

**UNIVERSIDAD RICARDO PALMA**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA VIAL CON MENCIÓN EN  
CARRETERAS, PUENTES Y TÚNELES**



**Tesis para optar el Grado Académico de Maestro en Ingeniería Vial  
con Mención en Carreteras, Puentes y Túneles**

**Interacción suelo-estructura para la obtención de la respuesta sísmica  
de la subestructura con columnas de grava del puente en la avenida  
Sánchez Cerro, Piura.**

**Autor: Bach. Rocio Maldonado, Yordan Alberto**

**Asesora: Dra. Cruz Herrera, Magdalena**

**LIMA – PERÚ**

**2022**

**PÁGINA DEL JURADO**

---

Dr. Tamara Rodríguez, Joaquín Samuel

Presidente

---

Mg. Nario Dulanto, Carlos Fernando

Miembro

---

Dr. Altamirano Herrera, Aníbal

Miembro

---

Dra. Cruz Herrera, Magdalena

Asesora

---

Representante del EPG

**Lima – Perú**

**2022**

## DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico especialmente a mi madre, Elmira Maldonado Gonzales, por su constante apoyo, cariño y amor brindado durante toda mi vida; aprendiendo de ella, mucho, sus ganas de superación y esfuerzos que me ayuda a desarrollarme como persona y como profesional. A mis tíos, José Maldonado Gonzales, Hugo Maldonado Gonzales y Mario Maldonado Gonzales, que, gracias a sus palabras de aliento y enseñanzas, brindaron en mí, una filosofía de vida para mi desarrollo.

**AGRADECIMIENTO**

A mi asesora, Dra. Magdalena Cruz Herrera, por el apoyo e interés brindado hacia mi persona para el desarrollo del presente trabajo.

## INDICE DE CONTENIDO

RESUMEN .....	17
ABSTRACT.....	18
INTRODUCCIÓN .....	19
1. Planteamiento del problema .....	22
1.1 Descripción del problema .....	22
1.2 Formulación del problema .....	23
1.2.1 Problema general .....	23
1.2.2 Problemas específicos.....	24
1.3 Importancia y justificación del estudio .....	24
1.3.1 Importancia .....	24
1.3.2 Justificación .....	26
1.4 Delimitación del estudio .....	29
1.5 Objetivos de la investigación .....	29
1.5.1 General.....	29
1.5.2 Específicos .....	30
2. Marco teórico.....	31
2.1 Marco histórico .....	31
2.2 Investigaciones relacionadas con el tema .....	36
2.2.1 Investigaciones nacionales.....	36
2.2.2 Investigaciones internacionales .....	39
2.3 Estructura teórica y científica que sustenta el estudio .....	43
2.3.1 Marco Normativo.....	43
2.3.2 Interacción suelo estructura .....	47
2.3.3 Modelamiento numérico de la estructura y del suelo .....	64
2.3.4 Análisis estructural .....	71
2.3.5 Respuestas sísmicas de la subestructura .....	81
2.4 Definición de términos básicos .....	92
2.5 Fundamentos teóricos que sustentan la hipótesis.....	93
2.6 Hipótesis.....	93
2.6.1 General.....	93
2.6.2 Específicas .....	93

2.7	Variables .....	94
3.	Marco metodológico.....	95
3.1	Tipo, método de investigación y diseño de la investigación.....	95
3.1.1	Tipo de investigación.....	95
3.1.2	Método de investigación.....	95
3.1.3	Diseño investigación.....	96
3.2	Población y muestra .....	96
3.2.1	Población .....	96
3.2.2	Muestra .....	97
3.3	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	97
3.3.1	Técnicas de recolección de datos.....	97
3.3.2	Instrumentos.....	98
3.4	Descripción de procedimientos de análisis de datos .....	100
4.	Resultados y análisis de resultados.....	101
4.1	Resultados .....	101
4.1.1	Descripciones del modelo.....	101
4.1.2	Metodología del estudio.....	113
4.1.3	Resultados en Interacción suelo estructura.....	114
4.1.4	Resultados en la respuesta sísmica de la subestructura .....	124
4.2	Discusión de resultados.....	158
4.2.1	Efectos de la interacción suelo-estructura para la obtención de la respuesta sísmica en la subestructura .....	158
4.2.2	Efectos de parámetros geotécnicos del suelo para la obtención de las respuestas estructurales en la subestructura .....	159
4.2.3	Efectos de parámetros geotécnicos del suelo para la obtención del desempeño estructural en la subestructura .....	161
4.2.4	Efectos de las columnas de grava para la obtención de las respuestas estructurales en la subestructura .....	163
5.	Conclusiones y recomendaciones.....	165
	Conclusiones .....	165
	Recomendaciones.....	166
6.	Referencias bibliográficas .....	167
7.	Anexos.....	171

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> .....	90
<i>Niveles de desempeño según desplazamiento de la estructura</i> .....	90
<b>Tabla 2</b> .....	91
<i>Grado de daño de acuerdo al rango de daño por costo de reparación</i> .....	91
<b>Tabla 3</b> .....	94
<i>Operacionalización de las variables</i> .....	94
<b>Tabla 4</b> .....	101
<i>Propiedades del suelo</i> .....	101
<b>Tabla 5</b> .....	103
<i>Propiedades de las columnas de grava.</i> .....	103
<b>Tabla 6</b> .....	107
<i>Propiedades de los materiales del puente.</i> .....	107
<b>Tabla 7</b> .....	108
<i>Coefficientes sísmicos para estudio.</i> .....	108
<b>Tabla 8</b> .....	123
<i>Resultados de programa plaxis v20 del suelo.</i> .....	123
<b>Tabla 9</b> .....	123
<i>Resultados de programa plaxis v20 del suelo con columnas de grava.</i> .....	123
<b>Tabla 10</b> .....	123
<i>Factores de desplante por tipo de rigidez.</i> .....	123
<b>Tabla 11</b> .....	124
<i>Rigideces del suelo de acuerdo a parámetros geotécnicos.</i> .....	124
<b>Tabla 12</b> .....	125
<i>Desplazamientos obtenidos del análisis modal espectral</i> .....	125
<b>Tabla 13</b> .....	125
<i>Giros obtenidos del análisis modal espectral.</i> .....	125
<b>Tabla 14</b> .....	126
<i>Fuerzas cortantes obtenidos del análisis modal espectral</i> .....	126
<b>Tabla 15</b> .....	127
<i>Momentos flectores obtenidos del análisis modal espectral</i> .....	127
<b>Tabla 16</b> .....	127
<i>Periodos fundamentales en dirección longitudinal (modo 1)</i> .....	127
<b>Tabla 17</b> .....	127
<i>Periodos fundamentales en dirección transversal (modo 2)</i> .....	127
<b>Tabla 17</b> .....	132

<i>Carga axial para acciones permanentes.</i> .....	132
<b>Tabla 18</b> .....	135
<i>Rótula plástica transversalmente, análisis no lineal, puente con base empotrada</i> .....	135
<b>Tabla 19</b> .....	135
<i>Rótula plástica transversalmente, análisis no lineal, puente con suelo flexible</i> .....	135
<b>Tabla 20</b> .....	136
<i>Rótula plástica transversalmente, análisis no lineal, puente con suelo flexible con columnas de grava</i> .....	136
<b>Tabla 21</b> .....	138
<i>Rótulas plásticas longitudinalmente, análisis no lineal, puente con base empotrada</i> .	138
<b>Tabla 22</b> .....	138
<i>Rótulas plásticas longitudinalmente, análisis no lineal, puente con suelo flexible</i> .....	138
<b>Tabla 23</b> .....	139
<i>Rótulas plásticas longitudinalmente, análisis no lineal, puente con suelo flexible con columnas de grava</i> .....	139
<b>Tabla 24</b> .....	149
<i>Ratios de desplazamiento transversal con base empotrada.</i> .....	149
<b>Tabla 25</b> .....	149
<i>Ratios de desplazamiento longitudinal con base empotrada</i> .....	149
<b>Tabla 26</b> .....	149
<i>Ratios de desplazamiento transversal con suelo flexible</i> .....	149
<b>Tabla 27</b> .....	149
<i>Ratios de desplazamiento longitudinal con suelo flexible.</i> .....	149
<b>Tabla 28</b> .....	149
<i>Ratios de desplazamiento transversal con suelo flexible con columnas de grava.</i> .....	149
<b>Tabla 29</b> .....	149
<i>Ratios de desplazamiento longitudinal con suelo flexible con columnas de grava</i> .....	149
<b>Tabla 30</b> .....	154
<i>Desplazamientos objetivos calculados según FEMA 440</i> .....	154

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> .....	45
<i>Tipos de modelamiento del suelo: (a) modelo idealizado elasto-plástico, (b) matriz desacoplada de resorte en una zapata rígida</i> .....	
	45
<b>Figura 2</b> .....	46
<i>Tipos de modelamiento del suelo: (a) modelo de base rígida, (b) modelo de base flexible, (c) interacción cinemática y (d) amortiguamiento en la base.</i> .....	
	46
<b>Figura 3</b> .....	49
<i>Tipos de modelamiento del suelo: Solución elástica para el cálculo de los resortes en una zapata rectangular</i> .....	
	49
<b>Figura 4</b> .....	50
<i>Rigidez vertical de modelamiento para cimentaciones superficiales</i> .....	
	50
<b>Figura 5</b> .....	51
<i>Variación del periodo: (a) factor de reducción por geometría de la cimentación, (b) factor de reducción por altura de embebido a 30 pies en el suelo</i> .....	
	51
<b>Figura 6</b> .....	52
<i>Variación del periodo y el amortiguamiento</i> .....	
	52
<b>Figura 7</b> .....	53
<i>Vista de componentes de la subestructura</i> .....	
	53
<b>Figura 8</b> .....	55
<i>Envolvente de falla de Mohr y criterio de falla de Mohr Coulomb</i> .....	
	55
<i>Método de ejecución de columnas de grava por vía seca</i> .....	
	57
<b>Figura 10</b> .....	57
<i>Método de ejecución de columnas de grava por vía húmeda</i> .....	
	57
<b>Figura 11</b> .....	58
<i>Tipos de técnicas de construcción de vibraciones profundas</i> .....	
	58
<b>Figura 12</b> .....	60
<i>Carta de diseño de factor de mejoramiento de las columnas de grava</i> .....	
	60
<b>Figura 13</b> .....	62
<i>Simplificación de columna de grava</i> .....	
	62
<b>Figura 14</b> .....	62
<i>Método de zanjas en el modelamiento de columnas de gravas</i> .....	
	62
<b>Figura 15</b> .....	63
<i>Principio de homogenización del terreno</i> .....	
	63
<b>Figura 16</b> .....	63
<i>Modelamiento representativo axisimétrico de una columna de grava</i> .....	
	63
<b>Figura 17</b> .....	64
<i>Modelamiento en 3D de columnas de grava</i> .....	
	64

<b>Figura 18</b> .....	64
<i>Modelamiento en columnas de grava aislada y grupo de columnas de grava</i> .....	64
<b>Figura 19</b> .....	66
<i>Geometría de los elementos finitos típicos desde una dimensión hasta tres dimensiones.</i> .....	66
<b>Figura 20</b> .....	67
<i>Representación gráfica de las restricciones impuestas en la estructura</i> .....	67
<b>Figura 21</b> .....	68
<i>Representación gráfica de las fuerzas internas de un elemento frame</i> .....	68
<b>Figura 22</b> .....	69
<i>Representación gráfica de las fuerzas internas de un elemento shell</i> .....	69
<b>Figura 23</b> .....	70
<i>Niveles de modelamiento para análisis sísmico en puentes</i> .....	70
<b>Figura 24</b> .....	71
<i>Representación gráfica de resultados a través del programa Plaxis.</i> .....	71
<b>Figura 25</b> .....	72
<i>Sistema representativo de un solo grado de libertad de un puente.</i> .....	72
<b>Figura 26</b> .....	73
<i>Sistema representativo de multigrado de libertad de análisis de un puente.</i> .....	73
<b>Figura 27</b> .....	75
<i>Representación gráfica de un sistema de un grado de libertad (SDOF) equivalente desde una curva de capacidad.</i> .....	75
<b>Figura 28</b> .....	76
<i>Representación gráfica de esfuerzo-deformación para concreto en compresión</i> .....	76
<b>Figura 29</b> .....	76
<i>Representación gráfica de esfuerzo-deformación para el acero: (a) comportamiento asimétrico, (b) comportamiento simétrico.</i> .....	76
<b>Figura 30</b> .....	77
<i>Modelo paramétrico del comportamiento del acero de refuerzo típico</i> .....	77
<b>Figura 31</b> .....	78
<i>Propiedades del acero de refuerzo.</i> .....	78
<b>Figura 32</b> .....	79
<i>Representación gráfica del análisis de secciones de momento-curvatura.</i> .....	79
<b>Figura 33</b> .....	80
<i>Representación gráfica bilinear aproximada de la relación del momento-curvatura.</i> ..	80
<b>Figura 34</b> .....	81
<i>Representación gráfica de la deformación inelástica en un pilar de puente</i> .....	81
<b>Figura 35</b> .....	83

