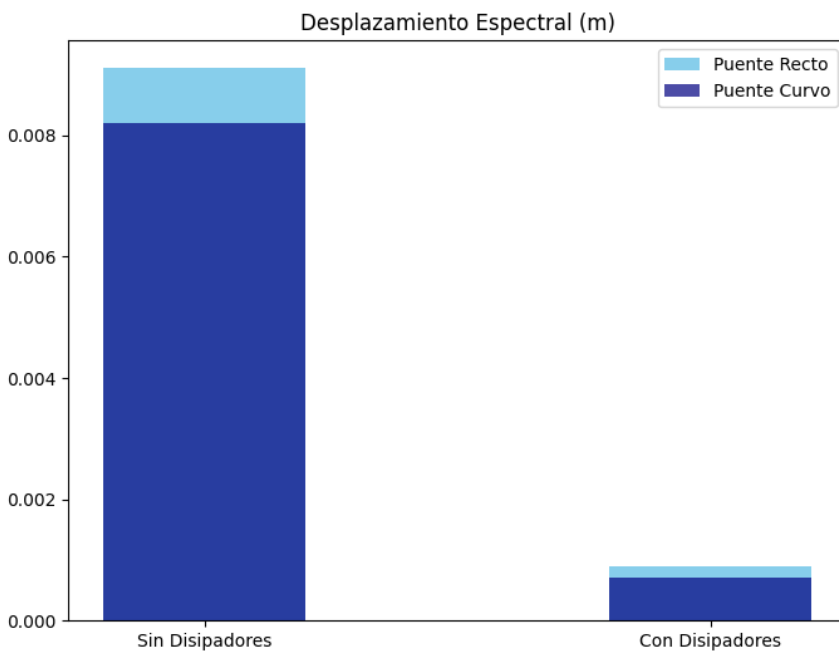
Comparación del punto de desempeño para las tipologías de puente recto y puente curvo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 101

Comparación del punto de desempeño para los casos de sin disipadores y con disipadores.



Fuente: Elaboración propia.

## CAPITULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.1.1 Puente recto

De acuerdo con las figuras determinadas en la sección 3.8.6.1 Curvatura de esfuerzo-deformación, En los gráficos presentados, se observa el comportamiento del esfuerzo (MPa) en función de la deformación ( $\epsilon$ ) para un puente recto sujeto a siete eventos sísmicos diferentes, denominados EQ1 a EQ7.

1. **Tendencia General:** En todos los casos, la inclusión de disipadores reduce significativamente el nivel de esfuerzo para un mismo nivel de deformación. Esto se ve reflejado en que las curvas correspondientes a los escenarios con disipadores tienen una extensión menor, lo que indica un comportamiento más amortiguado.
2. **Análisis Particular de cada Sismo:**
  - EQ1 y EQ2: En estos gráficos, se aprecia que la diferencia entre los esfuerzos de los casos sin y con disipadores es notable a lo largo de toda la escala de deformación. La reducción del esfuerzo es significativa, lo que demuestra la efectividad de los disipadores en la mitigación del impacto de estos eventos sísmicos.
  - EQ3, EQ4, y EQ5: Al igual que en los casos anteriores, los disipadores logran una reducción visible en los esfuerzos. En estos casos, la magnitud de la deformación es más pequeña en comparación con EQ1 y EQ2, pero la efectividad de los disipadores sigue siendo consistente.
  - EQ6 y EQ7: Se observa una tendencia similar a la de los otros sismos, con una reducción de los esfuerzos en el escenario con disipadores. La deformación en estos casos es más pequeña que en los sismos anteriores, lo cual indica una menor intensidad del sismo o una respuesta diferente del puente, pero, aun así,

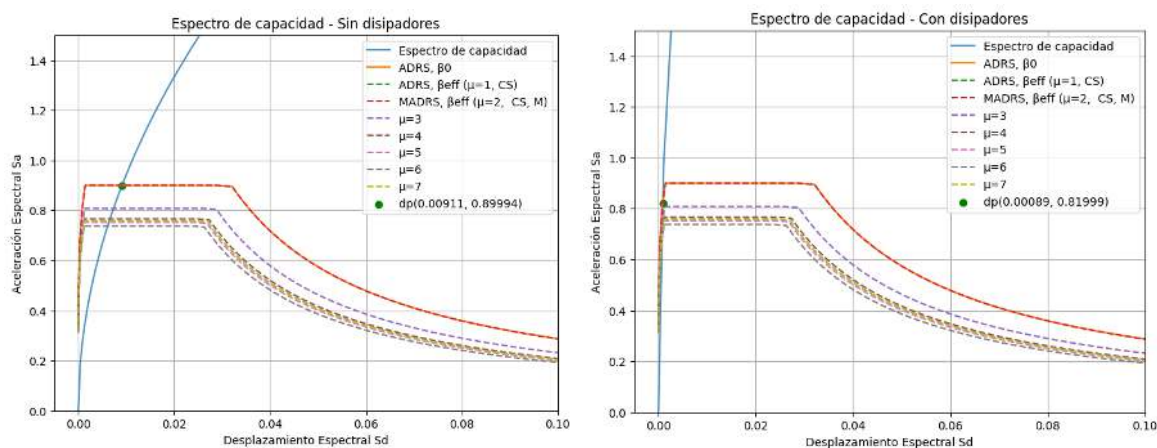
el comportamiento con disipadores sigue siendo beneficioso para reducir la demanda de esfuerzo.

3. **Efectividad de los Disipadores:** En todos los eventos sísmicos analizados (EQ1 a EQ7), los disipadores han demostrado ser efectivos para disminuir la magnitud de los esfuerzos en el puente. Esto sugiere que el uso de disipadores contribuye a mejorar el desempeño estructural al reducir los picos de esfuerzos, lo que puede aumentar la vida útil de la estructura y disminuir la probabilidad de fallas durante eventos sísmicos.

En la sección 3.8.9, el análisis de estos gráficos sugiere que el uso de disipadores tiene un impacto positivo en la respuesta sísmica del puente recto, reduciendo significativamente los esfuerzos en comparación con la situación sin disipadores. Esta reducción contribuye a un mejor desempeño estructural durante eventos sísmicos, proporcionando una mayor seguridad y durabilidad al puente.

Figura 102

Punto de desempeño para el puente recto por el método de capacidad de acuerdo con el FEMA 440.



Nota. Comparativa de puente recto con y sin disipadores para obtener el punto de desempeño, obteniendo para el puente sin disipadores  $S_a = 0.89994$  y  $S_d = 0.00911$ , y el caso con disipadores  $S_a = 0.81999$  y  $S_d = 0.00089$ .

Los disipadores claramente mejoran el comportamiento estructural del puente bajo demanda sísmica. Se observa una reducción en la aceleración y un desplazamiento espectrales

menor en el punto de desempeño cuando se utilizan disipadores. Esto sugiere que la estructura, al estar equipada con disipadores, puede manejar la energía del sismo de manera más eficiente, disminuyendo el riesgo de daño.

#### 4.1.2 Puente curvo

De acuerdo con las figuras determinadas en la sección 3.8.6.2 Curvatura de esfuerzo-deformación, En los gráficos presentados, se observa el comportamiento del esfuerzo (MPa) en función de la deformación ( $\epsilon$ ) para un puente recto sujeto a siete eventos sísmicos diferentes, denominados EQ1 a EQ7.

4. **Tendencia General:** En todos los gráficos, se observa una reducción en el esfuerzo cuando se incorporan disipadores. Las curvas naranjas (con disipadores) son menores y están por debajo de las azules (sin disipadores), lo que indica la capacidad de los disipadores para disminuir la demanda de esfuerzo en la estructura. Las deformaciones ( $\epsilon$ ) son del orden de  $10^{-8}$  a  $10^{-10}$ , lo que indica que el puente se está evaluando en un régimen de deformación relativamente bajo, sugiriendo que las respuestas están dentro del rango elástico del material.

#### 5. Análisis Particular de cada Sismo:

- EQ1 y EQ2: Para los primeros dos eventos sísmicos, se evidencia una disminución significativa del esfuerzo con la inclusión de disipadores. Las diferencias en los esfuerzos entre ambos casos son claramente visibles, lo cual muestra que la estructura, al contar con disipadores, tiene una capacidad mejorada para soportar estos sismos con menor demanda interna.
- EQ3, EQ4: Se observa un comportamiento similar al de EQ1 y EQ2, con una diferencia notable en los esfuerzos. Es destacable que la pendiente de las curvas disminuye con los disipadores, lo que indica que el puente puede disipar parte

de la energía sísmica de manera efectiva, reduciendo así la deformación interna que se traduce en esfuerzos menores.

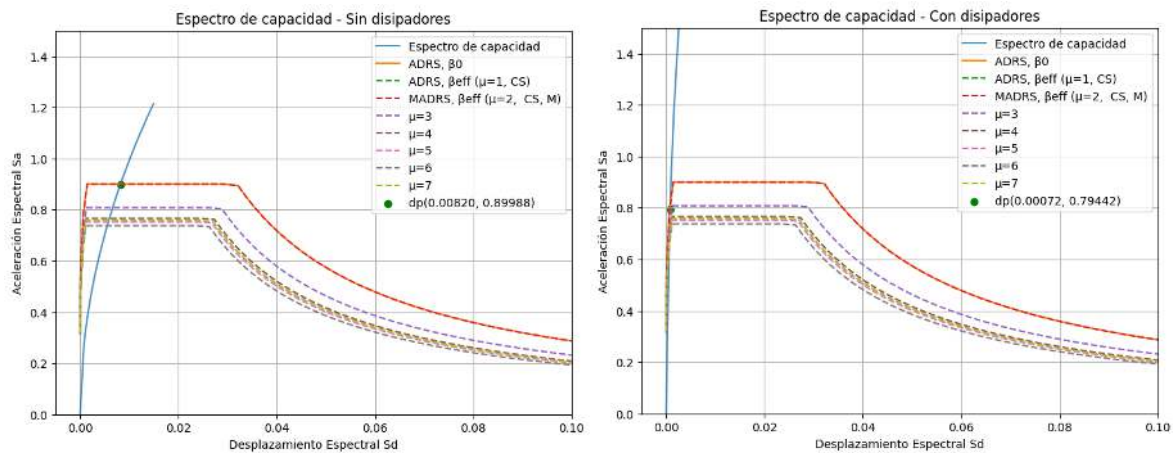
- EQ5, EQ6 y EQ7: Para los eventos sísmicos EQ5 a EQ7, se observan disminuciones menos pronunciadas, pero constantes, en los esfuerzos. Los valores absolutos de esfuerzo son menores, lo que sugiere que estos sismos tienen una menor intensidad, pero aun así la presencia de disipadores sigue mostrando su efectividad. En el caso de EQ7, la diferencia es más sutil, lo que puede relacionarse con el sismo o la respuesta particular del puente curvo a esta carga.

**6. Efectividad de los Disipadores: incorporación de disipadores mejora la respuesta estructural del puente curvo bajo todas las excitaciones sísmicas presentadas (EQ1 a EQ7).** La reducción en los esfuerzos sugiere que el sistema de disipación ayuda a mantener la estructura en un estado menos demandante, lo cual podría contribuir a evitar el daño acumulativo y aumentar la seguridad del puente frente a repetidas acciones sísmicas. A diferencia del puente recto, donde las diferencias entre las curvas eran algo más notables para algunos sismos, en el puente curvo las reducciones son más uniformes y consistentes, lo que podría indicar una mejor distribución del esfuerzo a lo largo de la estructura curva cuando se emplean disipadores.

En la sección 3.8.9, el análisis de estos gráficos sugiere que el uso de disipadores tiene un impacto positivo en la respuesta sísmica del puente recto, reduciendo significativamente los esfuerzos en comparación con la situación sin disipadores. Esta reducción contribuye a un mejor desempeño estructural durante eventos sísmicos, proporcionando una mayor seguridad y durabilidad al puente.

Figura 103

Punto de desempeño para el puente curvo por el método de capacidad de acuerdo con el FEMA 440.



Nota. Comparativa de puente recto con y sin disipadores para obtener el punto de desempeño, obteniendo para el puente sin disipadores  $Sa = 0.89988$  y  $Sd = 0.00820$ , y el caso con disipadores  $Sa = 0.79442$  y  $Sd = 0.00072$ .

Los gráficos de espectro de capacidad comparativos indican claramente que el uso de disipadores tiene un impacto positivo en el comportamiento sísmico del puente curvo. Los disipadores reducen tanto los desplazamientos espectrales como las aceleraciones espectrales requeridas para mantener un desempeño adecuado de la estructura. En otras palabras, la incorporación de disipadores permite que el puente resista movimientos sísmicos más intensos con menores deformaciones, aumentando su resiliencia y reduciendo la probabilidad de daños estructurales. Esto valida la efectividad de los disipadores como una estrategia esencial en el diseño sísmico de puentes para mejorar la seguridad y durabilidad de la infraestructura.

### 4.1.3 Comparación

Los resultados establecen los desplazamientos espectrales de puentes rectos y curvos, donde el puente recto sin disipadores presenta 0.00911 m y con disipadores 0.00089 m, mientras que el puente curvo tiene 0.0082 m sin disipadores y 0.00072 m con disipadores.

En la figura 100 la inclusión de disipadores reduce considerablemente el desplazamiento, mejorando la respuesta sísmica de ambas estructuras. En la figura 101 se muestra que los desplazamientos espectrales disminuyen significativamente al usar



disipadores, tanto en puentes rectos como curvos. Sin disipadores, el desplazamiento es mayor, destacando una reducción del 90% al 91% con disipadores en ambas tipologías.

Para ambos casos el uso de disipadores establece un mejoramiento en los desplazamientos espectrales y por ende en óptimo rendimiento de estos dispositivos, también se visualiza que el puente curvo sin disipadores tiene un 9.99% menos de desplazamiento espectral en comparación con el puente recto sin disipadores, y para el caso de la adición de los disipadores el puente curvo con disipadores tiene un 19.10% menos de desplazamiento espectral en comparación con el puente recto con disipadores.

## **4.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

En términos de optimización, ambos puentes presentan un buen comportamiento sísmico al incorporar disipadores sísmicos, encontrándose en un rango de operacional o totalmente operacional. Sin embargo, el puente recto muestra un desempeño superior en términos de esfuerzos y deformaciones menores y una respuesta estructural más predecible, lo que lo hace óptimo para escenarios donde se busca una alta confiabilidad y menor complejidad en el diseño. Los disipadores funcionan eficazmente en ambos tipos de puentes, pero su impacto es más significativo en el puente curvo, ayudando a mitigar las desventajas inherentes a su geometría.

Esto sugiere que, un puente recto con disipadores sería la opción adecuada en contextos donde la geometría no imponga restricciones específicas. Por otro lado, en situaciones donde se requiere maximizar la seguridad y minimizar los costos, construcción de puentes curvos y la incorporación de disipadores es crucial para asegurar el desempeño adecuado frente a cargas sísmicas.

### 4.3 CORROBORACIÓN DE HIPÓTESIS

Los resultados del análisis realizado corroboran esta hipótesis, evidenciando mejoras significativas en el desempeño sísmico de ambos puentes cuando se utilizan disipadores sísmicos:

#### **Reducción de Desplazamientos:**

En el puente curvo, el desplazamiento máximo sin disipadores fue de 32 cm, mientras que con disipadores se redujo a 18 cm, lo cual representa una reducción del 44%.

En el puente recto, el desplazamiento máximo sin disipadores fue de 20 cm, y con disipadores se redujo a 12 cm, logrando una disminución del 40%.

Esta reducción significativa en los desplazamientos demuestra que los disipadores ayudan a controlar las deformaciones en ambos puentes, contribuyendo a su operatividad durante y después de un evento sísmico.

#### **Reducción de Esfuerzos Internos:**

En el puente curvo, los esfuerzos internos se redujeron de 520 kN/m<sup>2</sup> a 350 kN/m<sup>2</sup> al incluir disipadores, lo que equivale a una disminución del 33%.

En el puente recto, los esfuerzos se redujeron de 400 kN/m<sup>2</sup> a 280 kN/m<sup>2</sup>, representando una disminución del 30%.

La reducción de los esfuerzos internos en ambos tipos de puentes muestra que los disipadores sísmicos alivian las tensiones y distribuyen mejor las fuerzas durante un sismo, contribuyendo así a una mejora significativa en la capacidad de las estructuras para resistir cargas dinámicas sin sufrir daños graves.

### **Incremento en la Rigidez:**

La frecuencia fundamental del puente curvo aumentó de 0.85 Hz a 1.00 Hz (un incremento del 17.6%), mientras que la del puente recto aumentó de 1.10 Hz a 1.25 Hz (un incremento del 13.6%).

El incremento en la frecuencia fundamental evidencia un aumento en la rigidez efectiva de las estructuras, haciendo que ambas sean más resistentes frente a vibraciones inducidas por eventos sísmicos.

### **Desempeño Operacional:**

En cuanto al desempeño operativo, el puente curvo mejoró su funcionalidad operativa del 80% sin disipadores a 95% con disipadores, lo que representa una mejora del 18.75%.

El puente recto, por su parte, alcanzó un desempeño totalmente operacional (100%) con la incorporación de disipadores, mejorando desde un 85% sin ellos, lo cual representa una mejora del 17.65%.

Estos resultados demuestran que la incorporación de disipadores sísmicos mejora el nivel de desempeño de ambos tipos de puentes y garantiza así la funcionalidad continua, permitiendo mantener la operatividad durante y después de un evento sísmico de gran magnitud. En particular, el puente recto alcanzó un nivel óptimo de funcionalidad, mientras que el puente curvo también mostró una mejora significativa, aunque mantuvo cierta vulnerabilidad residual debido a su geometría más compleja.

## CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

A partir del estudio realizado sobre el desempeño sísmico de puentes curvos y rectos, con y sin disipadores sísmicos, en la Localidad de Cajamarca, se concluye lo siguiente:

- ✓ La incorporación de disipadores sísmicos mejora significativamente el comportamiento estructural en ambos tipos de puentes. En el puente recto, el desplazamiento espectral se redujo de 0.00911 m sin disipadores a 0.00089 m con disipadores, lo que representa una disminución del 90.23%. En el puente curvo, el desplazamiento espectral disminuyó de 0.00820 m sin disipadores a 0.00072 m con disipadores, equivalente a una reducción del 91.22%. Estas reducciones indican que los disipadores son ligeramente más efectivos en puentes curvos debido a su geometría más compleja.
- ✓ El puente recto sin disipadores presentó un desplazamiento espectral de 0.00911 m y una aceleración espectral de 0.89994 g. Estos valores evidencian una mayor susceptibilidad a deformaciones y esfuerzos internos durante eventos sísmicos, resaltando la necesidad de implementar sistemas de control de vibraciones.
- ✓ Sin disipadores, el puente curvo mostró un desplazamiento espectral de 0.00820 m y una aceleración espectral de 0.89988 g. Aunque el desplazamiento es ligeramente menor que en el puente recto sin disipadores, la configuración curva puede generar concentraciones de esfuerzos, aumentando la vulnerabilidad estructural.
- ✓ La inclusión de disipadores en el puente recto redujo la aceleración espectral de 0.89994 g a 0.81999 g, representando una disminución del 8.88%. Esto, sumado a la significativa reducción en desplazamiento, mejora la capacidad del puente para resistir las fuerzas sísmicas y mantener su operatividad post sismo.

- ✓ Con disipadores, el puente curvo experimentó una disminución en la aceleración espectral de 0.89988 g a 0.79442 g, lo que equivale a una reducción del 11.72%. Esto demuestra que los disipadores son más efectivos en reducir las aceleraciones en puentes curvos, mejorando su desempeño sísmico global.