<i>Representación gráfica del método de coeficiente de FEMA 356 para estimar el desplazamiento objetivo.</i> .....	83
<b>Figura 36</b> .....	84
<i>Representación gráfica del método de espectro capacidad y el espectro de respuesta de ATC-40 para estimar el punto de desempeño</i> .....	84
<b>Figura 37</b> .....	85
<i>Representación gráfica del método de espectro capacidad de ATC-40 para estimar el desplazamiento objetivo.</i> .....	85
<b>Figura 38</b> .....	86
<i>Representación gráfica del movimiento de suelo y caracterización final a partir de un espectro elástico.</i> .....	86
<b>Figura 39</b> .....	86
<i>Espectro de respuesta de aceleración.</i> .....	86
<b>Figura 40</b> .....	88
<i>Espectro de respuesta convertido al sistema ADRS.</i> .....	88
<b>Figura 41</b> .....	89
<i>Espectro de capacidad convertido al sistema ADRS.</i> .....	89
<b>Figura 42</b> .....	89
<i>Representación gráfica de la curva bilineal y la curva capacidad</i> .....	89
<b>Figura 43</b> .....	90
<i>Determinación estimada del punto de desempeño</i> .....	90
<b>Figura 44</b> .....	91
<i>Niveles de desempeño según desplazamiento de la estructura según bilinearización.</i> ..	91
<b>Figura 45</b> .....	93
<i>Mapa conceptual de fundamentos teóricos que sustentan la hipótesis.</i> .....	93
<b>Figura 46</b> .....	102
<i>Perfil geotécnico-geológico del suelo.</i> .....	102
<b>Figura 47</b> .....	102
<i>Perfil de tratamiento de suelo “columnas de grava” junto al perfil geotécnico-geológico.</i> .....	102
<b>Figura 48</b> .....	103
<i>Planta de tratamiento de columnas de gravas.</i> .....	103
<b>Figura 49</b> .....	104
<i>Módulo de deformación en campo de columnas de grava.</i> .....	104
<b>Figura 50</b> .....	104
<i>Planta de puente recto avenida Sánchez Cerro.</i> .....	104
<b>Figura 51</b> .....	105
<i>Elevación de puente recto avenida Sánchez Cerro.</i> .....	105

<b>Figura 52</b> .....	105
<i>Sección transversal tipo recto avenida Sánchez Cerro.</i> .....	105
<b>Figura 53</b> .....	106
<i>Planta de cimentación en estribo de puente recto avenida Sánchez Cerro.</i> .....	106
<b>Figura 54</b> .....	106
<i>Planta de cimentación de pilares centrales de puente recto avenida Sánchez Cerro ..</i>	106
<b>Figura 55</b> .....	107
<b>Figura 56</b> .....	108
<i>Espectro de aceleraciones del puente recto avenida Sánchez Cerro.</i> .....	108
<b>Figura 57</b> .....	109
<i>Modelo matemático extruido con base fija del puente recto avenida Sánchez Cerro..</i>	109
<b>Figura 58</b> .....	109
<i>Vista seccional del modelo matemático del puente recto avenida Sánchez Cerro.</i> .....	109
<b>Figura 59</b> .....	110
<i>Modelo matemático con base empotrada del puente recto avenida Sánchez Cerro.</i> ...	110
<b>Figura 60</b> .....	110
<i>Modelo matemático con base flexible del puente recto avenida Sánchez Cerro.</i> .....	110
<b>Figura 61</b> .....	111
<i>Vista seccional del modelo matemático del puente recto avenida Sánchez Cerro.</i> .....	111
<b>Figura 62</b> .....	112
<i>Modelo axisimétrico de una columna de grava.</i> .....	112
<b>Figura 63</b> .....	112
<i>Vista seccional del modelo matemático representativo en dirección transversal de la cimentación.</i> .....	112
<b>Figura 64</b> .....	113
<i>Vista seccional del modelo matemático representativo en dirección longitudinal de la cimentación.</i> .....	113
<b>Figura 65</b> .....	114
<i>Representación del flujo de investigación realizada</i> .....	114
<b>Figura 66</b> .....	115
<i>Deformaciones verticales del modelo axisimétrico de la columna de grava</i> .....	115
<b>Figura 67</b> .....	116
<i>Comparativa de fuerzas aplicadas verticales vs desplazamientos verticales.</i> .....	116
<b>Figura 68</b> .....	117
<i>Deformaciones verticales para la dirección longitudinal de la cimentación de los pilares con suelo flexible</i> .....	117
<b>Figura 69</b> .....	117

<i>Deformaciones horizontales para la dirección longitudinal de la cimentación de los pilares con suelo flexible</i> .....	117
<b>Figura 70</b> .....	118
<i>Deformaciones rotacionales para la dirección longitudinal de la cimentación de los pilares con suelo flexible</i> .....	118
<b>Figura 71</b> .....	118
<i>Deformaciones verticales para la dirección transversal de la cimentación de los pilares con suelo flexible</i> .....	118
<b>Figura 72</b> .....	119
<i>Deformaciones horizontales para la dirección transversal de la cimentación de los pilares con suelo flexible</i> .....	119
<b>Figura 73</b> .....	119
<i>Deformaciones rotacionales para la dirección transversal de la cimentación de los pilares con suelo flexible</i> .....	119
<b>Figura 74</b> .....	120
<i>Deformaciones verticales para la dirección longitudinal de la cimentación de los pilares con suelo flexible con columnas de grava</i> .....	120
<b>Figura 75</b> .....	120
<i>Deformaciones horizontales para la dirección longitudinal de la cimentación de los pilares con suelo flexible con columnas de grava</i> .....	120
<b>Figura 76</b> .....	121
<i>Deformaciones rotacionales para la dirección longitudinal de la cimentación de los pilares con suelo flexible con columnas de grava</i> .....	121
<b>Figura 77</b> .....	121
<i>Deformaciones verticales para la dirección transversal de la cimentación de los pilares con suelo flexible con columnas de grava</i> .....	121
<b>Figura 78</b> .....	122
<i>Deformaciones horizontales para la dirección transversal de la cimentación de los pilares con suelo flexible con columnas de grava</i> .....	122
<b>Figura 79</b> .....	122
<i>Deformaciones rotacionales para la dirección transversal de la cimentación de los pilares con suelo flexible con columnas de grava</i> .....	122
<b>Figura 80</b> .....	129
<i>Sección de pilar</i> .....	129
<b>Figura 81</b> .....	130
<i>Modelo paramétrico de representación de la resistencia a la compresión del concreto</i> .....	130
<b>Figura 82</b> .....	131
<i>Modelo paramétrico de representación del acero de refuerzo Caltrans de acuerdo al diámetro de las barras de Ø1 3/8"</i> .....	131

<b>Figura 83</b> .....	131
<i>Modelo paramétrico de representación del acero de refuerzo Caltrans de acuerdo al diámetro de las barras de Ø5/8”</i> .....	131
<b>Figura 84</b> .....	132
<i>Diagrama de momento curvatura de sección utilizada</i> .....	132
<b>Figura 85</b> .....	133
<i>Propiedades de las rótulas plástica transversalmente y longitudinalmente.</i> .....	133
<b>Figura 86</b> .....	134
<i>Definición de rótulas plástica transversalmente</i> .....	134
<b>Figura 87</b> .....	134
<i>Formación de rótulas plásticas transversales en pilares en el modelo con base empotrada</i> .....	134
<b>Figura 88</b> .....	135
<i>Formación de rótulas plásticas transversales en pilares en el modelo con suelo flexible</i> .....	135
<b>Figura 89</b> .....	136
<i>Formación de rótulas plásticas transversales en pilares en el modelo con suelo flexible con columnas de grava</i> .....	136
<b>Figura 90</b> .....	137
<i>Definición de rótulas plástica longitudinalmente</i> .....	137
<b>Figura 91</b> .....	137
<i>Formación de rótulas plásticas longitudinalmente en pilares en el modelo con base empotrada</i> .....	137
<b>Figura 92</b> .....	138
<i>Formación de rótulas plásticas longitudinalmente en pilares en el modelo con suelo flexible</i> .....	138
<b>Figura 93</b> .....	139
<i>Formación de rótulas plásticas longitudinalmente en pilares en el modelo con suelo flexible con columnas de grava.</i> .....	139
<b>Figura 94</b> .....	141
<i>Curvas de capacidad para desplazamiento transversales en puente con suelo flexible con base empotrada</i> .....	141
<b>Figura 95</b> .....	141
<i>Curvas de capacidad para desplazamiento longitudinales en puente con base empotrada.</i> .....	141
<b>Figura 96</b> .....	142
<i>Curvas de capacidad para desplazamiento transversales en puente con suelo flexible con columnas de grava</i> .....	142
<b>Figura 97</b> .....	143

<i>Curvas de capacidad para desplazamiento longitudinales en puente con suelo flexible</i>	143
<b>Figura 98</b>	144
<i>Curvas de capacidad para desplazamiento transversales en puente con suelo flexible con columnas de grava</i>	144
<b>Figura 99</b>	144
<i>Curvas de capacidad para desplazamiento longitudinales en puente con suelo flexible con columnas de grava</i>	144
<b>Figura 100</b>	146
<i>Espectro de capacidad transversal según sistema MADRS para base empotrada. ....</i>	146
<b>Figura 101</b>	146
<i>Espectro de capacidad longitudinal según sistema MADRS para base empotrada.....</i>	146
<b>Figura 102</b>	147
<i>Espectro de capacidad transversal según sistema MADRS para suelo flexible.....</i>	147
<b>Figura 103</b>	147
<i>Espectro de capacidad longitudinal según sistema MADRS para suelo flexible .....</i>	147
<b>Figura 104</b>	148
<i>Espectro de capacidad transversal según sistema MADRS para suelo flexible con columnas de grava. ....</i>	148
<b>Figura 105</b>	148
<i>Espectro de capacidad longitudinal según sistema MADRS para suelo flexible con columnas de grava. ....</i>	148
<b>Figura 106</b>	150
<i>Espectro de demandas para un modelo de base empotrada para un periodo de retorno de 1000 años. ....</i>	150
<b>Figura 107</b>	150
<i>Espectro de demandas para un modelo de suelo flexible y suelo flexible con columnas de grava para un periodo de retorno de 1000 años. ....</i>	151
<b>Figura 108</b>	151
<i>Gráfico para el cálculo del punto de desempeño transversalmente según espectro de respuesta dinámica. ....</i>	151
<b>Figura 109</b>	152
<i>Gráfico para el cálculo del punto de desempeño longitudinalmente según espectro de respuesta dinámica. ....</i>	152
<b>Figura 110</b>	153
<i>Gráfico para el cálculo del punto de desempeño transversalmente según espectro de respuesta dinámica. ....</i>	153
<b>Figura 111</b>	153
<i>Gráfico para el cálculo del punto de desempeño longitudinalmente según espectro de respuesta dinámica. ....</i>	153

<b>Figura 112</b> .....	153
<i>Gráfico para el cálculo del punto de desempeño transversalmente según espectro de respuesta dinámica.</i> .....	153
<b>Figura 113</b> .....	154
<i>Gráfico para el cálculo del punto de desempeño longitudinalmente según espectro de respuesta dinámica.</i> .....	154
<b>Figura 114</b> .....	155
<i>Representación de los niveles de desempeño transversalmente en el espectro de capacidad en puente con base empotrada</i> .....	155
<b>Figura 115</b> .....	155
<i>Representación de los niveles de desempeño longitudinalmente en el espectro de capacidad en puente con base empotrada</i> .....	155
<b>Figura 116</b> .....	156
<i>Representación de los niveles de desempeño transversalmente en el espectro de capacidad en puente con suelo flexible</i> .....	156
<b>Figura 117</b> .....	157
<i>Representación de los niveles de desempeño longitudinalmente en el espectro de capacidad en puente con suelo flexible</i> .....	157
<b>Figura 118</b> .....	157
<i>Representación de los niveles de desempeño transversalmente en el espectro de capacidad en puente con suelo flexible con columnas de grava</i> .....	157
<b>Figura 119</b> .....	158
<i>Representación de los niveles de desempeño longitudinalmente en el espectro de capacidad en puente con suelo flexible con columnas de grava</i> .....	158

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo analizar el efecto de la interacción suelo estructura para la obtención de las respuestas sísmicas (respuestas estructurales y desempeño sísmico) en el puente de la avenida Sánchez Cerro con columnas de grava. Para ello se realizó un modelamiento considerando el tipo de la cimentación: empotrado, suelo flexible y suelo flexible con columnas de grava. El enfoque de la investigación es de tipo cuantitativo, de nivel descriptiva correlacional con diseño no experimental, transversal y prospectivo. Inicialmente, se recolecta la información mediante guías de observación donde se describen las propiedades del suelo y la geometría del puente. Luego, se procede a realizar un modelamiento del suelo en el programa Plaxis v20, para determinar las rigideces del suelo. A su vez, se realiza el modelamiento estructural del puente en el programa CSI Bridge v22, considerando las propiedades recopiladas y las rigideces del suelo. El cálculo de las respuestas estructurales se aplica análisis modal espectral junto con la metodología de las normativas FEMA 356 y FEMA 440. Adicionalmente, el desempeño sísmico se realiza mediante la aplicación un análisis no lineal estático de la metodología ATC-40 que permite el nivel de desempeño para determinar el nivel de vulnerabilidad mediante la metodología risk-UE (2003). Las respuestas sísmicas obtenidas presentan una variación de las respuestas estructurales tanto en incremento como disminución en las fuerzas cortantes, momentos flectores, periodo fundamental y otros. Mientras, en el desempeño sísmico la variación es mínima considerando el suelo flexible con o sin columnas de gravas.

**Palabras claves:** Interacción suelo-estructura, análisis no lineal estático, desempeño sísmico, respuestas sísmicas

## ABSTRACT

The objective of this research was to analyze the effect of the interaction of the soil-structure to obtain the seismic responses (structural responses and seismic performance) in the Sánchez Cerro Avenue bridge with stone columns. For that reason, modeling was developed, considering the type of foundation: fixed support, flexible soil and flexible soil with stone columns. The research approach is quantitative, correlational descriptive level with a non-experimental, cross-sectional and prospective design. Initially, the information was collected by the observation guides where the properties of the soil and the geometry of the bridge were described. Then, a modeling of the soil is developed in the Plaxis v20 program, to determine the main stiffnesses of the soil. In turn, the structural modeling of the bridge was carried out in the CSI Bridge v22 program, considering the properties collected and the stiffnesses of the soil. The calculation of the structural responses applies spectral modal analysis together with the methodology of the FEMA 356 and FEMA 440 regulations. Additionally, the seismic performance is the development by the application of the ATC-40 methodology that allows the level of performance to determine the level of vulnerability using the risk-UE methodology (2003). The obtained seismic responses show a variation of the structural responses both in increase and decrease in shear forces, bending moments, fundamental period, and others. Meanwhile, in the seismic performance, the variation is minimal considering the flexible soil with or without gravel columns.