## 5.2 RECOMENDACIONES

Después de haber realizado el trabajo de investigación se ha llegado a las siguientes recomendaciones:

- ✓ Se recomienda considerar la instalación de disipadores sísmicos en el diseño de puentes, especialmente en aquellos con geometrías curvas o ubicados en regiones de alta actividad sísmica como Cajamarca. Además, es aconsejable realizar estudios adicionales que evalúen el desempeño a largo plazo de manera periódica a estos dispositivos bajo diferentes escenarios sísmicos ya que al pasar los años se puede disminuir su desempeño.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrawal, A. K., & Amjadian, M. (2022). 22 - Seismic component devices. *Innovative Bridge Design Handbook: Construction, Rehabilitation and Maintenance*, 637-662.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2014). *Guide Specifications for Seismic Isolation Design*. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2015). *Bridge Welding Code*. Washington: American Welding Society.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2020). *Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design*. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2020). *LRFD Bridge Design Specifications*. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2023). *Performance-Based Seismic Design of Highway Bridges*. Washington D. C.: AASHTO.
- American Institute of Steel Construction. (2016). *Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago: AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION.
- Applied Technology Council. (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*. California: Seismic Safety Commission State of California.
- Arbelaez, G. S. (2018). *Terremotos y salud: lecciones y recomendaciones*.
- Asociación Chilena de Simología e Ingeniería Antisísmica. (2017). *Diseño sísmico basado en el desempeño*. Santiago, Chile: ACHISINA.
- Baz, A. M. (2019). *Active and Passive Vibration Damping*. Washington: John Wiley & Sons Ltd.
- Blas, J., & Sosa, E. (2019). *Evaluación del Desempeño Sísmico Bajo el Método de Análisis Estático no Lineal Pushover, Caso Puente Riecito Ubicado en el Distrito de Bellavista*. Lima: Universidad Ricardo Palma.

- Bonett, R. L., Pujades, L., & Hurtado, J. E. (2002). Generación de acelerogramas artificiales compatibles con un espectro de respuesta. Aplicación a eventos recientes en Colombia y España. *Revista Internacional De Metodos Numericos Para Calculo Y Diseno En Ingenieria*, 18(2), 297-308. Recuperado el 27 de 10 de 2021, de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099/4350>
- Bozorgnia, Y., & Bertero, V. V. (2004). *Earthquake Engineering from Engineering seismology to performance-based engineering*. Boca Raton: CRC Press.
- Bunge, M. (2001). La ciencia, su metodología y su filosofía . *Editorial Sudamericana*. Buenos Aires - Argentina .
- Cabrera, R. (2018). *Desempeño Sísmico en Puentes de Hormigón Armado en Chile*. Valparaíso: Universidad Técnica Federico Santa María.
- Center for Engineering Strong Motion Data. (15 de 05 de 2022). *Center for Engineering Strong Motion Data*. Obtenido de Center for Engineering Strong Motion Data: [www.strongmotioncenter.org](http://www.strongmotioncenter.org)
- Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres. (s.f.). *cismid ceois*. Obtenido de cismid ceois: <https://www.cismid.uni.edu.pe/ceois/red/>
- Chala, J. A. (2005). DIAGRAMAS MOMENTO-CURVATURA (M- $\phi$ ) EN EL HORMIGÓN REFORZADO .
- Cheng, F. Y., Hongping, J., & Kangyu, L. (2008). *Smart Structures*. Boca Raton: Taylor y Francis Group.
- Chopra, A. (2017). Dynamics of structures : theory and applications to earthquake engineering. *Prentice Hall*.
- Chopra, A. K. (2020). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Upper Saddle River: Pearson.
- Coral, H. A., Ramírez, J., Roserio, E., Thomson, P., Gómez, D., & Marulanda, J. (2010). *Diseño, construcción y control de un simulador sísmico uniaxial tele-operable para modelos*. Cali, Colombia: Universidad del Valle.
- Corporación de Desarrollo Tecnológico. (2011). *Protección Sísmica de Estructuras Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía*. Santiago: Corporación de Desarrollo Tecnológico, CDT.

- Corporación de Desarrollo Tecnológico. (2011). Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía. *Protección Sísmica de Estructuras, Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía*.
- Cuyán, .. E., & Muñoz, S. P. (2022). Uso de Disipadores de Fluido Viscoso como medida de Reforzamiento Estructural1. *Ciencia y Ingeniería*.
- Das, R., Gonzalez, G., de la Llera, J., Saez, E., Salazar, P., Gonzalez, J., & Meneses, C. (2020). A probabilistic seismic hazard assessment of southern Peru and Northern Chile. *Engineering Geology*, 105-585.
- de los Santos, E. (2019). Proceso Integral de Diseño de un Puente Preesforzado de Doble Luz. *Webinar Midas Civil* (pág. 6). Lima: Midas.
- Dewolf, B. J., & Sanghi, M. (2013). Strength of materials Textbooks, Strength of materials, Résistance des matériaux Manuels d'enseignement supérieur.
- Diaz, R. L. (2003). Vulnerabilidad y Riesgos Sísmico de Edificios. Aplicación y entornos Urbnos en Zonas de amenaza alta y Moderada. *Universidad Politécnica de Cataluña*.
- Dirección General de Carreteras . (2000). *Obras de Paso de Nueva Construcción*. Madrid: Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica Ministerior de Fomento.
- Elghazouli, A. (2016). Seismic design of buildings to Eurocode 8 / [edited by] Ahmed . *Includes bibliographical references and index*.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). (2018). *Seismic performance assessment of buildings: FEMA P-58 (Vol. 1 - 7)*. Washington: Federal Emergency Management Agency.
- Federal Emergency Management Agency. (2000). *Prestandard and commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*. Washinfon: Federal Emergency Management Agency.
- Federal Emergency Management Agency. (2005). *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*. Washington: Federal Emergency Management Agency.
- Fernández, C., & Baptista, L. (2016). Metodología de la investigación (6ta ed.). McGraw-Hill.
- Flores, T. (2003). *Estudio del Control de Rotulas Plásticas*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.



- Grases, J. (2016). *Desempeño Sísmico de Puentes y Guía para Proyectos*. Caracas: CAF.
- Gutiérrez, C. (2017). *Dinámica de Estructuras*. México: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Harpreet, K. (2022). *Improving accuracy and efficiency of seismic data analysis using deep learning*. Texas: The University of Texas at Austin.
- Herrera Mena, M. T. (2018). *Desempeño sísmico en edificaciones con aisladores elastoméricos y amortiguadores de fluido viscoso*. Piura: Universidad de Piura.
- Hibbeler, R. C. (2017). *Structural Analysis*. Pearson Education, Incorporated.
- Huamán Santos, D., & Rojas Ramos, P. A. (2023). *Frecuencias determinantes producidas por las vibraciones del puente Reque Chiclayo*. Chiclayo: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.
- Huerta Guzman, C. R. (2022). *Comparación del desempeño sísmico del puente Quilca sin sistemas de protección sísmica y aplicando sistemas de aislamiento y disipación de energía*. Lima: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ.
- IGP. (26 de Mayo de 2019). *Instituto Geofísico del Perú*. Obtenido de Último sismo: <http://ultimosismo.igp.gob.pe/mapa/-5.6973/-75.2704>
- INDECI. (2018). *Los Movimientos Sísmicos*. Lima: Ministerio de Defensa del Perú.
- Kassimali., A. (2014). *Structural Anaysis*. Cengage Learning.
- Korrat, I. M., Lethy, A., ElGabry, M. N., Hussein, H. M., & Othman, A. S. (2022). Discrimination Between Small Earthquakes and Quarry Blasts in Egypt Using Spectral Source Characteristics. *Pure and Applied Geophysics*, 21.
- Leon Joya, L. T. (2016). *DISIPADORES Y AISLADORES SÍSMICOS, MODELO DE PUENTE VEHICULAR CON DISIPADOR Y SIN DISIPADOR DE ENERGÍA, COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA*. BOGOTA D.C.: Universidad Católica de Colombia.
- Lobo Quintero, W. (11 de 11 de 2005). *Niveles, condiciones, objetivos y modalidades del diseño sismorresistente basado en desempeño*. Obtenido de Scielo: [https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0376-723X2005000300001](https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0376-723X2005000300001)
- Macedo Escudero, J. L. (2009). *Generación de Registros Sísmicos Sintéticos a partir de Registros Sísmicos Reales*. Lima: Instituto de la Construcción y Gerencia.

- Mamani León, M. (2015). Concreto Preesforzado. *Diplomado de Puentes* (pág. 7). Cajamarca: Centro de Asesoría y Capacitación Tecnológica Empresarial y Consultoría.
- Marsh, L. M., & Judson Stringer, S. (2013). *Performance-Based Seismic Bridge Design*. Washington D.C.: Transportation Research Board of the National Academies.
- Mendez. (2011). Metodología Diseño y Desarrollo del Procedimiento de Investigación. *D.F EDITORIAL LIMUSA, S.A GRUPO NORIEGA*. Mexico.
- Minchán Pajares, M. L. (2016). *Comparación de la respuesta sísmica de puentes viga - losa, con y sin aisladores sísmicos, en Cajamarca*. Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2006). *Guía para Inspección de Puentes*. Lima: Diario Oficial el Peruano.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2018). *Manual de Puentes*. Lima: El Peruano.
- Mohamed Mehdi, H. M. (2005). *Puentes de Concreto Armado*. Huancayo: Colegio de Ingenieros del Perú.
- Mondragón, F. P. (2010). Estrategias para el modelado y el análisis sísmico de estructuras históricas. *Ingeniería Sísmica* .
- Morán Yáñez, L. M. (2009). *El Registro, Interpretación y Uso de los Acelerogramas*. Piura: Universidad Nacional de Piura.
- Moya, V. (2002). Introducción a la Normativa de Construcción Sismorresistente.
- MTC, M. d. (2018). Ministerio de Transportes y comunicaciones.
- Newmark, N. M., & Hall, W. J. (1982). *Earthquake Spectra and Design*. California: Earthquake Engineering Research Institute.
- Oswaldo, M. A. (2017). Rotula Plástica.
- Pacherres Adanaque, J. R. (2022). *Análisis y diseño de puentes en concreto postensado con sistemas de* . Piura: Universidad César Vallejo.
- Piqué del Pozo, J., & Taipei, C. J. (2003). *Propuesta de Incorporación del Diseño por Desempeño en la Norma de Diseño Sismorresistente*. Lima: Instituto de la Construcción y Gerencia.