**Keywords:** Soil-structure interaction, static nonlinear analysis, seismic performance, seismic responses.

## INTRODUCCIÓN

La obtención de las respuestas sísmicas de las estructuras tanto en edificaciones como obras civiles es de suma importancia porque permiten evaluar si las estructuras actuarán bien frente a acciones sísmicas. Frente a dicho concepto, los puentes al considerarse obras de tipo esenciales tienen que diseñarse para satisfacer los criterios de resistencia y servicio que permiten asegurar el constante funcionamiento y las vidas humanas.

Por tal motivo, la evaluación de las respuestas sísmicas cobra gran importancia a nivel nacional e internacional, mediante la creación de normativas y reglamentos de diseños, que presentan diferentes tipos de metodología de cálculo y evaluación de respuestas sísmicas, considerando las propiedades geométricas y de los materiales. Uno de los métodos más utilizados que permiten la obtención de las respuestas sísmicas es el método Modal Espectral para el cálculo de las respuestas estructurales tales como desplazamientos, periodos fundamentales, momentos flectores y otros. Pero, si se requiere un análisis más detallado que permitan observar el comportamiento no lineal de la estructura de manera global, se realiza el Análisis No lineal Estático denominado Pushover, donde se determina un comportamiento más real frente a cargas laterales incrementales, simulando un sismo, tal como sucede en un sismo. Adicionalmente, dicha curva de capacidad obtenida se compara con el espectro sísmico para determinar el desempeño sísmico que ayuda a calcular el nivel de vulnerabilidad de una estructura, frente a un sismo de diseño.

Estas metodologías normalmente se realizan con una cimentación con una rigidez infinita, sin deformaciones, ocasionando variaciones de las respuestas reales. Por tal motivo, si se considera el aporte del suelo, la cimentación puede influir en el cambio de

las respuestas sísmicas a través del efecto de la interacción suelo estructura, que toma en cuenta las propiedades del suelo, geometría de la cimentación, nivel de desplante y otros.

La presente investigación desarrolló el modelamiento del puente de la avenida Sánchez Cerro, considerando las propiedades geométricas y de los materiales en el programa CSI Bridge v22. Adicionalmente, se considera las propiedades del suelo, tipo de cimentación, nivel de profundidad, estratos y demás propiedades observadas, para determinar las rigideces del suelo a analizar, considerando un modelo geotécnico 2D en el programa Plaxis V20. Estas rigideces del suelo calculadas se analizan en el modelo estructural, obteniendo las respuestas sísmicas bajo los efectos de la interacción suelo estructura, observándose una variación de respuestas estructurales y desempeño sísmico frente al método convencional (con base empotrado).

La distribución de los capítulos de la investigación se presenta de la siguiente forma:

El capítulo 1 consta del planteamiento del problema donde se describe el problema a estudiar. En este capítulo, se divide en la descripción, que presenta las causas del problema tal como la descripción de la solución utilizada, frente a la problemática actual referente del puente de la avenida Sánchez Cerro. Adicionalmente, se describe los problemas generales junto con los problemas específicos, para seguir en el planteamiento de los objetivos de la investigación-

En el capítulo 2, se desarrolla el marco teórico, dividido en marco histórico, en el cual se describe una breve historia de las variables de estudio. Además, se presentan las investigaciones relacionadas con el tema, divididas en investigaciones nacionales e internacionales, que servirán de base teórica para la presente investigación. Asimismo, se desarrolla la estructura teórica y científica tales como columnas de grava, interacción suelo-estructura, modelamiento numérico estructural y geotécnico, análisis estructural y

respuestas sísmicas de la subestructura. En la parte final del capítulo se plantea la hipótesis y las variables del estudio.

En el capítulo 3, se presenta el marco metodológico, dividido en el tipo, método y diseño de investigación en conjunto con la población y la muestra. Además, se presenta las técnicas e instrumentos de investigación para realizar el estudio donde se recopilará y analizará la información necesaria, para desarrollar el estudio. La parte del capítulo consiste en la descripción del procedimiento, que explica la secuencia del tratamiento de datos hasta la salida de resultados.

En el capítulo 4, se presenta resultados y análisis de resultados. La primera parte de resultados, queda dividido en descripciones del modelo, donde se ordena la información recopilada en campo, siguiendo la metodología de estudio, en cual explica el tratamiento de datos hasta llegar a las conclusiones y recomendaciones. Luego, se presenta los resultados de las variables: efectos de la interacción suelo-estructura y respuestas sísmicas, ambas divididas de acuerdo las dimensiones de cada variable. En la segunda parte, se presenta la discusión de resultados para el análisis de los resultados frente a las hipótesis planteadas.

Finalmente, en el capítulo 5, se desarrollan las conclusiones y recomendaciones del estudio.

## **1. Planteamiento del problema**

### **1.1 Descripción del problema**

El constante riesgo sísmico presente en el Perú es uno de los principales factores durante la ejecución, operación y puesta en marcha de diferentes proyectos civiles y edificaciones donde “los daños serían cuantiosos” (Yauri, 2017) si no hay una adecuación evaluación y planeación frente a sismos. Esto se debe a la continua exposición de los elementos estructurales por las enormes fuerzas que se producen en el durante el sismo, generando respuestas que necesitan ser verificadas a través del desempeño estructural. En tal sentido, uno de los principales elementos estructurales que recibe el mayor daño debido al efecto de sismo es la cimentación porque posee la capacidad de soportar las fuerzas de la estructura en su totalidad, tanto así que una fuerza horizontal sísmica puede ocasionar grandes respuestas estructurales que necesitan ser evaluados a través de métodos numéricos o experimentales actuales (Mylonakis et al, 2006).

El suelo al servir de apoyo de la cimentación recibe las demandas y respuestas por parte de la superestructura; por tanto, se debe conocer los parámetros de suelo para permitir un correcto comportamiento frente a las demandas deseadas. Así mismo, el correcto trabajo conjunto de la estructura y el suelo, permite una mejor idealización frente a demandas externas tales como sismos o cargas de gravedad, en consecuencia, para realizar un correcto diseño se debe evaluar los efectos de la interacción suelo-estructura que permite calcular las respuestas sísmicas de un comportamiento real frente al modelamiento convencional que considera que el suelo es infinitamente rígido frente a deformaciones y esfuerzos (apoyo empotrado).

Los puentes en su mayoría pueden ubicarse en zonas urbanas, tal es el caso de un puente ubicado en la avenida Sánchez Cerro, Piura, donde se observa una alta saturación de agua, presencia de arenas medias y bajas, con una baja cohesión y alto grado de

compresibilidad que son características principales de suelos licuables. Además, una posible fuerza excitadora de tipo horizontal (fuerza sísmica) corresponde un peligro inminente en las estructuras que sean cimentadas sobre este tipo de suelos por los daños que pueden ocurrir. Esta problemática requiere una solución técnica, tal como lo permite el mejoramiento de los suelos, frente a la acción del sismo, la cimentación siga su cumpliendo su función. Una solución geotécnica es el uso de columnas de grava, que permite confinar la estructura circundante a las gravas, aumentando la capacidad portante, cohesión y otros. De igual forma, dado al gran problema de la licuación, el suelo se comporta como un fluido por las fuerzas excitadoras horizontales, entonces, las columnas de grava actúan como un sistema permeable que mantiene su rigidez por sus inclusiones de mayor rigidez durante la acción sísmica (Kuroiwa, 2012). En consecuencia, las columnas de gravas funcionan como sistema de protección frente acciones de licuefacción (Castro et al, 2016), para que el puente siga cumpliendo su propósito, la transitoriedad después del sismo.

Al observarse un suelo de tipo licuable con baja capacidad portante, los efectos de la interacción suelo estructura afectan la obtención de las acciones sísmicas disminuyendo o aumentando las respuestas sísmicas. No obstante, para lograr la correcta interacción suelo-estructura se desarrollará el procesamiento numérico basado en ensayos geotécnicos de campo y el análisis documental para la caracterización del suelo, mientras que la estructura se realizará de acuerdo a los planos existentes tanto en geometría y materiales, ya que no existe literatura a nivel nacional para abordar dicho problema frente a fuerzas sísmicas para la obtención de la respuesta sísmica de la subestructura del puente.

## **1.2 Formulación del problema**

### ***1.2.1 Problema general***

El autor al observar la problemática realiza la siguiente pregunta:

¿En qué medida la interacción suelo-estructura afecta en la obtención de la respuesta sísmica en la subestructura con columnas de grava a través del modelamiento numérico del puente en la avenida Sánchez Cerro?

### ***1.2.2 Problemas específicos***

1. ¿En qué medida los parámetros geotécnicos del suelo afectan en la obtención de las respuestas estructurales en la subestructura a través del modelamiento numérico del puente en la avenida Sánchez Cerro?
2. ¿Se piensa que los parámetros geotécnicos del suelo afectan en la obtención del desempeño estructural en la subestructura a través del modelamiento numérico del puente en la avenida Sánchez Cerro?
3. ¿Se piensa que los parámetros de las columnas de grava afectan la obtención de las respuestas en la subestructura a través del modelamiento numérico del puente en la avenida Sánchez Cerro?

## **1.3 Importancia y justificación del estudio**

### ***1.3.1 Importancia***

El constante riesgo sísmico en la zona costera ha sido demostrado por terremotos de grandes magnitudes o por sismo de altas intensidades a lo largo de la historia (Yauri, 2017). Esto ha inculcado que el estudio sea continuo por parte del gobierno a través de ministerios, universidades, institutos de investigación u otras instituciones. Incluso por fenómenos de geodinámica interna de la tierra, a lo largo de la zona costera se observan fallas normales e inversas de origen tectónico de forma activa o pasiva.

Por tanto, el conocimiento del suelo debe ser realizado correctamente de acuerdo a ensayos de campos tales como indican las normativas presentes (Reglamento Nacional de Edificaciones), junto a la identificación y caracterización de las demandas externas

(sismo). No obstante, una mala caracterización del suelo no ayudará a reflejar el comportamiento real de las estructuras para la obtención de las respuestas sísmicas.

Agregando a lo anterior, la alta transividad entre dos puntos es un factor importante en el alcance de las obras viales, que condiciona la mejora de la calidad de vida del usuario. Una de las obras más representativas son los puentes, porque pueden conectar lugares distantes e inaccesibles; dichas estructuras al dejar de funcionar afectan directamente a la población circundante de tal forma que la conexión entre lugares puede ser anulada y, consecuentemente, perjudicial para su economía (obras esenciales) (Aranis, 2006). Entonces, frente a eventos catastróficos, sismos u otros, se debe asegurar el correcto funcionamiento de los puentes y evitar el colapso, incluyendo todos sus elementos estructurales, tablero, pilas, estribos y cimentaciones, en consecuencia, para lograr dicha filosofía se requieren soluciones técnicas y accesibles que aseguren el correcto funcionamiento de la estructura frente a un sismo o terremoto tal como se expresa en códigos nacionales e internacionales.

Por lo expuesto, anteriormente, el suelo donde se va cimentar la estructura, junto con la estructura misma adquiere un rol importante frente a eventos sísmicos, por tanto, ambos deben ser evaluados para determinar un correcto modelamiento. De esta forma, se observa que la interacción suelo-estructura conlleva efectos que pueden afectar las respuestas de las estructuras debido a la modificación de las propiedades dinámicas del suelo tanto como un aumento o disminución de los periodos, fuerzas, deformaciones u otros, considerando una base deformable. Según Gómez et al (2000) se necesita la aplicación de métodos analíticos para la evaluación de puentes frente a fuerzas dinámicas, obteniéndose la vulnerabilidad teórica del puente. Adicionalmente, en el Manual de puentes (2016) del Ministerio de Transporte y Comunicaciones en la sección 2.6.3.3 indica que el modelamiento de las condiciones de borde de un puente deberá ser modelado

con la parametrización del suelo, considerando las propiedades geotécnicas obtenidas en campo.

En consecuencia, el efecto de la interacción suelo-estructura está presente en el diseño estructural de puentes porque para un correcto comportamiento de los elementos de la estructura se necesita saber las condiciones de borde (suelo, tipos de apoyo, materiales y otros) de acuerdo a las demandas externas (fuerzas sísmicas y gravitacionales) para la obtención de las respuestas estructurales.

### ***1.3.2 Justificación***

#### **Justificación teórica**

La presente investigación tiene una justificación teórica porque aplica y valida los modelos del FEMA 356/440<sup>1</sup> del suelo para modelar la interacción suelo-estructura y determinar la influencia en la obtención de las respuestas sísmicas, aplicando el análisis no lineal frente a efectos sísmicos a través de un modelamiento computacional 3D del puente, considerando un mejoramiento de suelo con columnas de gravas. Asimismo, se evaluó el desempeño estructural aplicando la metodología de risk-UE<sup>2</sup> (2003) que considera la ductilidad del puente frente a un desplazamiento objetivo calculado de acuerdo a la normativa ATC-40 acorde a la interacción suelo-estructura y una cimentación con empotramiento perfecto. El modelamiento del puente y del suelo se realiza con el método de elementos finitos para realizar una correcta simulación de acuerdo a los datos obtenidos inicialmente de acuerdo a un análisis documental.

#### **Justificación metodológica**

Porque se utilizó un método propuesto por las normativas del FEMA, basados en el análisis documental computacional y experimental para la calibración de otros modelos

---

<sup>1</sup> Pre-estándares y comentarios para la rehabilitación sísmica en edificaciones preparada por Federal Emergency Management Agency y American Society of Civil Engineers.