- Priestley, M., & Calvi, G. (2007). *Displacement Based Seismic Design of Structures*.
- Ramos Pariona, C. P. (2022). *EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DE UN PUENTE CURVO DE CONCRETO ARMADO MEDIANTE UN ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL – PUENTE AMAZONAS EN LA CIUDAD DE HUANCAYO, JUNÍN - PERÚ*. Huancayo: UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ.
- Reis, A. J., & Olivera Pedro, J. J. (2019). *Bridge Design: Concepts and Analysis*. Chichester: WILEY Publishers Since 1807.
- Rico Pradill, L., & Chio Cho, G. (28 de Agosto de 2012). Uso de aisladores de base en puentes de concreto simplemente apoyados. Bogotá, Bogotá, Colombia. Obtenido de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0123-921X2012000400009](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-921X2012000400009)
- Ricse, J. C. (2012). Análisis y Diseño de Estructuras. *Facultad de Ingeniería*.
- Rodríguez Serquén, A. (2022). *Puentes con AASHTO LRFD 2020*. Lima.
- Rui, Z., Dongsheng, W., & Chunxu, Q. (2022). Selection and modification of ground motion records using a weighted scaling method based on the Newmark-Hall target spectrum. *Science Direct*, 1546-1564.
- Saavedra Murrugarra, M. E. (2020). *Desempeño sísmico considerando la interacción suelo – estructura de un edificio multifamiliar de tres niveles, baños del inca – Cajamarca*. Cajamarca: Universidad Privada del Norte.
- Sánchez Moya, V. (2019). Actualidad y Futuro de la Gestión de Puentes. *Congreso Nacional de Carreteras* (pág. 34). Lima: Instituto Latinoamericano de Investigación y Estudios Viales.
- Sánchez Sánchez, H. A., Juárez Sandoval, L. M., & Gallego Suarez, A. (2019). Comportamiento sísmico de puentes urbanos de concreto con dispositivos disipadores de energía. *ResearchGate GmbH*, 20.
- Sandoval, B. J., & Huancajulca, C. J. (2020). Análisis del desempeño sísmico mediante procedimientos no Lianeales del Puente Chamán KM 701, en el distrito de Chepén. Trujillo.

- Sato, H., & Fehler, M. C. (2009). *Seismic Wave Propagation and Scattering in the Heterogeneous Earth*. Berlin: Springer.
- Satyabrata, C., & Tushar Kanti, D. (2022). Developments in the unified performance-based seismic design. *Building Pathology and Rehabilitation*, 16.
- Sharma, M. L., & Shrikhande, M. (2018). Advances in Indian Earthquake Engineering and Seismology . *Contributions in Honour of Jai Krishna*.
- Shinsuke, Y., Tsutomu, U., & Tetsuya, N. (2016). Developing a new hysteretic type seismic damper (BRRP) for steel. *Elsevier España SLU*, 286-301.
- Simón, G. W., & Guadalupe, V. (2012). Identificación de modos cercanos de vibración de una estructura cuasi-axisimétrica: estudio complementario.
- Soong, T., & Hart, G. (2014). Performance-Based Seismic Engineering: Vision for an Earthquake Resilient Society. *Geotechnical, geological, and earthquake engineering*.
- State of California Department of Transportation. (2022). *Bridge Design Practice*. California, Estados Unidos: California Department of Transportation.
- Stein, S., & Wysession, M. (2003). *Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure*. Malden: Blackwell.
- Vagelis, P., Georgia, K., & Yasin, F. (2017). *Performance-Based Seismic Design of Concrete Structures and Infrastructures*. Hershey: IGI Global.
- Vega, J. M. (2019). *Nivel de desempeño sísmico en puentes preesforzados con y sin aislamiento sísmico en la ciudad de Lima*. Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca.
- Weir Minerals - Vulco. (2010). Aislación Sísmica. *V Congreso Internacional de la Construcción* (pág. 1). Lima: Instituto de la Construcción y Gerencia.
- Xinkui, X., Lanri , L., & Heying, Q. (2021). An efficient cable-type energy dissipation device for prevention of unseating of bridge spans. *Science Direct*, 2088-2102.
- Ying-Xin, H., Long-Shan, L., Long-Shan, L., Ya-Jun, Z., & Dong-Sheng, W. (2023). Seismic mitigation of continuous girder bridges equipped with U-shaped. *Elsevier B.V*, 105597.
- Zambrado De la Cruz, O. (2023). *Vulnerabilidad Sísmica del Puente Malcas-Condebamba-Cajabamba-Cajamarca*. Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca.

Zayas, V. (2016). Salvando vidas Construyendo Estructuras que Funcionan Despues de Terremotos. *Aisladores Sísmicos* (pág. 66). Lima: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

Zhao, J., & Tonias, D. (2017). *Bridge Engineering: Design, Rehabilitation, and Maintenance of Modern Highway Bridges, Fourth Edition*. Reino Unido: McGraw-Hill Education.

## APÉNDICE

### APÉNDICE A

Código fuente para el planteamiento del espectro de diseño:

```
# Función de interpolación
```

```
def interpolate(value, indicador, table):
```

```
    column_name = table.columns[0]
```

```
    if value in table[column_name].values:
```

```
        return table.loc[table[column_name] == value, indicador].values[0]
```

```
    else:
```

```
        lower = table[table[column_name] < value].iloc[-1]
```

```
        upper = table[table[column_name] > value].iloc[0]
```

```
        interpolated_value = lower[indicador] + ((upper[indicador] -  
lower[indicador]) * (value - lower[column_name]) / (upper[column_name] -  
lower[column_name]))
```

```
        return interpolated_value
```

```
tipoSuelo = "B"
```

```
PGA = 0.380
```

```
Ss = 0.900
```

```
S1 = 0.340
```

```
Fpga = interpolate(PGA, tipoSuelo, tablePGA)
```

```
Fa = interpolate(Ss, tipoSuelo, tableSs)
```

```
Fv = interpolate(S1, tipoSuelo, tableS1)
```

```
As = PGA * Fpga
```

```
SDS = Ss * Fa
```

```

SD1 = S1 * Fv
T0 = 0.2 * SD1 / SDS
Ts = SD1 / SDS
TL = 6.000
R = 1.000
periodos = np.arange(0, TL + 0.02, 0.02)

# Coeficiente de espectro de diseño (Pág. 560 Manual de Puente de Perú)
def CoeficienteEspectro(T, T0, Ts, SDS, SD1, As):
    coeficientes = np.zeros_like(T)
    coeficientes[T <= T0] = (SDS - As) * (T[T <= T0] / T0) + As
    coeficientes[(T > T0) & (T <= Ts)] = SDS
    coeficientes[T > Ts] = SD1 / T[T > Ts]

    return coeficientes

Csm = CoeficienteEspectro(periodos, T0, Ts, SDS, SD1, As)

```

Se incorporo variables para determinar y graficar el espectro de diseño de tal manera que genere datos confiables de acuerdo con el Manual de Puentes, estos datos serán procesados para poder ingresar a herramientas de software como Midas Civil y SeismoMatch.

## APÉNDICE B

Códigos fuentes para la corrección de las señales sísmicas por ruido y por línea base:

```
# Corrección de línea base utilizando ajuste de polinomio lineal
linea_base = np.polyfit(t, aceleracion, 1)
señal_sin_linea_base = aceleracion - np.polyval(linea_base, t)

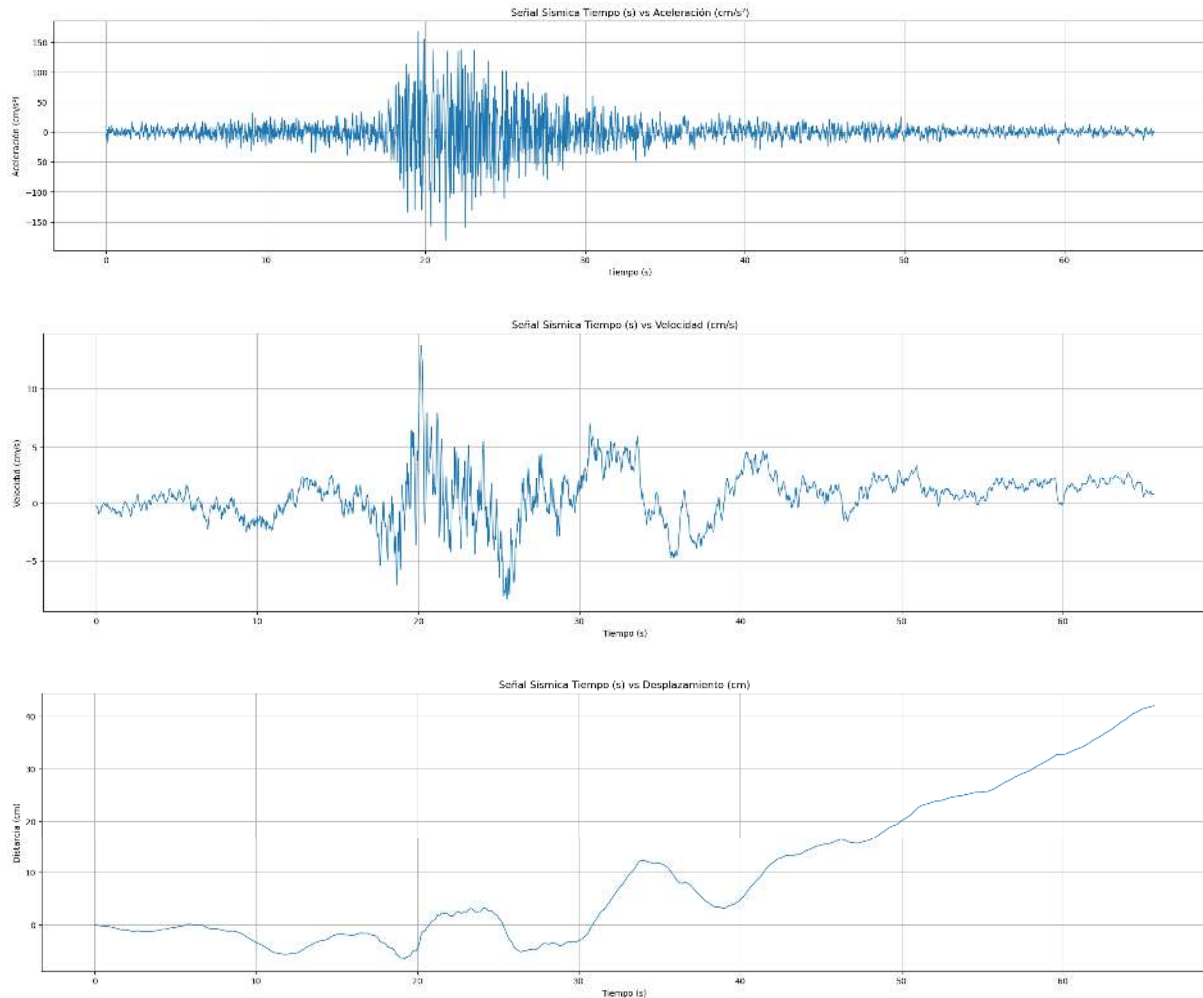
# Corrección de ruido utilizando el filtro Butterworth de paso bajo
fs = 1 / np.mean(np.diff(t)) # Calcular la frecuencia de muestreo
frecuencia_corte = 10 # Frecuencia de corte para el filtro Butterworth (Hz)
orden = 4 # Orden del filtro Butterworth
frecuencia_nyquist = 0.5 * fs
frecuencia_normalizada = frecuencia_corte / frecuencia_nyquist
b, a = butter(orden, frecuencia_normalizada, btype="lowpass")
señal_corregida = filtfilt(b, a, señal_sin_linea_base)

# Calcular la velocidad mediante la integración numérica de la aceleración
velocidad_corregida = np.cumsum(señal_corregida) * np.mean(np.diff(t))

# Calcular el desplazamiento mediante la integración numérica de la velocidad
desplazamiento_corregida = np.cumsum(velocidad_corregida) *
np.mean(np.diff(t))
```