<sup>2</sup> Vulnerabilidad de edificaciones preparado por Milutinovic & Trendafiloski (2003).

matemáticos computacionales que utilicen diferentes softwares de cálculo estructural como instrumentos. De esta forma, este estudio constituye la base metodológica para otros, que consideren técnicas de mejoramiento de suelos con columnas de grava, considerando la interacción suelo-estructura.

#### **Justificación económica:**

La presente investigación tiene una justificación económica porque la aplicación de modelos de interacción suelo estructura puede ayudar a reducir las dimensiones geométricas de los elementos estructurales. En otras palabras, el suelo aporta rigidez al sistema estructural, lo que puede llevar a una reducción de materiales y recursos para la construcción. Además, al considerar la rigidez del suelo y un análisis no lineal estático, se obtendrá una capacidad final de la subestructura frente a efectos de sismo, considerando la geometría y el refuerzo utilizado, lo que puede generar un importante ahorro en la cimentación, representando una optimización de la subestructura.

Finalmente, una importante parte de la inversión de una estructura se encuentra en la subestructura, tanto así que la utilización de columnas de grava en la cimentación ayudó al correcto funcionamiento en suelos tipo de blando, que, frente a soluciones convencionales (pilotaje), resulta en disminución de utilización de recursos y presupuesto. La aplicación de columnas de grava puede ser utilizada en diferentes tipos de proyectos que tengan problemas de licuefacción y se encuentren en zonas sísmicas; ya que, la permeabilidad del material permite la eliminación de presiones de agua ocasionadas por el efecto sísmico correspondiente al efecto de licuefacción, ayudando a asegurar el correcto desempeño estructural.

#### **Justificación práctica**

La presente investigación es útil como antecedente para el desarrollo de futuras investigaciones con modelos más exhaustivos que consideren la influencia de la

interacción suelo-estructura para estructuras de todo tipo, tales como puentes, edificaciones u otros. En virtud a lo desarrollado, esta investigación servirá en el análisis, diseño y verificación de estructuras cimentadas en diferentes tipos de suelo desarrollado por profesionales e investigadores relacionados al campo de la ingeniería estructural y/o geotécnica porque brindará recomendaciones para una simulación de un comportamiento más real frente a sismos, utilizando el modelamiento computacional. Además, se desarrolló el desempeño estructural frente acciones sísmicas de gran magnitud para determinar el estado de vulnerabilidad de un puente para la salvaguardar la vida de la población circundante y evitar un posible colapso.

### **Justificación social**

La justificación social dentro de la investigación está presente debido al alto grado de sismicidad observado durante años, que ocasionan un gran problema que afecta a las estructuras civiles y viales que utiliza la población; en tal sentido, los puentes tienen la función de conectar de distintos lugares antes y después del sismo, es decir, la estructura no debe colapsar por ser estructuras de gran importancia. Por tanto, según manuales y normativas actuales, manual de puentes del MTC<sup>3</sup>, AASHTO<sup>4</sup> y FHWA<sup>5</sup>, los elementos estructurales, principalmente, los pilares de los puentes deben entrar en rango inelástico siendo elementos que tengan una alta ductilidad de respuesta, por ello deben ser diseñados y verificados exhaustivamente, para que luego de ocurrido el sismo se puedan reparar sin afectar el funcionamiento y sin poner en peligro las vidas humanas que lo utilizan.

---

<sup>3</sup> Ministerio de Transporte y Comunicaciones

<sup>4</sup> Asociación que establece normas para la construcción y diseño de obras viales en Estados Unidos (American Association of State Highway and Transportation Officials)

<sup>5</sup> Federal Highway Administration

## 1.4 Delimitación del estudio

- **Delimitación espacial:** La investigación tiene como principal objetivo la obtención de las respuestas sísmicas de la subestructura del puente en la avenida Sánchez Cerro, ubicado en Piura, Perú.
- **Delimitación temporal:** Los datos usados en esta investigación fueron obtenidos de una campaña geotécnica realizada en el 2016 para el “*Mejoramiento de la avenida Sánchez Cerro, tramo avenida Gullman - avenida Chulucanas, Piura-Piura*”; de igual manera, la geometría del puente y las columnas de gravas han sido obtenidas de acuerdo a los planos existentes del proyecto mencionado. Estos datos servirán para realizar el modelamiento y análisis de los resultados para la obtención de la respuesta sísmica de la subestructura.
- **Delimitación teórica:** En la presente investigación se procede a desarrollar los efectos interacción suelo-estructura de forma analítica y computacional, aplicando el tratamiento de terreno mediante las columnas de grava para la obtención de las respuestas sísmicas de la subestructura.
- Posible cambio de datos por desastres naturales, en el caso de la investigación puede ser un sismo de gran magnitud, el fenómeno del Niño o las condiciones climáticas del lugar

## 1.5 Objetivos de la investigación

### 1.5.1 General

- Determinar los efectos de la interacción suelo-estructura para la obtención de la respuesta sísmica en la subestructura con columnas de grava a través del modelamiento numérico del puente en la avenida Sánchez Cerro.

### ***1.5.2 Específicos***

1. Determinar los efectos de los parámetros geotécnicos del suelo para la obtención de las respuestas estructurales en la subestructura a través del modelamiento numérico del puente en la avenida Sánchez Cerro.
2. Determinar los efectos de parámetros geotécnicos para la obtención del desempeño estructural en la subestructura a través del modelamiento numérico del puente en la avenida Sánchez Cerro.
3. Determinar los efectos de los parámetros de las columnas de grava para la obtención de las respuestas estructurales en la subestructura a través del modelamiento numérico del puente en la avenida Sánchez Cerro.

## 2. Marco teórico

### 2.1 Marco histórico

Según Carvajal et al. (2014) las columnas de grava mediante vibro-sustitución tienen sus orígenes en los años 1960s, a partir de la mejora tecnológica de los primeros equipos de vibración profunda desarrollados por la empresa alemana Keller desde los años 1930. En principio, la vibro-compactación o vibro-flotación era la única técnica de vibración profunda conocida. Esta consiste en la introducción al terreno de un vibrador ayudado por un caudal de agua, con el objetivo de producir su densificación.

En 1972 el grupo Keller introdujo una nueva generación de equipos, a partir de los cuales es posible ejecutar los tratamientos mediante columnas de grava en “vía seca” (bottom-feed method). Este nuevo método sustituyó al vibrador con chorro de agua usado en la vía húmeda, por un vibrador con aire comprimido que se acopla a un tubo alimentador y este a su vez a la tolva donde se deposita la grava para que discurra por todo el sistema, hasta su descarga final por el orificio de salida situado en la parte inferior del vibrador. Priebe (1995) desarrolló un método simplificado analítico para el diseño de las columnas de grava, este diseño servirá de base para futuras investigaciones que dependan para caracterizar las columnas de grava. Años más tarde, Castro (2008) desarrolló una investigación doctoral acerca del refuerzo o mejoramiento de columnas de gravas gracias al auspicio del Ministerio de Fomento, Ministerio de Educación y Ciencia de España porque el uso de esta técnica ayuda a mitigar en gran proporción los efectos de licuación, capacidad portante, asentamientos y otros en suelos blandos. El autor realizó una investigación bibliográfica respecto a los avances técnicos y teóricos, consideraciones y aplicaciones reales para desarrollar un modelo matemático simple que considera los efectos de interface entre columnas-suelos, consolidaciones, saturación y otras condiciones de borde. Se concluyó que las columnas de grava deben ser analizadas

en modelos simplificados que tomen en cuenta la consolidación, la permeabilidad, la capacidad portante y la deformación radial de los subdrenes que actúan a largo plazo por efecto de las cargas actuantes. Además, se recomendó que debe realizarse futuras investigaciones respecto a los modelos numéricos como planares en 2D y en 3D.

Actualmente, las columnas de grava tienen estudios experimentales y no experimentales, consiguiendo resultados favorables en la caracterización de sus propiedades.

La interacción suelo estructura se refiere a un fenómeno dinámico y estático de una estructura con el suelo; a su vez, el efecto sísmico está presente porque la amplificación de las ondas sísmicas depende del punto de origen y sus propiedades, según Kausel (2010) se plantea los siguientes problemas:

- Respuesta del suelo a diferentes tipos de cargas dinámicas o estáticas
- Respuesta del suelo debido a efectos de excitación sísmica o debido a otras estructuras, por ejemplo, trenes de movimientos rápidos.
- Interacción cinemática en estructuras rígidas.
- Respuesta ideal de cimentaciones, mediante la aplicación de fuerzas dinámicas y estáticas, mostrándose el efecto de la rigidez cinemática.
- Deformaciones adicionales por estructuras cercanas a la estructura a estudiar.
- Diversos métodos que sirven para analizar dichos problemas (métodos de elementos finitos, condiciones de borde, y otros).

De acuerdo a Kausel (2010) al tratar de solucionar el problema de la determinación de las cargas verticales se inicia el estudio de la teoría estática de ISE, donde se buscaba la solución al cálculo de las cargas puntuales y distribuidas en un medio conocido continuo, generándose diferentes teorías de solución. Asimismo, por ejemplo, la teoría desarrollada por Boussinesq(1885, en Kausel, 2010) relaciona que la carga aplicada,

módulo de corte, módulo de Poisson y la geometría de la cimentación; Terzagui (1893, en Kausel, 2010) plantea la estabilidad y la capacidad de soporte; consecuentemente, el conocimiento evoluciona hasta plantear una solución considerando una rigidez torsional expuesta por Reissner y Sagoci (1944, en Kausel, 2010); posteriormente, se plantea el cálculo de la rigidez horizontal en 1949 por Mindlin considerando el efecto de las fuerzas tangenciales.

En el caso de la interacción dinámica se procedió a realizar un estudio acerca del efecto de las funciones cinemáticas, incluyendo el sismo, con respecto a las estructuras desde los años 1944 hasta la actualidad, todo esto referido al suelo, brindando soluciones que consideren las características de las ondas sísmicas, propiedades de los materiales y geometría para la cimentación.

Luego, según Kausel (2010), desde 1960 hasta 1970, se inició la entrada de las computadoras lo que trajo consigo la ampliación de la utilización de los métodos numéricos para solución de problemas científicos, método de elementos finitos, así se buscaba solucionar problemas de la mecánica de suelos, tales como la determinación de las funciones de impedancia en una zapata rectangular en un medio elástico. Durante esta época se observaron las soluciones derivadas del campo libre de deformaciones, aplicando resortes a la estructura como representación del suelo, donde se determinó una solución de tres pasos:

- Interacción cinemática: se considera la posición de la estructura con respecto al suelo en un campo libre, en otras palabras, las características presentes si la cimentación está embebida.
- Rigidez de la cimentación: se determina la frecuencia de la cimentación para la función de impedancia.

- Interacción inercial: se considera el efecto de la interacción cinemática junto con la rigidez de la cimentación.

A partir del planteamiento de las soluciones de tres pasos para el ISE, diversos autores prosiguieron a desarrollar investigaciones considerando el efecto, por ejemplo, Dobry & Gazetas (1986) en su trabajo denominado “Dynamic response of arbitrarily shaped foundations” determina la rigidez dinámica y rigidez de amortiguamiento en zapatas rígidas de acuerdo a resultados analíticos para ser aplicados a diferentes formas de cimentaciones. Priestley et al. (1996) en su libro “Seismic Design and Retrofit of Bridges” explicó la importancia de la interacción suelo-estructura, debido a que los métodos convencionales condicionan que la base que fija a la subestructura sea de tipo empotrada, por tanto, la geometría de la subestructura, pilares y estribos se consideran como elementos grandes y grotescos, de igual forma la cimentación. Esta imposición se puede aplicar cuando se cimienta en rocas rígidos o usando cimentaciones profundas como medida de transmisión de esfuerzos al suelo, caso diferente a sistema que son cimentados sobre suelos de baja capacidad portante. En cambio, si se cuenta con los resortes verticales característicos del suelo, junto a la resistencia horizontal pasiva, la cimentación puede ser modelada para estudiar las respuestas estructurales de la cimentación.

Investigaciones relevantes a la normativa AASHTO (2017) consideran que el suelo juega un rol primordial en el dimensionamiento de la estructura de los puentes, porque debido a las condiciones iniciales y finales, desplazamientos, deformaciones y rotaciones, durante y después el sismo, para el tipo del colapso que sea diseñado, en otras palabras, la interacción suelo estructura es un elemento fundamental en el diseño estructural.

Métodos convencionales de diseño han sido usados a lo largo de los años, estos métodos han tomado en consideración la seguridad de la estructura junto con la serviciabilidad.

Según Ghobarah (2001) el diseño por desempeño estructural es una filosofía que viene siendo aplicada de acuerdo a objetivos de desempeño, este método es mejor que aplicar el diseño basado por esfuerzos porque considera el estado de daño, deformaciones y tensiones de las estructuras. El desempeño estructural se presenta en tres documentos los cuales son SEAOC Vision 2000 (1995), ATC-40 (1996) y FEMA 273 (1997).

El objetivo principal de la normativa propuesta por SEAOC Vision 2000 (1995) fue desarrollar un diseño sísmico que tome en cuenta la vida de los ocupantes a través de lineamientos y comentarios para que formen un nuevo sistema de códigos sísmicos. Se desarrollaron cinco niveles de desempeño sísmico de acuerdo a las derivas máximas admisibles.

De similar manera, la normativa ATC-40 (1996) busca diseñar en función a un máximo daño de la estructura, en otras palabras, se busca el desarrollo de los niveles de desempeño. Estos niveles de desempeño están diseñados de acuerdo a los daños ocasionados a los movimientos de la tierra. Normalmente, el diseño se debe basar en los alcances de diseño que el dueño busca satisfacer. Una vez seleccionado el criterio de diseño, se procede a realizar el análisis y demanda del sismo a utilizar. El método utilizado para las estructuras se refiere íntegramente al diseño de espectro de capacidad, que consiste en la utilización de la curva capacidad y el espectro de demanda sísmica, consiguiendo un punto de desempeño sísmico, este diseño se refiere exclusivamente a la suposición de que la estructura trabajará como un sistema de un solo grado de libertad.

La normativa FEMA 273 (1997) provee lineamientos para la rehabilitación sísmica de estructuras a través del desempeño sísmico de estructuras. Además, la

normativa considera la adición de métodos de análisis tales como lineal estático, lineal dinámico, no lineal estático y procedimientos para no lineal dinámico denominada tiempo historia basados en los lineamientos indicados del FEMA 273.

Las normativas mencionadas anteriormente son los pilares para el continuo desarrollo del diseño basado en desempeño estructural, aplicando análisis no lineal para la obtención de las respuestas sísmicas de las estructuras.

## **2.2 Investigaciones relacionadas con el tema**

Debido a la complejidad del tema se consideraron investigaciones relacionadas mayores a cinco años porque la información brindada sirve de referencia para autores modernos, tales como lineamientos de diseño, interacción suelo estructura, propiedades constitutivas de las columnas de grava, diseño por desempeño, entre otros.

### **2.2.1 Investigaciones nacionales**

Marín (2019) desarrolló su tesis de maestría “Influencia de la interacción suelo-estructura en el desempeño estructural de puentes continuos de concreto armado sometidos a la acción de cargas sísmicas en suelos arenosos”. El objetivo fue determinar el efecto de la influencia de la interacción suelo-estructura para calcular analíticamente las respuestas dinámicas de un puente en suelos densos, realizando un modelamiento numérico 2D de un puente continuo, aplicando las teorías de Mohr-Coulomb para la representación no lineal del suelo y la metodología de Barkan-Savinov por el método de análisis de elementos finitos. El enfoque es cuantitativo, experimental, transversal y correlacional/causal. La muestra y población se realizó en un suelo arenoso semi denso y estructuras de puente a través del modelamiento analítico-matemático. Las técnicas utilizadas en la investigación son la recolección de información del estado de arte hasta la fecha de la publicación, mientras la técnica fue la recopilación de modelos matemáticos y experimentales publicadas. El autor resaltó que la influencia de la interacción suelo-

estructura es importante para el cálculo estructural, porque al incluir las propiedades del suelo, las respuestas estructurales dinámicas obtenidas permiten una optimización a nivel de diseño, resistencia o fatiga. En tal sentido, la investigación confirma que el factor de suelo es importante para el diseño estructural de puentes, porque dicho parámetro puede llevar a mayores o menores demandas.

Este estudio es importante porque permite identificar los modelos analítico-matemáticos de la interacción suelo estructura considerando suelos tipo denso, ya que en la presente tesis se procederá a aplicar el modelo Mohr-Coulomb para el suelo y el modelamiento de puentes utilizando el método de elementos finitos.

Huamán (2018) desarrolló una investigación aplicada denominada con el título “Respuesta dinámica por los modelos de cálculo de interacción suelo estructura del FEMA y norma E030-2016 del edificio de comando de control ribereño – Iquitos”. Su objetivo principal fue determinar los principales efectos de la influencia de interacción suelo estructura, aplicando la metodología de la base rígida de la norma E030-2016 como control de resultado, para luego ser comparado con la metodología de la base flexible del FEMA, que considera la interacción suelo-estructura. El enfoque es cuantitativo, de tipo descriptivo y diseño correlacional. La muestra fue el edificio el edificio de comando de control ribereño de la Marina de Guerra del Perú, ubicado en la ciudad de Iquitos. El resultado más importante es que el modelo de interacción suelo-estructura del FEMA demuestra un margen de seguridad mucho mayor al de la normativa de base rígida de la normativa E030-2016, observándose respuestas dinámicas mayores para el diseño de los elementos estructurales.

El principal aporte de esta investigación para el presente porque sirve como guía de inicio en la metodología de diseño base flexible del FEMA, ya que se aplicará para el puente en la avenida Sánchez Cerro.

Vargas (2017) desarrolló un estudio titulado “Evaluación del desempeño sísmico de puentes continuos”. El objetivo principal es aplicar la evaluación sísmica de puente, aplicando los métodos de dinámico incremental y simulación de Montecarlo usando redes neuronales artificiales para la generación de curvas de fragilidad. El enfoque es cuantitativo, descriptivo y correlacional. Las muestras usadas fueron 2 puentes, el puente “Angélica Gamarra” y el puente “Norte-Sur”. El resultado más importante es determinar el nivel de desempeño sísmico de los puentes, donde se observa para sismos raros las estructuras entran a la zona de control de daños, sin entrar a la zona de seguridad. En cambio, para sismos muy raros alcanzan el límite de seguridad, sin llegar a la prevención de colapso.

Este estudio sirve para la presente investigación como literatura para determinar el desempeño sísmico de puentes continuos, ya que la presente tesis evaluará un puente de tipo continuo.

Urteaga (2016) desarrolló una investigación nombrada “Nivel de desempeño sísmico del edificio N° 01 de la Institución Educativa San Ramón (Anexo Chontapaccha) considerando la interacción suelo estructura”. El objetivo principal de la investigación fue evaluar el desempeño estructural de la estructura frente a un sismo de 6.1 a 6.9 en la escala de Richter con la metodología FEMA 420 debido a la antigüedad del edificio, aproximadamente 60 años. El enfoque es cuantitativo, descriptivo y correlacional. La muestra fue el edificio N°01 de la Institución Educativa San Ramón. El resultado más importante es observar un aumento de fuerzas cortantes en la base, derivas y periodos, aproximadamente de 30% considerando la interacción suelo-estructura, además, a nivel de desempeño estructural se observa un daño de tipo moderado, no excluyendo la futura evaluación para un sismo de mayor magnitud.

El aporte de este estudio en la presente investigación es servir como antecedente inicial en la aplicación de la metodología de evaluación del desempeño estructural denominada FEMA 420 porque se aplicará un método similar.

Condori (2016) en su tesis de doctoral desarrolló un estudio titulado “El contenido de humedad en la simulación del comportamiento elastoplástico de los suelos, Huancayo en el año 2016”. El objetivo de la investigación es estudiar los efectos del contenido de humedad bajo el modelamiento elastoplástico de los suelos, tomando como ejemplo los suelos de Huancayo. La investigación obedece al método deductivo, tipo aplicada, nivel explicativo, diseño experimental. Se ensayaron un total de 20 muestras de suelos de las cuales 10 de grupo de control y 10 de grupo experimental. Los instrumentos utilizados fueron equipos de laboratorio geotécnico tales como ensayos triaxiales, tamices, copa de Casagrande, horno y otros. El resultado más resaltante es el efecto ocasionado por la humedad demostrada a partir del modelamiento numérico bajo las leyes elastoplásticas del suelo, observándose variación de desplazamientos y esfuerzos. Además, se presentaron las diferentes propiedades del suelo y las columnas de grava, utilizando el modelo Mohr-Coulomb y lineal elástico, junto a los parámetros geotécnicos del suelo determinados por ensayos de laboratorio.

Este estudio brinda los lineamientos iniciales para el modelamiento de las columnas de grava de forma numérica, aplicando los modelos constitutivos indicados para el proceso de validación y calibración de resultados que ayudaran a determinar los balastos del suelo necesarios de la interacción suelo-estructura.

### ***2.2.2 Investigaciones internacionales***

Sansiya et al (2021) desarrollaron un estudio denominado “Structral Behavior of Concrete Bridge with Soil-Structure Interaction”. El objetivo principal fue determinar la influencia de la ISE en el puente, exclusivamente en los estribos. El enfoque de la

investigación es cualitativo, exploratorio, descriptivo. La población de estudio fueron puentes rectos integrales apoyados en estribos de concreto armado, mientras las muestras fueron el puente recto apoyado en diferentes tipos de condiciones de bordes, tales como, empotrado y suelo flexible. Los resultados más importantes es la diferencia sustancial de los valores de las principales estructurales (momentos y fuerzas cortantes) considerando un apoyo flexible y un apoyo empotrado. Además, se presenta un método simplificado considerando fuerzas en área como aplicación para las respuestas, conociendo las propiedades del suelo, entre ellas el módulo de corte del suelo. En puentes integrales el conocimiento de la aplicación de ISE permite plantear mejores soluciones tanto en diseño como en el proceso constructivo.

Este estudio es importante para la tesis porque permite demostrar que la consideración de la ISE causa diferencias importantes en las respuestas estructurales (momentos flectores y fuerzas cortantes).

Forcellini (2021) desarrolló el estudio denominado “Analytical fragility curves of shallow-founded structures subjected to Soil-Structure Interaction (SSI) effects”. El objetivo principal fue desarrollar el análisis de los efectos ocasionados por la interacción suelo estructura, desarrollando la curva de fragilidad de la edificación en un modelamiento conjunto del suelo y de la estructura. El enfoque de la investigación es cualitativo, exploratorio, descriptivo. La población de estudio fue edificaciones de concreto armado con cimentación de pilotes de concreto armado, las muestras fueron dos edificaciones en 3D, ambas fueron de concreto armado, mientras el suelo fue modelado con pilotes de concreto armado. Los resultados más importantes fueron que el modelamiento del suelo influye en la respuesta sísmica de las estructuras, se graficaron las curvas de fragilidad considerando el modelamiento clásico y el modelamiento con interacción suelo estructura. Se presenta una alta vulnerabilidad considerando el efecto

ISE, es decir, frente a un evento sísmico la configuración estructural puede tener más daños a sus elementos principales si se incrementa la deformabilidad del suelo. En consecuencia, este efecto debe considerarse en las normas de diseños para evitar el peligro de las estructuras en suelos de alta deformabilidad.

Este estudio es importante para la investigación porque nos brindan algunas simplificaciones a tomar en el modelamiento del suelo con la estructura; además, demuestra la influencia de la ISE en las estructuras.

Castro et al. (2016) desarrollaron una investigación denominada “Modelización de columnas de grava”. El objetivo principal fue realizar una recopilación de información respecto al modelamiento de columnas de grava sin considerar el potencial licuable en arenas muy blandas para marcar un precedente en la investigación numérica. Por ello, recomendaron los métodos de modelamiento tales como modelo tridimensional completo, celda unidad, zanjas de columnas longitudinales, anillos de columnas, terreno equivalente y rebanado tridimensional de columnas. El enfoque de la investigación es cualitativo, exploratorio, descriptivo. La población fue el estudio de las columnas de grava, aplicando la técnica de análisis de datos con el instrumento de registro de contenido del documento. El resultado más importante fue brindar algunas recomendaciones acerca del modelamiento por cada tipo de modelo, consideraciones tales como permeabilidad, relación entre interface suelo columna de grava, presiones admisibles máximas y otros. Además, algunos valores importantes para el modelamiento tales como las propiedades de las columnas de grava de acuerdo al tipo de grava utilizada, propiedades de interface y otros. Los autores recomendaron el uso de modelos tridimensionales de una franja de columna porque en la actualidad la capacidad computacional no requiere de hipótesis o transformaciones adicionales.

El aporte principal para la presente investigación fue la revisión de los modelos propuesto para el modelamiento de las columnas de gravas, utilizando el método de los elementos finitos tanto como en las propiedades constitutivas y el modelamiento numérico.

Noura et Al. (2016) desarrollaron un estudio denominado “Three-dimensional modeling of a group of stone columns in Bouregreg Valley soft ground”. El objetivo principal fue modelar un grupo de columnas de grava en suelo blando, aplicando el método de elementos finitos y métodos analíticos. Se utilizaron diferentes datos de campo para la caracterización del suelo durante para el modelamiento analítico y numérico. El desarrollo del estudio se realizó mediante el modelamiento de las columnas de grava en el programa Plaxis 3D, este consistió en la variación del espaciamiento de las columnas de grava para determinar el factor de mejoramiento similar al método Priebe. El enfoque de la investigación es cuantitativo, experimental, correlacional, explicativo. La muestra tomada fue los parámetros de las columnas de grava en la campaña geotécnica “Boreg valley”, utilizando como instrumentos guías de observaciones, programas computacionales. El resultado más importante es que los efectos de la posición y la propiedad de la columna influyen en el factor de mejoramiento; el ángulo de fricción cuando aumenta, aumenta el factor de mejoramiento de las columnas; el módulo de elasticidad se observa que varía el valor de mejoramiento; los valores críticos para la longitud de la columna de grava deben darse entre 4 a 6 veces el diámetro de la columna.

Esta investigación es importante en la presente porque los resultados obtenidos servirán como caracterización de la dimensión columna de grava durante el proceso de modelamiento numérico.

Carvajal et al. (2014) desarrollaron el trabajo denominado “Columnas de grava mediante vibro-sustitución”. El objetivo principal fue realizar una recopilación de

información acerca del tratamiento de terreno de columnas de grava, considerando una breve historia acerca de la creación, así como los diferentes métodos de diseño, procesos constructivos, explicación del efecto de mejora del terreno circundante y la resolución del problema de interacción columna-suelo. Finalmente, se muestra diferentes casos de aplicación: Aerogeneradores en Oaxaca, México y Puerto ASMAR en Talcahuano, Chile. El primero consistió en la construcción y ejecución de columnas de gravas de longitudes entre 10 a 21m, ya que debe las torres tenían altitudes alrededor de 67m y debían ser cimentadas sobre terrenos de altos potenciales de licuación. El enfoque es cualitativo, aplicado, exploratorio, no experimental. La muestra incluye las columnas de grava aplicando el instrumento de recolección de datos. El resultado más importante es la descripción histórica del tratamiento y mostrar algunos modelos numéricos de las columnas de grava, mostrando un ejemplo de aplicación donde se observa la mejora de la capacidad portante, potencial de licuación y asentamiento del suelo de arenas limosas con presencia de limos sueltas ubicado en la zona Marína. Los autores concluyeron que las columnas de grava pueden mejorar suelos muy blandos o sueltos, permitiendo un sinfín de cimentaciones.