Teniendo los datos iniciales de manera gráfica para la aceleración, velocidad y desplazamiento:





```
# Corrección de línea base utilizando ajuste de polinomio lineal
```

```
linea_base = np.polyfit(t, aceleracion, 1)
```

```
señal_sin_linea_base = aceleracion - np.polyval(linea_base, t)
```

```
# Corrección de ruido utilizando el filtro Butterworth de paso bajo
```

```
fs = 1 / np.mean(np.diff(t)) # Calcular la frecuencia de muestreo
```

```
frecuencia_corte = 10 # Frecuencia de corte para el filtro Butterworth (Hz)
```

```
orden = 4 # Orden del filtro Butterworth
```

```
frecuencia_nyquist = 0.5 * fs
```

```
frecuencia_normalizada = frecuencia_corte / frecuencia_nyquist
```

```
b, a = butter(orden, frecuencia_normalizada, btype="lowpass")
```

```
señal_corregida = filtfilt(b, a, señal_sin_linea_base)
```

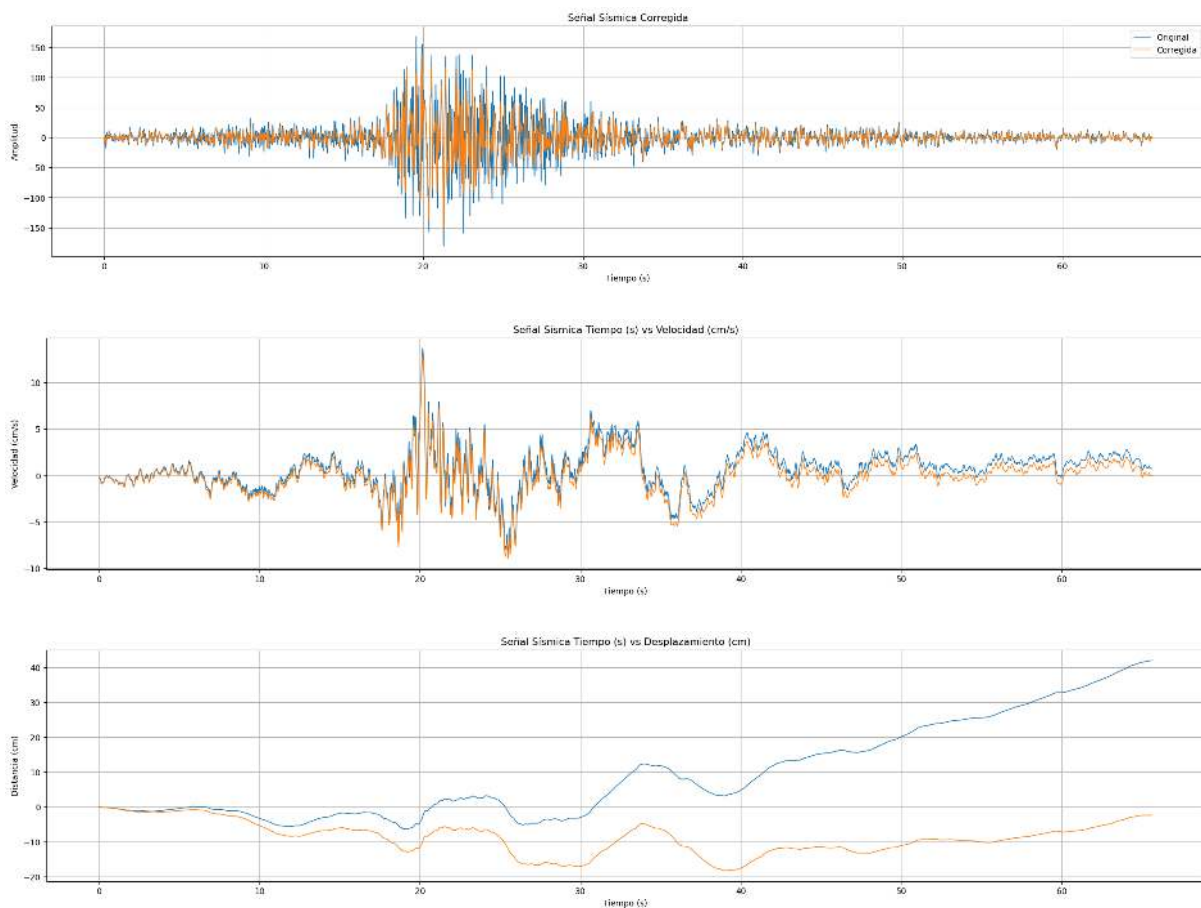
```
# Calcular la velocidad mediante la integración numérica de la aceleración
```

```
velocidad_corregida = np.cumsum(señal_corregida) * np.mean(np.diff(t))
```

```
# Calcular el desplazamiento mediante la integración numérica de la velocidad
```

```
desplazamiento_corregida = np.cumsum(velocidad_corregida) *  
np.mean(np.diff(t))
```

Teniendo las siguientes comparaciones graficas de los datos corregidos con los datos obtenidos de IGP:



Planteamiento del análisis de Fourier para obtener el espectro de frecuencias:

```
# Realizar el análisis de Fourier para obtener el espectro de frecuencia de la
señal corregida
```

```
n = len(señal_corregida)
```

```
k = np.arange(n)
```

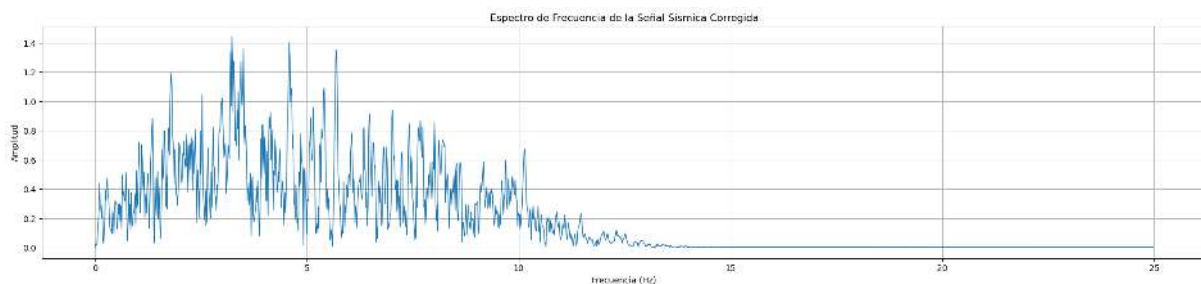
```
T = n / fs
```

```
freq = k / T
```