Este trabajo de investigación sirve para comprender la evolución histórica del método de tratamiento de columnas de grava, porque se va considerar en el marco histórico.

## **2.3 Estructura teórica y científica que sustenta el estudio**

### ***2.3.1 Marco Normativo***

En el presente trabajo se presenta la normativa referente al comportamiento estructural frente a eventos sísmicos, en dicho sentido, se procederá a dar una breve explicación de las normativas FEMA 356, FEMA 440 y Manual de Puentes (2016). Con

base a dichos lineamientos, se observa capítulos de interacción suelo estructura para un cálculo simplificado.

### **2.3.1.1 Federal Emergency Management Agency (FEMA)**

FEMA es una agencia de Estados Unidos que capacita y coordina con los gobiernos federales para asegurarse y responder frente a desastres. La agencia se creó el 20 de julio de 1979 durante el gobierno del presidente de Jimmy Carter, con la orden 12148, preparándose para la defensa civil y manejo de emergencia. Años más tarde, 1988, la agencia fue expandida en sus funciones correspondientes a manejo de desastres. Esta agencia ha seguido trabajando hasta donde se denotó su principal durante los sucesos del huracán Katrina en 2005, el gobierno brindó una autonomía absoluta como ente encargado del manejo de emergencia de Estados Unidos. En 2018, el huracán de Atlanta trajo consecuencias devastadoras, implicando al gobierno a invertir en el desarrollo de nuevas tecnologías para mitigar los efectos ocasionados. (FEMA, 2021).

Entre las principales normas planteadas por FEMA para determinar las respuestas sísmicas considerando la interacción suelo-estructura se tienen las siguientes:

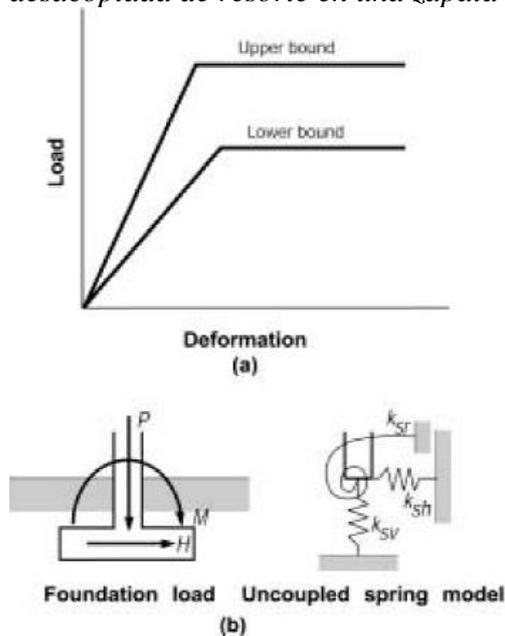
- FEMA 356 denominada “Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings” que define.
- FEMA 440 denominada “Improvement of Nonlinear static seismic analysis procedures”.

#### **2.3.1.1.1 FEMA 356**

Según las normativas FEMA 356 el suelo puede representarse como un sistema no acoplado de rigideces, otorgándole rigideces representativas tal como se presenta en la siguiente figura:

**Figura 1**

*Tipos de modelamiento del suelo: (a) modelo idealizado elasto-plástico, (b) matriz desacoplada de resorte en una zapata rígida*



*Nota:* Tomado de *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings* (p. 4-19) por FEMA, 2000.

Se representa el tipo de representación del suelo en una zapata rígida, considerando el aporte de las rigideces verticales, horizontales y de giro frente a las diferentes propiedades constitutivas, tal como lo representa Gazetas.

### 2.3.1.1.2 FEMA 440

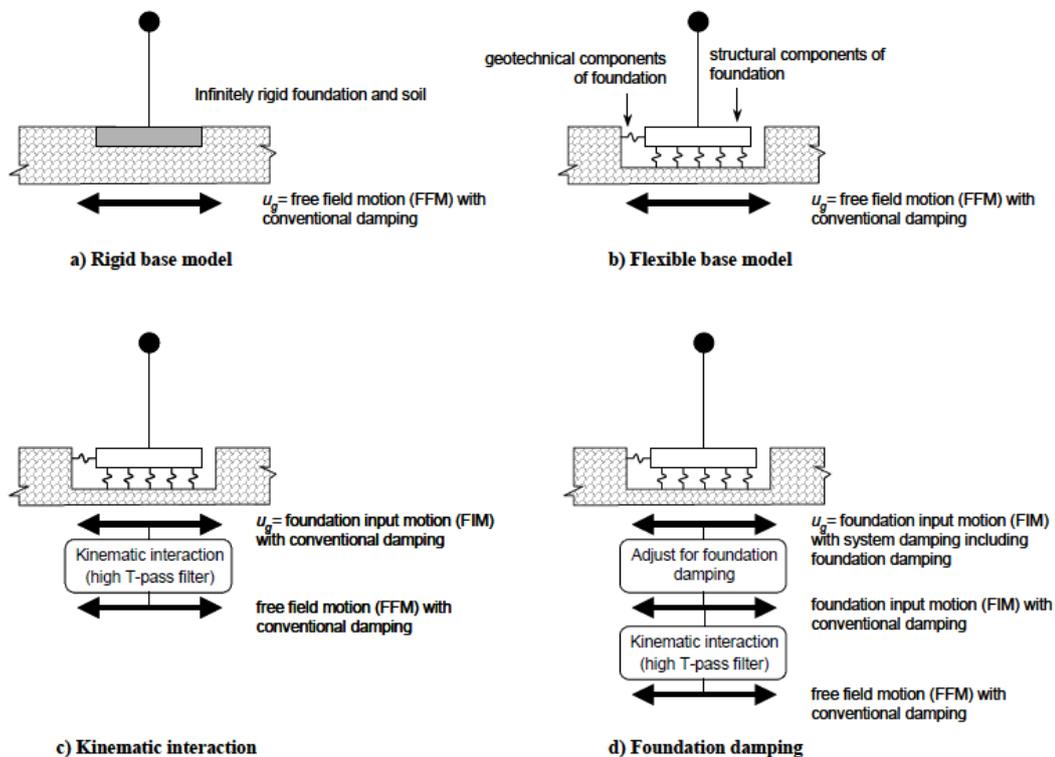
De acuerdo al capítulo 8, se considera la introducción de la flexibilidad, el amortiguamiento y la transmisión del movimiento cinemático de la estructura, observándose un comportamiento más realista al incluir el efecto del amortiguamiento del suelo durante el movimiento sísmico, diferente a las normativas FEMA 356 y ATC-40.

Se presenta el modelamiento de una base fija en el suelo completamente rígida, considerando una rigidez grande tanto vertical como horizontal, creando un comportamiento diferente en los elementos estructurales. Este método es considerado como uno de los conservativos y aplicados para el diseño de estructuras. Por otro lado, se tiene el método que considera el aporte del suelo en el modelo estructural, se considera

una base flexible que aporta de acuerdo a las propiedades constitutivas del suelo, considerando un amortiguamiento efectivo del suelo en 5%. Tanto la normativa FEMA 356 y ATC-40, indican métodos simplificados para el modelamiento de una base flexible. Años más tarde, el FEMA 440 considera el aporte del movimiento cinemático del suelo y el amortiguamiento del suelo, como se observa en la siguiente figura:

### Figura 2

*Tipos de modelamiento del suelo: (a) modelo de base rígida, (b) modelo de base flexible, (c) interacción cinemática y (d) amortiguamiento en la base.*



*Nota:* Tomado de *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures* (p.8-2) por ATC, 2005.

En la figura 2, se observa los diferentes tipos de modelos que consideran la interacción suelo-estructura, incluyendo el efecto cinemático y el amortiguamiento del suelo.

#### 2.3.1.2 Manual de puentes del Ministerio de Transporte y Comunicaciones

(MTC)

El Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC) busca conectar e integrar a través de infraestructura de transporte y comunicaciones. Para lograr dicho objetivo, el MTC

desarrollo diferentes normativas referentes al área de transporte y comunicaciones, entre ellas: el Manual de puentes (2016).

En el subcapítulo 2.4.4.1.1 denominado “Requisitos generales” indica que el empuje de suelo deberá considerar la interacción suelo estructura. Similar caso en el subcapítulo 2.9.10.1 indica el grupo de pilotes deberá diseñarse considerándose el efecto de la interacción suelo estructura.

Tal como se aprecia en el Manual de Puentes (2016) la interacción suelo estructura solo se ha considerado de manera puntual, sin considerar los efectos estáticos, cinemáticos e inerciales de la estructura puesto que la estructura y el suelo actúan de manera conjunta.

### **2.3.2 *Interacción suelo estructura***

#### **2.3.2.1 Definición**

Consiste en diseñar una estructura en función a una determinada rigidez de suelo, ésta puede infinitamente rígido o considerando el aporte del suelo de acuerdo a las propiedades constitutivas del suelo, tanto como rigideces verticales, horizontales y rotacionales para determinar las respuestas de las estructuras. (Kausel, 2010).

#### **2.3.2.2 Cimentación**

##### **2.3.2.2.1 *Definición***

Según la Norma Técnica E.050 de Suelos y Cimentaciones (2018) se define como al elemento que se encargará de transmitir las cargas obtenidas por la estructura hacia el suelo para que sirva como sistema de apoyo.

### **2.3.2.2.2 Tipos de cimentación**

#### **Cimentación superficial**

La cimentación superficial según la Norma Técnica E.050 de Suelos y Cimentaciones (2018) tiene una relación entre profundidad de cimentación y ancho menor o igual a 5.

#### **Cimentación profunda**

La cimentación superficial según la Norma Técnica E.050 de Suelos y Cimentaciones (2018) consiste en cimentar los apoyos mediante un pilotaje profundo que se empotrarán en estratos con buenas propiedades. De esta forma, las cargas estructurales se estarían transmitiendo en profundidad a un estrato resistente, y se garantizaría un buen comportamiento.

### **2.3.2.3 Modelos estáticos de ISE para cimentaciones superficiales**

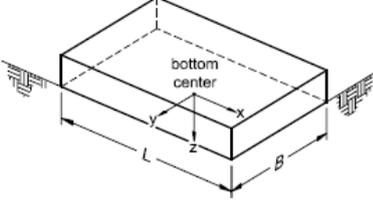
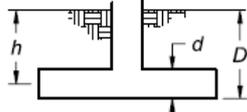
Según FEMA 356 (2000), los modelos estáticos de ISE se pueden clasificar en los siguientes:

#### **2.3.2.3.1 Modelización considerando una cimentación rígida**

Se considera una zapata rectangular de tipo rígida para el cálculo de las rigideces traslacionales y rotacionales, considerando la profundidad de cimentación y los parámetros geotécnicos del suelo. Este método es una simplificación del cálculo matemático para determinar las respuestas estructurales.

### Figura 3

Tipos de modelamiento del suelo: Solución elástica para el cálculo de los resortes en una zapata rectangular

Degree of Freedom	Stiffness of Foundation at Surface	Note
Translation along x-axis	$K_{x, sur} = \frac{GB}{2-\nu} \left[ 3.4 \left( \frac{L}{B} \right)^{0.65} + 1.2 \right]$	 <p>Orient axes such that <math>L \geq B</math></p>
Translation along y-axis	$K_{y, sur} = \frac{GB}{2-\nu} \left[ 3.4 \left( \frac{L}{B} \right)^{0.65} + 0.4 \frac{L}{B} + 0.8 \right]$	
Translation along z-axis	$K_{z, sur} = \frac{GB}{1-\nu} \left[ 1.55 \left( \frac{L}{B} \right)^{0.75} + 0.8 \right]$	
Rocking about x-axis	$K_{xx, sur} = \frac{GB^3}{1-\nu} \left[ 0.4 \left( \frac{L}{B} \right) + 0.1 \right]$	
Rocking about y-axis	$K_{yy, sur} = \frac{GB^3}{1-\nu} \left[ 0.47 \left( \frac{L}{B} \right)^{2.4} + 0.034 \right]$	
Torsion about z-axis	$K_{zz, sur} = GB^3 \left[ 0.53 \left( \frac{L}{B} \right)^{2.45} + 0.51 \right]$	
Degree of Freedom	Correction Factor for Embedment	Note
Translation along x-axis	$\beta_x = \left( 1 + 0.21 \sqrt{\frac{D}{B}} \right) \cdot \left[ 1 + 1.6 \left( \frac{hd(B+L)}{BL^2} \right)^{0.4} \right]$	 <p><math>d</math> = height of effective sidewall contact (may be less than total foundation height)  <math>h</math> = depth to centroid of effective sidewall contact</p> <p>For each degree of freedom, calculate  <math>K_{emb} = \beta K_{sur}</math></p>
Translation along y-axis	$\beta_y = \beta_x$	
Translation along z-axis	$\beta_z = \left[ 1 + \frac{1}{21} \frac{D}{B} \left( 2 + 2.6 \frac{B}{L} \right) \right] \cdot \left[ 1 + 0.32 \left( \frac{d(B+L)}{BL} \right)^{2/3} \right]$	
Rocking about x-axis	$\beta_{xx} = 1 + 2.5 \frac{d}{B} \left[ 1 + \frac{2d}{B} \left( \frac{d}{D} \right)^{-0.2} \sqrt{\frac{B}{L}} \right]$	
Rocking about y-axis	$\beta_{yy} = 1 + 1.4 \left( \frac{d}{L} \right)^{0.6} \left[ 1.5 + 3.7 \left( \frac{d}{L} \right)^{1.9} \left( \frac{d}{D} \right)^{-0.6} \right]$	
Torsion about z-axis	$\beta_{zz} = 1 + 2.6 \left( 1 + \frac{B}{L} \right) \left( \frac{d}{B} \right)^{0.9}$	

Nota: Tomado de *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings* (p. 4-20) por FEMA, 2000.

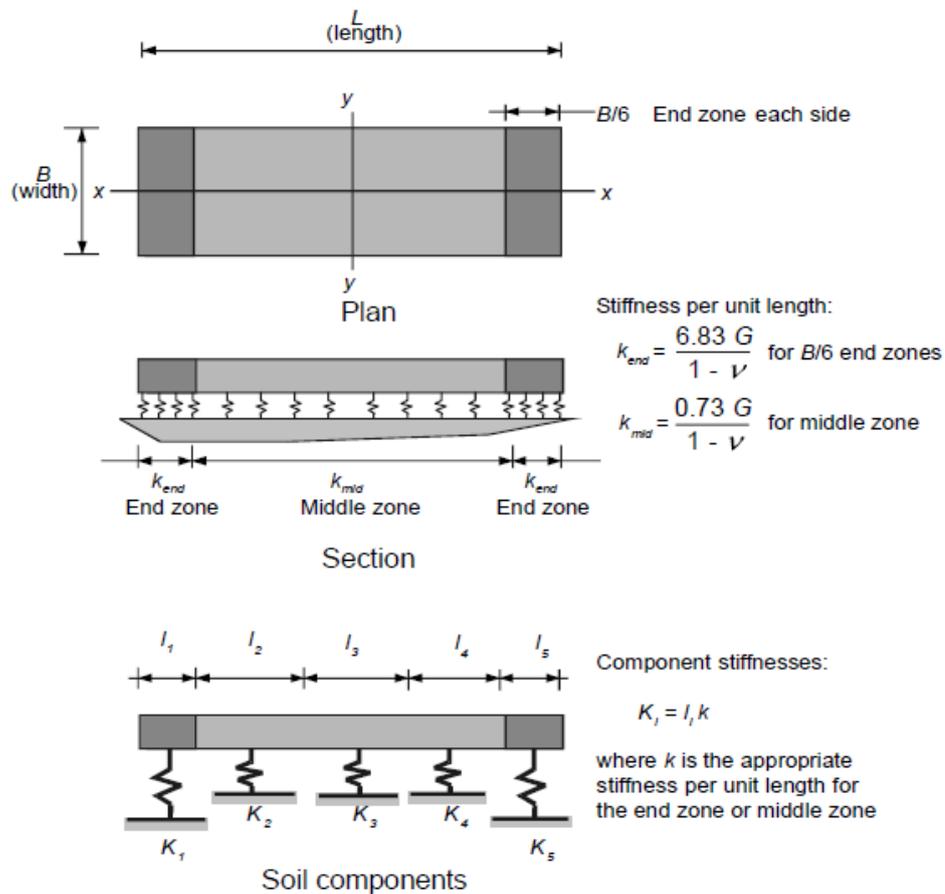
#### 2.3.2.3.2 Modelización considerando una cimentación flexible

##### Método de Winkler

En el caso de cimentaciones superficiales flexibles se puede considerar al elemento estructural como un sistema no rígido respecto con el suelo. Aplicando el modelo de Winkler, la rigidez vertical se distribuye en función al área para realizar el análisis estructural de acuerdo a las demandas dadas, ver figura 6.

**Figura 4**

*Rigidez vertical de modelamiento para cimentaciones superficiales*



*Nota: Tomado de Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings (p. 4-23) por FEMA, 2000.*

### **Método de Winkler modificado**

Similarmente en el caso de cimentaciones superficiales, se aplica el criterio de Winkler, tomando en cuenta un sistema flexible junto con la caracterización del suelo, tanto para zapatas y losas de cimentación se puede calcular la rigidez vertical.

$$k_{sv} = \frac{1.3G}{B(1 - \nu)}$$

Donde  $G$  (módulo de corte),  $B$  (ancho de la cimentación) y  $\nu$  (módulo de Poisson).

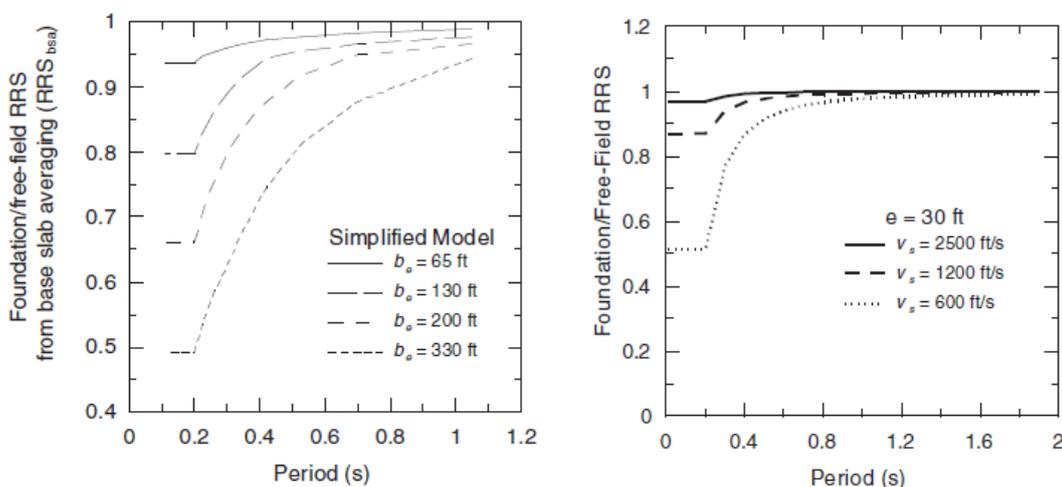
### 2.3.2.4 Efectos de la interacción suelo-estructura

#### 2.3.2.4.1 Efecto cinemático

Según FEMA 440, se considera una reducción del espectro de diseño con el suelo con base a la geometría de la fundación y al nivel de empotramiento del suelo, normalmente estos valores son relacionados en estructuras con periodos cortos (menores a 0.5s) o profundidades embebidas mayores a 3 metros.

#### Figura 5

Variación del periodo: (a) factor de reducción por geometría de la cimentación, (b) factor de reducción por altura de embebido a 30 pies en el suelo



Nota: Tomado de *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures* (p.8-3 & p. 8-4) por ATC, 2005.

$$RRS_{bsa} = 1 - \frac{1}{14,100} \left( \frac{b_e}{T} \right)^{1.2} \geq \text{the value for } T = 0.2 \text{ s} \quad (8-1)$$

$$RRS_e = \cos \left( \frac{2\pi e}{T v_s} \right) \geq \text{the larger of 0.453 or the } RRS_e \text{ value for } T = 0.2 \text{ s.} \quad (8-2)$$

En las anteriores ecuaciones, se observan los factores de reducción a los espectros de respuesta, considerando los efectos de profundidad de cimentación, periodo (T) y geometría de la cimentación (be).

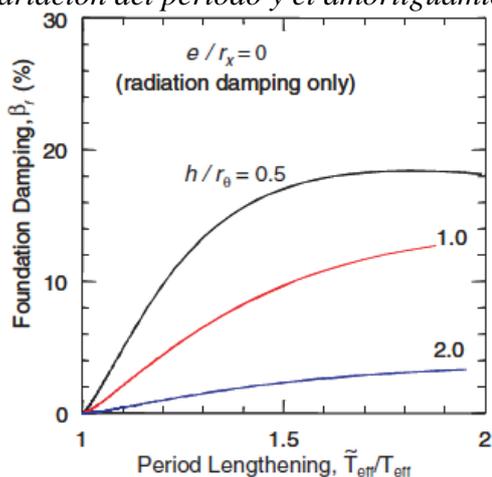
#### 2.3.2.4.2 Efecto de amortiguamiento:

Este efecto ocurre debido a las acciones inelásticas de la estructura, se relaciona directamente con el comportamiento histerético del suelo. La representación es con factores de amortiguamiento, generalmente con 5%, pero no se considera la interacción

de suelo estructura; por tanto, el espectro calculado inicialmente, se deberá modificar en relación al amortiguamiento del suelo. Este efecto se presenta en suelo arcilloso, pero en el presente trabajo se considerará para observar la variación de respuesta con respecto a otros tipos de modelo de representación del suelo.

**Figura 6**

*Variación del periodo y el amortiguamiento*



*Nota:* Tomado de *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures* (p.8-6 & p. 8-4) por ATC, 2005.

### 2.3.2.5 Puentes

#### 2.3.2.5.1 Definición

Según Aranis (2006) se define al puente como una estructural que permite la conexión entre dos diferentes puntos que posean un obstáculo natural (quebradas, ríos, montes u accidentes geográficos naturales) o artificiales (vías, construcciones, carreteras o estructuras construidas por el hombre). Este tipo de estructura puede ser de tipo vehicular, peatonal, de construcción u otros, dependiendo de la necesidad del proyecto.

#### 2.3.2.5.2 Partes

### Superestructura

La superestructura es la estructura que tiene contacto con los diferentes tipos de cargas, las cuales pueden ser vehiculares, personas, animales y otros. Este sistema estructural (tablero) está constituido por diferentes elementos tales como losas de

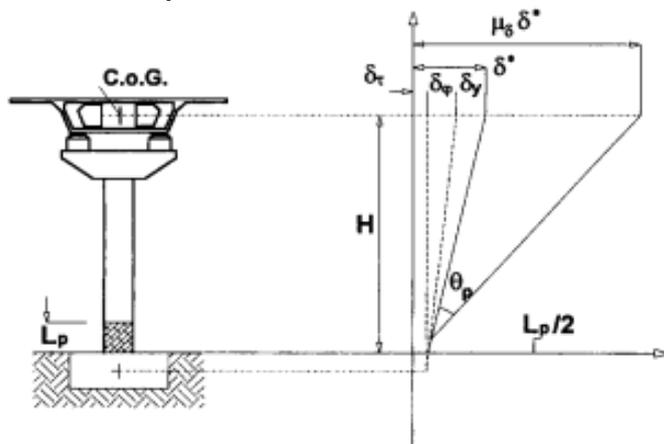
concreto, vigas longitudinales, armaduras de acero estructural en su mayoría, dependiendo de la configuración estructural del puente. (Aranis, 2006)

### Subestructura

La subestructura del puente sirve para la transferencia de fuerzas de la superestructura hacia el estrato de suelo que sirve como apoyo, este elemento estructural debe tener una adecuada rigidez y resistencia a las demandas actuantes, por tanto, se espera que el diseño cumpla con todos los criterios técnicos normativos y funcionales, asimismo evitar el colapso y destrucción durante un evento sísmico. (Aranis, 2006).

**Figura 7**

*Vista de componentes de la subestructura*



*Nota:* Tomado de *Seismic design and retrofit of bridges* por Priestley et al., 1996, de John Wiley & sons, Inc.

### 2.3.2.6 Suelo

#### 2.3.2.6.1 Definición

Según Das (2013) la definición del suelo se compone principalmente por material orgánico y no orgánico de tipo no cementado, junto con algunos componentes de gas en el espaciamiento de sus partículas sólidas, empleándose como principal material de construcción en diferentes estructuras. “Por lo tanto, los ingenieros civiles deben estudiar las propiedades del suelo, tales como el origen, la distribución de tamaño de grano, la capacidad de drenar el agua, compresión, resistencia al corte y la capacidad de soporte de carga”. (p. 1).

### 2.3.2.6.2 *Parámetros geotécnicos*

Según Das (2013) los parámetros geotécnicos son aquellos valores que ayudan a caracterizar un suelo para estudiar sus propiedades y entender mejor su comportamiento en diferentes proyectos, estos se obtienen de acuerdo a ensayos de laboratorio y de campo.

#### **Parámetros de resistencia a la cortante del suelo**

Es la resistencia ofrecida interna debido a fallas de deslizamiento en cualquier punto de su plano, en ingeniería este tipo de parámetro es utilizado para determinar la capacidad de carga de una cimentación, estabilidad de taludes, presión lateral del terreno y diversas caracterizaciones de estructuras. (Das, 2013).

Los parámetros necesarios para determinar la resistencia a corte son la cohesión  $c$  y el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ).

### 2.3.2.6.3 *Modelo de Mohr-Coulomb*

El modelo consiste que el material falla debido a la combinación crítica de los esfuerzos normales y cortantes, es decir existe una relación directa entre el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante.

$$\tau_f = f(\sigma)$$

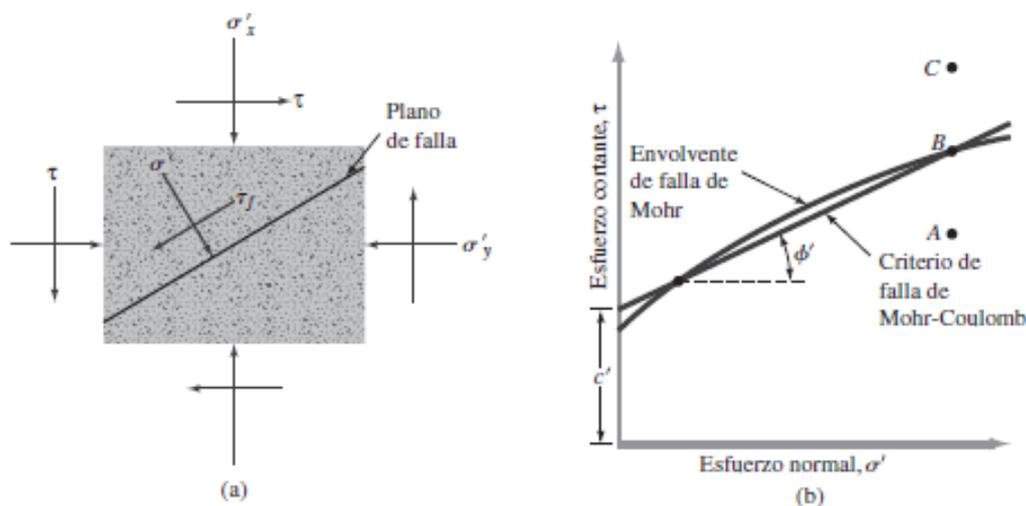
Donde  $T_f$  es el esfuerzo a la cortante y  $f(\sigma)$  es el esfuerzo normal. Además, la relación se presenta como una curva, ver figura 8, la cual se representa con la presente relación:

$$T_f = c + \sigma \tan \phi$$

Donde  $c$  es la cohesión y  $\phi$  es el ángulo de fricción interna.