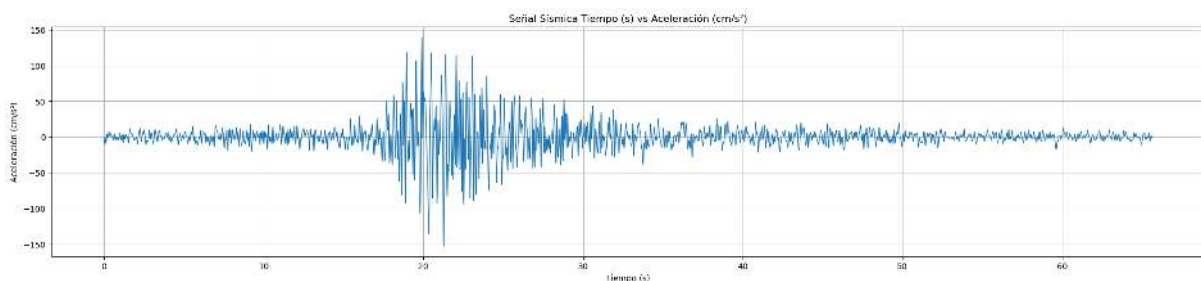
```
freq = freq[: n // 2]
```

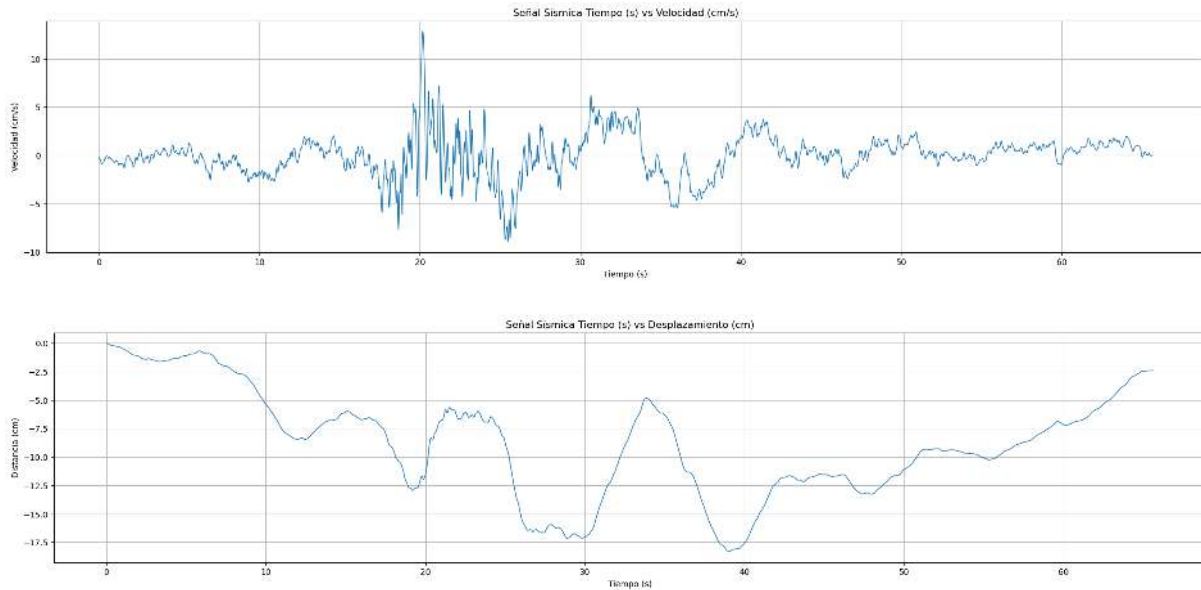
```
señal_fft = np.fft.fft(señal_corregida) / n
```

```
señal_fft = señal_fft[: n // 2]
```



Finalmente se exporta los datos obtenidos para aplicarlos en herramientas de escalamiento como es el SeismoMatch, la ayuda que proporciona el uso de códigos para el procesamiento de datos es lo más óptimo, debido a que ante cualquiera modificación se realiza de manera rápida, por otro lado, tener el control de los datos, facilita el proceso de las señales sísmicas de manera rápida debido a que se requieren 7 registros sísmicos o más, finalmente se tiene las señales corregidas:





Posteriormente se puede determinar el escalamiento del sismo de acuerdo con el libro de Dinámica de Estructuras de Anil K. Chopra:

```
def Calculo_Respuesta_metodo_2(vectort, vectorf, Tn, ζ, β, γ, m):
```

```
    #m = 1.00
```

```
    k = m * (2 * np.pi / Tn)**2
```

```
    wn = 2 * np.pi / Tn
```

```
    c = 2 * ζ * m * wn
```

```
    n_puntos = len(vectort)
```

```
    Δt = vectort[1] - vectort[0]
```

```
    U = np.zeros(n_puntos)
```

```
    U[0] = 0.00
```

```
    UP = np.zeros(n_puntos)
```

```
    UP[0] = 0.00
```

```
    UPP = np.zeros(n_puntos)
```

```
    a1 = m / (β * Δt**2) + γ * c / (β * Δt)
```

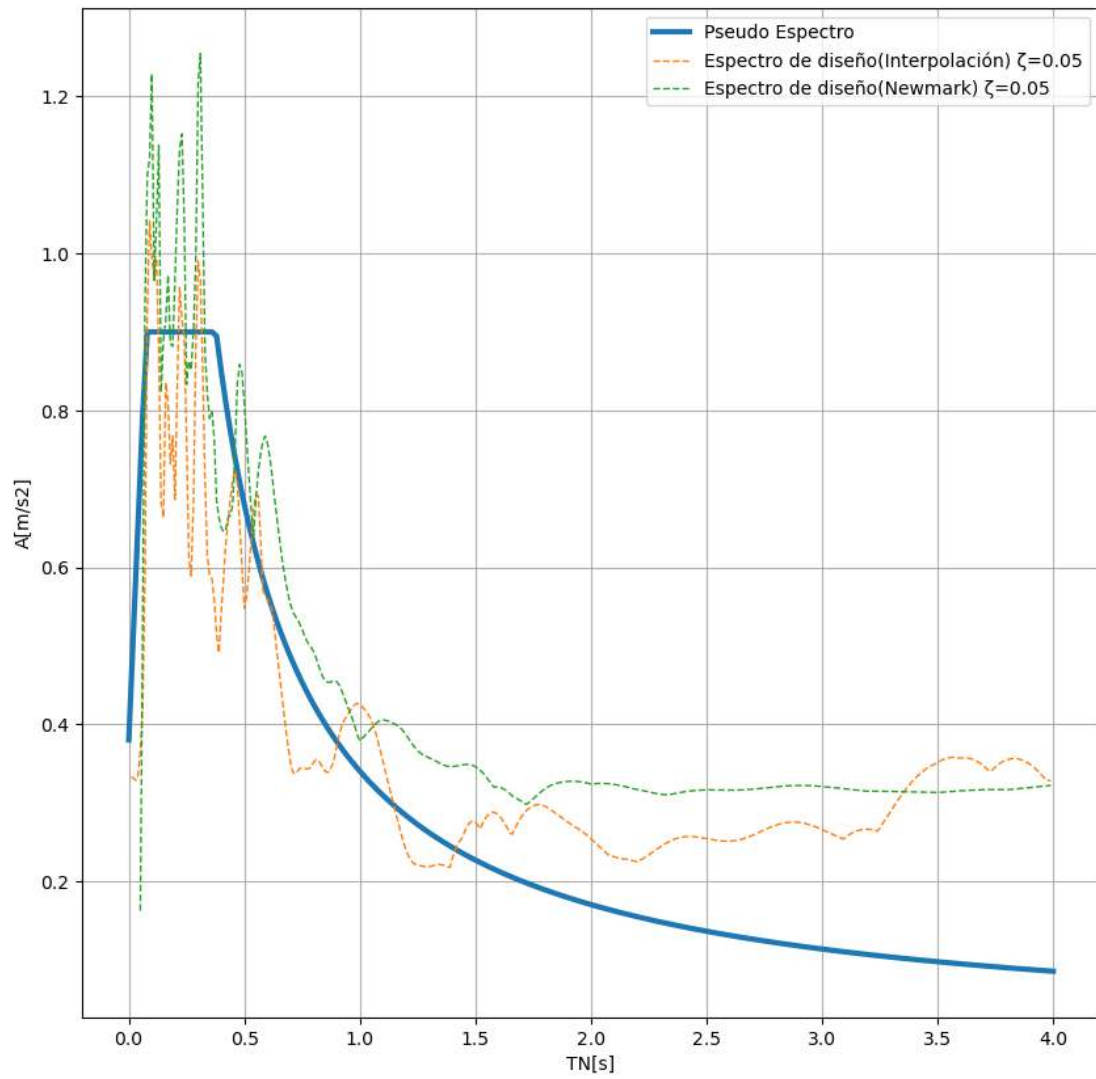
```

a2 = m / (β * Δt) + (γ / β - 1)*c
a3 = (1 / (2*β) - 1) * m + Δt * (γ / (2*β)-1) *c
kt = k + a1

#for i in range(n_puntos - 1):
for i in range(n_puntos - 1):
    pti_1 = vectorf[i+1]+a1*U[i]+a2*UP[i]+a3*UPP[i]
    U[i+1] = pti_1/kt
    UP[i+1]=(γ/(β*Δt))*(U[i+1]-U[i]) + (1-γ/β)*UP[i]+Δt*(1-γ/(2*β))*UPP[i]
    UPP[i+1] = (U[i+1]-U[i])/(β*Δt**2) - UP[i]/(β*Δt) - (1/(2*β)-
1)*UPP[i]

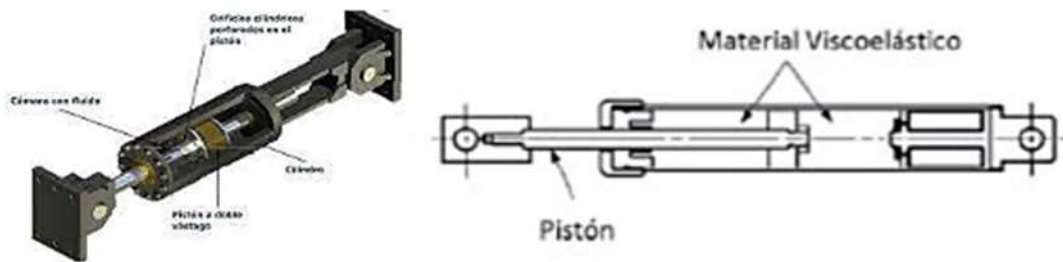
return U, UP, UPP

```



## APÉNDICE C

Planteamiento del predimensionamiento del disipador de energía, se determinó el comportamiento viscoso, determinado por las ecuaciones de Maxwell, en la incorporación de parámetros no lineales:



### 1. Materiales

#### a) Acero ASTM A709 - 50

$$f_y := 345 \text{ MPa} = 345000 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad f'_y := 450 \text{ MPa} = 450000 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$E := 200 \text{ GPa} = 2039432.426 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

$$L := 33 \text{ m}$$

$$H := 0.04 \cdot L = 1.32 \text{ m} \quad \text{Tabla 2.5.2.6.3-1}$$

### 2. Disipador de Energía

$$m := [169.951] \quad \phi := [0.825194] \quad \text{for } i := 1; i < \text{length}(\phi) + 1; i := i + 1 \quad \phi_r := [0.825]$$

$$\left| \begin{array}{l} \text{if } i \geq \text{length}(\phi) \\ \phi_r_i := \phi_i \\ \text{else} \\ \phi_r_i := \phi_i - \phi_{i+1} \end{array} \right.$$

#### Acero Round HSS 7.5x0.500

$$E := 29000 \text{ ksi}$$

$$\delta := 0.05 \quad N := 4$$

$$L := 100 \text{ cm}$$

$$A := 0.007161 \text{ m}^2 = 71.61 \text{ cm}^2$$

$$k := \frac{E \cdot A}{L} = 146006 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

#### Factor de reducción B

$$D_{max} := 0.15 \text{ m}$$

$$D_{obj} := 0.05 \text{ m}$$

$$B := \frac{D_{max}}{D_{obj}} = 3$$

#### Amortiguamiento efectivo

$$\beta_0 := 3$$

$$B = \frac{2.31 - 0.41 \cdot \ln(\beta_0)}{2.31 - 0.41 \cdot \ln(\beta_{eff})}$$

$$V_{eff} := \text{solve} \left( B - \frac{2.31 - 0.41 \cdot \ln(\beta_0)}{2.31 - 0.41 \cdot V_{eff}}; V_{eff} \right) = 4.122 \quad \beta_{eff} := e^{V_{eff}} = 61.701$$

#### Amortiguamiento viscoso

$$\beta_H := \beta_{eff} - \beta_0 = 58.701 \quad \text{Para } 40\% > B1 = 2.1$$

Angulo del dispositivo

$$\theta := 15^\circ$$

Coefficiente de velocidad

$$\alpha := 0.5 \quad [04 - 0.6] \quad \lambda := 3.5 \quad \text{Tabla C9-4}$$

Frecuencia angular

$$T := 1.4$$

$$f := \frac{1}{T} = 0.714$$

$$\omega := 2 \cdot \pi \cdot f = 4.488$$

Factor modal

$$W_m := \frac{\left( \sum_{i=1}^{\text{length}(m)} m_i \cdot \phi_i \right)^2}{\sum_{i=1}^{\text{length}(m)} m_i \cdot \phi_i^2} = 169.951$$

$$\Gamma_1 := \frac{W_m}{\sum_{i=1}^{\text{length}(m)} m_i \cdot \phi_i} = 1.212$$

Amplitud

$$g := 9.81$$

$$T_{1D} := 1.211836$$

$$B_{1D} := 2.1$$

$$S_{D1} := \frac{Z \cdot S \cdot U \cdot C}{R} = 0.146$$

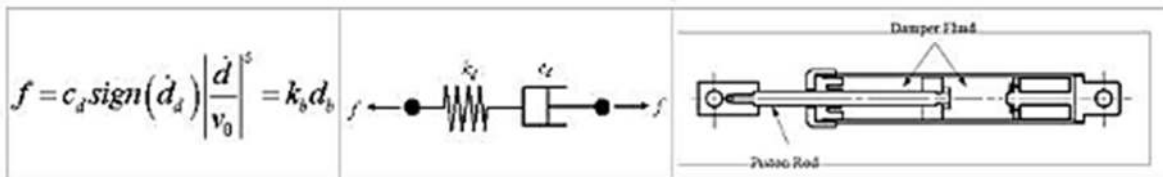
$$D_{roof} := \left( \frac{g}{4 \cdot \pi^2} \right) \cdot \Gamma_1 \cdot \frac{S_{D1} \cdot T_{1D}}{B_{1D}} = 0.025$$

Coefficiente de amortiguamiento viscoelástico de Maxwell

$$A := D_{roof} = 0.025$$

$$C_j := \frac{\left( 2 \cdot \pi \cdot A^{1-\alpha} \cdot \omega^{2-\alpha} \cdot \sum_{i=1}^{\text{length}(m)} (m_i \cdot \phi_i^2) \right) \cdot \frac{\beta_H}{100}}{\sum_{j=1}^{\text{length}(m)} \left[ \lambda \cdot \phi_{rj}^{1+\alpha} \cdot \cos(\theta)^{1+\alpha} \right]} \quad 1 \text{ tonnef} \frac{\text{s}}{\text{m}} = 259.72 \quad 1 \text{ tonnef} \frac{\text{s}}{\text{m}}$$

if  $T_{1D} < T_p$   
 $C := 2.5$   
 else  
 if  $(T_p < T_{1D}) \wedge (T_{1D} < T_L)$   
 $C := 2.5 \cdot \frac{T_p}{T_{1D}}$   
 else  
 $C := 2.5 \cdot \frac{T_p \cdot T_L}{T_{1D}^2}$



$$c := \frac{C_j}{N} = 64.929935 \text{ tonnef} \frac{\text{s}}{\text{m}}$$



Resumen de las propiedades no lineales:

$$Total\_Weight := 0.5 \text{ tonnef}$$

$$V_o := 0.01 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

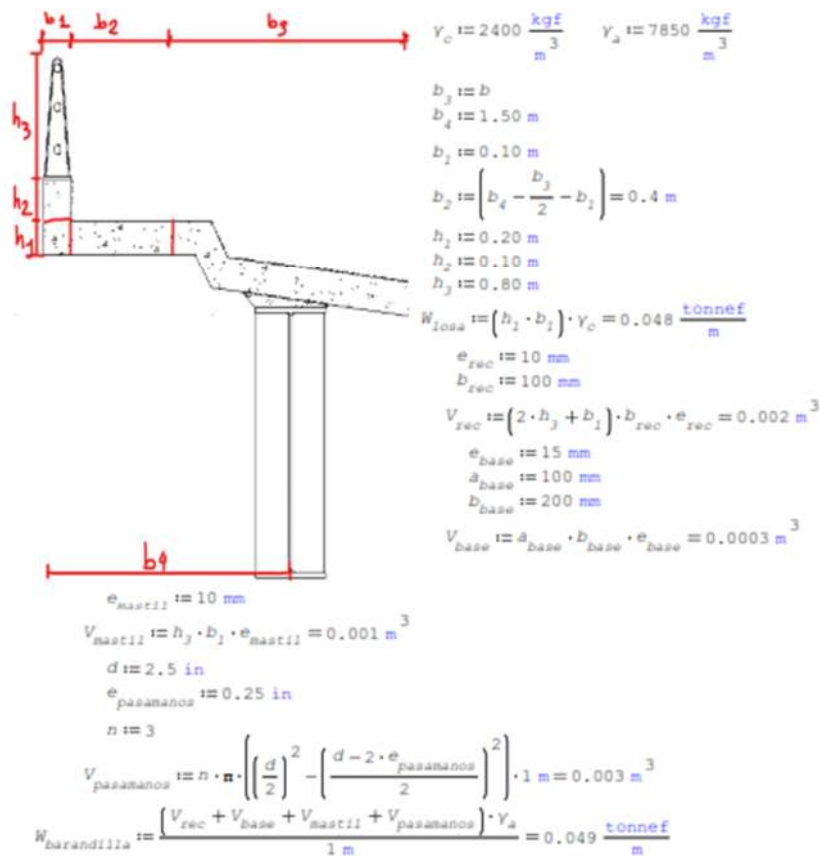
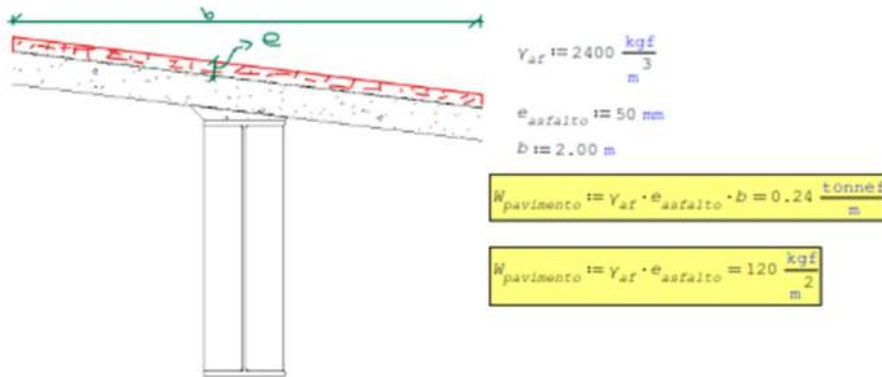
$$C_d := C \cdot V_o = 0.649 \text{ tonnef}$$

$$s := \alpha = 0.5$$

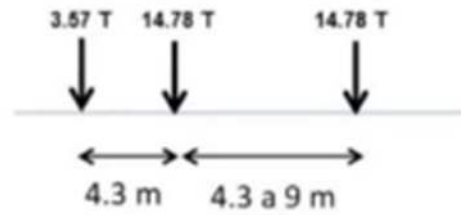
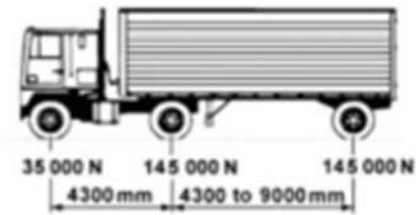
$$k_b := k = 146005.76 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

## APÉNDICE D

Planteamiento de las cargas de diseño aplicadas al programa de Midas Civil:



$W_{\text{baranda}} := W_{\text{losa}} + W_{\text{barandilla}} = 97 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$



$$E_1 := 35000 \text{ N} \quad E_2 := 145000 \text{ N}$$

$$P_{25\%} := E_2 \cdot 25\% = 3.696 \text{ tonnef}$$

$$n_{\text{carriles}} := 2$$

$$m := 1$$

$$W_{\text{frenado}} := P_{25\%} \cdot n_{\text{carriles}} \cdot m = 7393 \text{ kgf}$$

$$V := 30 \frac{\text{km}}{\text{hr}}$$

$$R := 25 \text{ m}$$

$$f := \frac{4}{3}$$

$$C := f \cdot \frac{V^2}{R \cdot g_0} = 0.378$$

$$W_{\text{centrifuga}} := (E_1 + 2 \cdot E_2) \cdot C = 12516 \text{ kgf}$$

$$CV := 3.6 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}$$

$$b := 0.90 \text{ m}$$

$$W_{\text{peatonal}} := CV \cdot b = 330 \frac{\text{kgf}}{\text{m}}$$

$$V_{\text{inicial}} := 75 \frac{\text{km}}{\text{hr}}$$

$$V_{\text{mapa}} := 160 \frac{\text{km}}{\text{hr}}$$

$$Z_{\text{inicial}} := 70 \text{ mm}$$

$$V_{\text{final}} := 13.20 \frac{\text{km}}{\text{hr}}$$

$$Z := 7500 \text{ mm}$$

$$V_{20} := 72.30 \frac{\text{km}}{\text{hr}}$$

## ANEXOS

### ANEXO 1: COEFICIENTES DE SITIO

Se tiene tablas que se encuentran en el Manual de Puentes (Pág. 559) que se usaron para determinar el espectro de diseño:

**Tabla 1: Coeficientes de Sitio  $F_{pga}$  y  $F_a$**

Clase del Sitio	Coeficientes para periodo corto de PGA y Aceleración Espectral				
	PGA ≤ 0.10 $S_s \leq 0.25$	PGA = 0.20 $S_s = 0.50$	PGA = 0.30 $S_s = 0.75$	PGA = 0.40 $S_s = 1.00$	PGA ≥ 0.50 $S_s \geq 1.25$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	Se deben considerar investigaciones geotécnicas y análisis dinámicos específicos para la zona de estudio.				

Utilice interpolación lineal para valores intermedios de PGA y  $S_s$ .

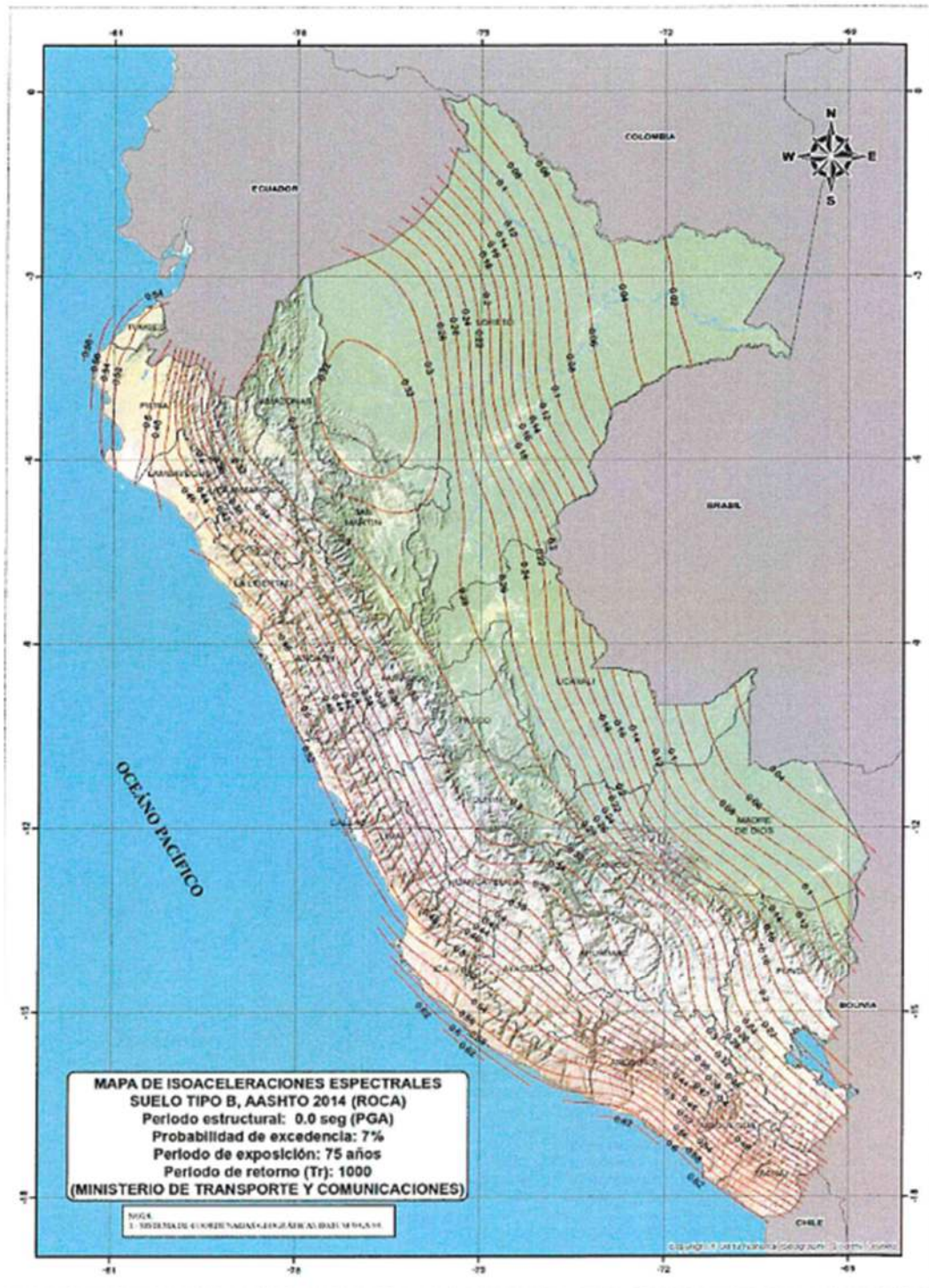
**Tabla 2: Coeficientes de Sitio  $F_v$**

Clase de Sitio	Coeficientes de Aceleración Espectral para periodo a 1 s				
	$S_1 \leq 0.10$	$S_1 = 0.20$	$S_1 = 0.30$	$S_1 = 0.40$	$S_1 \geq 0.50$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	Se deben considerar investigaciones geotécnicas y análisis dinámicos específicos para la zona de estudio.				

Utilice interpolación lineal para valores intermedios de  $S_1$ .

## ANEXO 2: MAPA DE ISOACELERACIONES

Se tiene tablas que se encuentran en el Manual de Puentes (Págs. 561 - 562) que se usaron para determinar el espectro de diseño:



### ANEXO 3: FACTORES DE AMPLIFICACIÓN DE CARGA

La condición básica de diseño que deben cumplir cada componente de la estructura es que su capacidad resistente no debe superarse por la mayorada según el estado límite de análisis.

La solicitud mayorada se define como:  $Q = \sum n_i \gamma_i Q_i$  donde  $n_i$  es el modificador de las cargas,  $\gamma_i$  son los factores de carga, y  $Q_i$  son las solicitaciones de las cargas obtenida de la AASHTO LRFD 2020.

Load Combination Limit State	DC DD DW EH EV ES EL PS CR SH	LL IM CE BR PL LS	WA	WS	WL	FR	TU	TG	SE	Use One of These at a Time			
										EQ	IC	CT	CV
Strength I (unless noted)	$\gamma_p$	1.75	1.00	—	—	1.00	0.50/1.20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$	—	—	—	—
Strength II	$\gamma_p$	1.35	1.00	—	—	1.00	0.50/1.20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$	—	—	—	—
Strength III	$\gamma_p$	—	1.00	1.40	—	1.00	0.50/1.20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$	—	—	—	—
Strength IV	$\gamma_p$	—	1.00	—	—	1.00	0.50/1.20	—	—	—	—	—	—
Strength V	$\gamma_p$	1.35	1.00	0.40	1.0	1.00	0.50/1.20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$	—	—	—	—
Extreme Event I	$\gamma_p$	$\gamma_{EQ}$	1.00	—	—	1.00	—	—	—	1.00	—	—	—
Extreme Event II	$\gamma_p$	0.50	1.00	—	—	1.00	—	—	—	—	1.00	1.00	1.00
Service I	1.00	1.00	1.00	0.30	1.0	1.00	1.00/1.20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$	—	—	—	—
Service II	1.00	1.30	1.00	—	—	1.00	1.00/1.20	—	—	—	—	—	—
Service III	1.00	0.80	1.00	—	—	1.00	1.00/1.20	$\gamma_{TG}$	$\gamma_{SE}$	—	—	—	—
Service IV	1.00	—	1.00	0.70	—	1.00	1.00/1.20	—	1.0	—	—	—	—
Fatigue I—LL, IM & CE only	—	1.50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Fatigue I II— LL, IM & CE only	—	0.75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Type of Load, Foundation Type, and Method Used to Calculate Downdrag		Load Factor	
		Maximum	Minimum
<i>DC</i> : Component and Attachments		1.25	0.90
<i>DC</i> : Strength IV only		1.50	0.90
<i>DD</i> : Downdrag	Piles, $\alpha$ Tomlinson Method	1.4	0.25
	Piles, $\lambda$ Method	1.05	0.30
	Drilled shafts, O'Neill and Reese (1999) Method	1.25	0.35
<i>DW</i> : Wearing Surfaces and Utilities		1.50	0.65
<i>EH</i> : Horizontal Earth Pressure			
• Active		1.50	0.90
• At-Rest		1.35	0.90
• <i>AEP</i> for anchored walls		1.35	N/A
<i>EL</i> : Locked-in Construction Stresses		1.00	1.00
<i>EV</i> : Vertical Earth Pressure			
• Overall Stability		1.00	N/A
• Retaining Walls and Abutments		1.35	1.00
• Rigid Buried Structure		1.30	0.90
• Rigid Frames		1.35	0.90
• Flexible Buried Structures other than Metal Box Culverts		1.95	0.90
• Flexible Metal Box Culverts and Structural Plate Culverts with Deep Corrugations		1.50	0.90
<i>ES</i> : Earth Surcharge		1.50	0.75