**Figura 8**

*Envolvente de falla de Mohr y criterio de falla de Mohr Coulomb*



*Nota:* Tomado de *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica* (p. 230), por Das, 2013, Cengage Learning.

### 2.3.2.6.1 Modelo Elástico lineal

La ley de Hooke se refiere a la relación presente entre las tensiones y las deformaciones de forma constante en un punto determinado; se considera que las propiedades del cuerpo son de tipo isotrópico (propiedades iguales en todas las direcciones). (Cervera & Blanco, 2015).

$$\sigma = E\varepsilon$$

Donde  $\sigma$  es la tensión;  $E$  es el módulo elástico del suelo y  $\varepsilon$  es la deformación unitaria del suelo.

### 2.3.2.7 Licuefacción

#### 2.3.2.7.1 Definición

El fenómeno de licuefacción se define como el proceso por el cual determinados suelos con presencia de nivel freático afectados por eventos sísmicos desarrollan elevadas presiones intersticiales de forma rápida (sin drenaje), dando lugar a una pérdida de la tensión efectiva del suelo que se comporta como si fuera un fluido. (Kuroiwa, 2012).

#### 2.3.2.7.2 Factores

Los factores que influyen en el desarrollo de licuefacción, según Fernández (2015) son:

- a) Distribución granulométrica: Las bajas fuerzas intersticiales en gradaciones de tipo uniforme condiciona a un aumento de probabilidad de licuefacción.
- b) Nivel freático: Si se observa la presencia del nivel freático a un nivel bajo, la ocurrencia de licuefacción aumenta.
- c) Densidad del material: La densificación del suelo ocurre por la presencia de una carga cíclica, lo que disminuye el volumen de poros entre el suelo y el agua, al ocurrir este efecto la presencia de agua disminuye y por tanto el efecto de licuefacción disminuye, por el aumento de las fuerzas intersticiales.
- d) Estratificación: Las tensiones entre las partículas del suelo aumenta en función a la profundidad del suelo, entonces al haber un mayor acomodo de partículas, las fuerzas internas aumentan, connotando en una disminución del efecto de licuefacción. La licuefacción ocurre entre profundidades menores de 9m, y rara veces puede ocurrir a profundidades mayores a 15m.
- e) Duración y amplitud de eventos cíclicos: En función a la ubicación del epicentro se observa la presencia de la licuefacción.
- f) Edad geológica del material de depósito: Suelos jóvenes presentan una menor compactación, por tanto, el nivel de cohesión es mucho menor que los suelos más antiguos, ya que éstos aumentaron sus propiedades mecánicas en el tiempo.
- g) Origen del suelo.

### **2.3.2.8 Columnas de grava**

#### **2.3.2.8.1 Definición**

El tratamiento de columnas de grava consiste en construir columnas insertadas en el terreno a fin de mejorar las propiedades del suelo, la permeabilidad y permitir construir en una superficie tratada, asegurando la capacidad de soporte del suelo modificado.

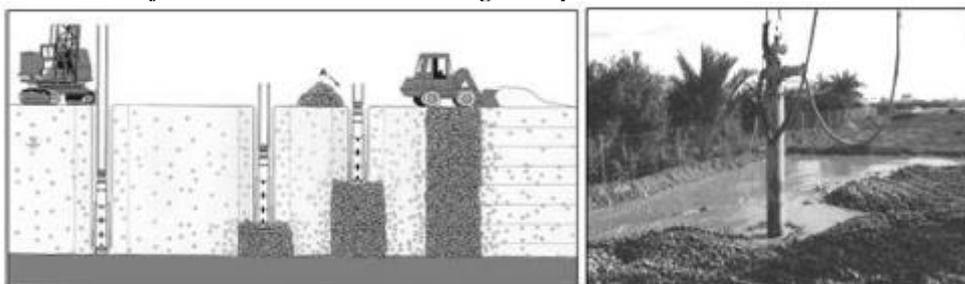
### 2.3.2.8.2 Métodos constructivos

Según (Carvajal et al., 2014) existen dos tipos de colocación del material de las columnas de grava:

- a) Vía Seca: Con este método se introduce el material granular desde la superficie mediante el tendido con excavadoras, tal como se presenta en la imagen.

#### Figura 9

*Método de ejecución de columnas de grava por vía seca*

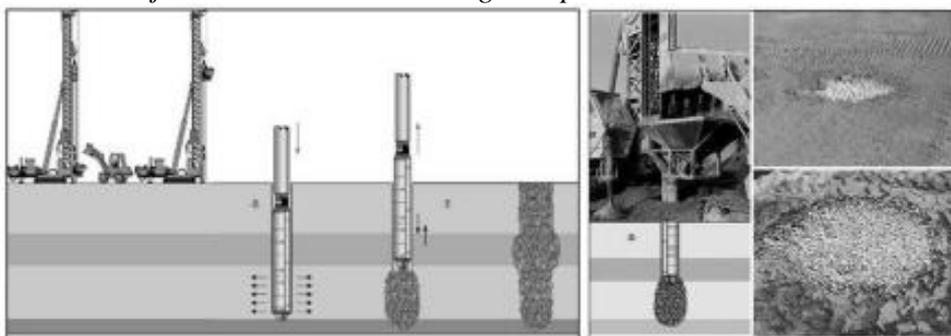


*Nota:* Tomado de *Columnas de grava mediante vibro-sustitución: evolución tecnológica, diseño y casos prácticos* de Carvajal et al., 2014.

- b) Vía Húmeda: Caso contrario al método mencionado, se procede a transportar el material dentro del martillo vibroflotador, el cual a su vez penetra el suelo a mejorar. Entonces, el material se desprende por cada etapa de penetración y vibrado; este proceso se repite hasta que se rellene hasta el nivel de la superficie.

#### Figura 10

*Método de ejecución de columnas de grava por vía húmeda*



*Nota:* Tomado de *Columnas de grava mediante vibro-sustitución: evolución tecnológica, diseño y casos prácticos* de Carvajal et al., 2014.

Dependiendo del tipo de suelo se procede a diseñar las columnas y utilizar el método de colocación del suelo.

### 2.3.2.8.3 *Ventajas y Desventajas*

Según Carbajal & Mora (2014) las ventajas y desventajas del uso de tratamiento de columnas de grava son las siguientes

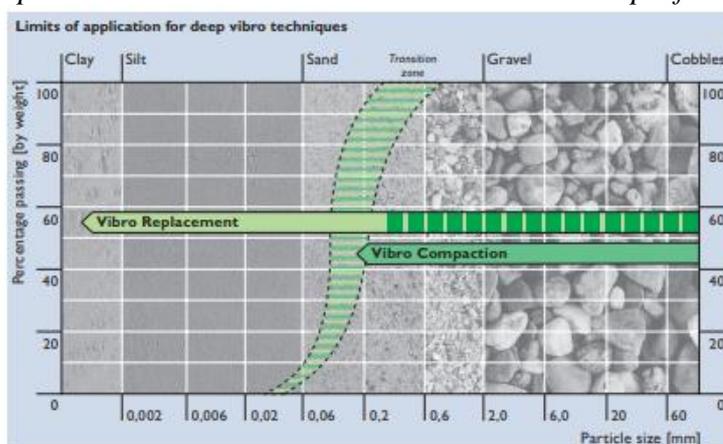
- a) Ventajas
  - Reducción de asentamientos
  - Aceleración del proceso de consolidación
  - Aumento de la capacidad portante del suelo
  - Reducción del potencial de licuefacción
- b) Desventajas
  - Poca información relevante al tema
  - Maquinaria y personal calificado para la construcción.
  - Diseño empírico.

### 2.3.2.8.4 *Diseño geotécnico*

El proceso de diseño representa uno de los pilares fundamentales con respecto a la construcción del mejoramiento de suelo, todo ello debido a las consideraciones iniciales tales como tipo de suelo, proceso de construcción, geometría y otros, con el fin de obtener un diseño óptimo y funcional del terreno compacto mejorado. (Priebe, 1995).

### Figura 11

*Tipos de técnicas de construcción de vibraciones profundas*



Nota: Tomado de *Columnas de grava mediante vibro-sustitución: evolución tecnológica, diseño y casos prácticos* de Carbajal et al., 2014.

Se observa que la zona de vibro compactación se encuentra en la zona de gravas hasta gravilla, mientras en la zona de gravillas hasta arcillas se utiliza el método de reemplazo por vibración. Esto se explica porque en el primer método se pueden encontrar materiales gruesos que pueden impedir la correcta perforación, y que la energía de vibrado no afecta el suelo circundante. Mientras, el método de reemplazo vibratorio, se explica el reemplazo del suelo por material granular con propiedades geotécnicas conocidas. Para la aplicación de las columnas de grava se recomienda el uso de la zona de transición debido a que la vibración no transmite energía adicional al terreno.

### **Método Priebe**

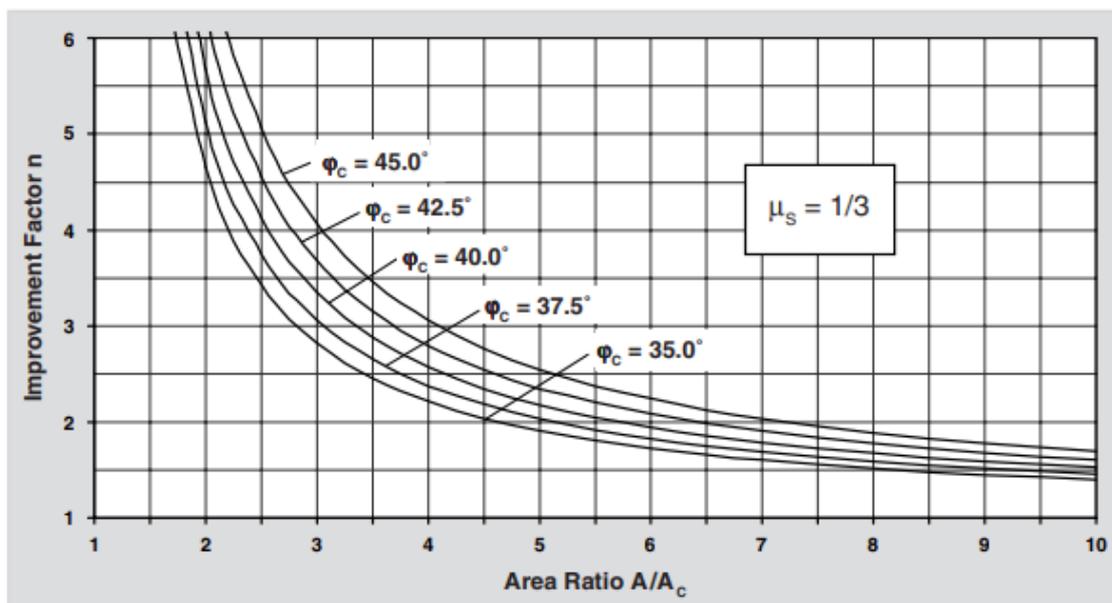
Es un método que considera la mejora de la columna de grava en el suelo, comparado a su estado inicial. Se considera un factor de mejora respecto a sus condiciones iniciales, en consecuencia, los parámetros geotécnicos se incrementen tanto en módulo de elasticidad, ángulo de fricción y otros. Este método se considera de tipo semi-empírico porque se presenta el efecto de semi densificación del suelo superpuesto en el terreno. (Priebe, 1995).

Según Priebe (1995) se toma en cuenta las siguientes idealizaciones:

- La columna de grava es un elemento rígido
- La columna de grava es incomprensible
- La densidad de compresión en la columna y el suelo no se considera.

**Figura 12**

Carta de diseño de factor de mejoramiento de las columnas de grava.



Nota: Tomado *Design of vibro replacement* (p. 3) de Priebe, 1995.

La razón de sustitución del terreno puede calcularse de la siguiente forma:

$$a_s = \frac{A_c}{A} = \frac{A_c}{A_s + A_c}$$

Donde  $A_c$  es el área de la sección de la columna de grava, y  $A$  es el área del círculo equivalente de acuerdo al espaciamiento de diseño de la columna de grava.

### Factor de mejora

Al aplicar una carga en el terreno, las columnas de grava reducen las deformaciones ocasionadas, por tanto, se define un factor de mejora ( $\beta$ ) como la relación del suelo con columnas de gravas y sin columnas de grava.

$$1/\beta = 1 + \frac{A_c}{A} \left( \frac{E_c}{E_s} - 1 \right)$$

Esta relación presenta una equivalencia al relacionar el módulo de deformación equivalente ( $E_{cq}$ ) con el módulo de deformación del suelo sin tratar ( $E_s$ ).

## Factores equivalentes

El valor del factor de mejoramiento aumenta las propiedades constitutivas del suelo, tales como el ángulo de rozamiento, peso específico, cohesión y módulo de deformación.

- Peso específico:

$$\gamma_{eq} = \gamma_c \cdot a_s + \gamma_s \cdot (1 - a_s)$$

Donde  $\gamma_{eq}$  es el peso específico equivalente con columnas de grava.

- Ángulo de rozamiento:

$$\text{tg}\phi_{eq} = [1 - \beta(1 - a_s)] \cdot \text{tg}\phi_c + \beta(1 - a_s) \cdot \text{tg}\phi_s$$

Donde  $\phi_{eq}$  es el ángulo de rozamiento equivalente con columnas de grava.

- Cohesión:

$$c_{eq} = (1 - a_s) \cdot c_s$$

Donde  $c_{eq}$  es la cohesión equivalente con columnas de grava.

- Módulo de deformación equivalente:

$$E_{eq} = (1 - a_s) \cdot E_s + E_c \cdot a_s$$

Donde  $E_{eq}$  es el módulo de deformación equivalente con columnas de grava.

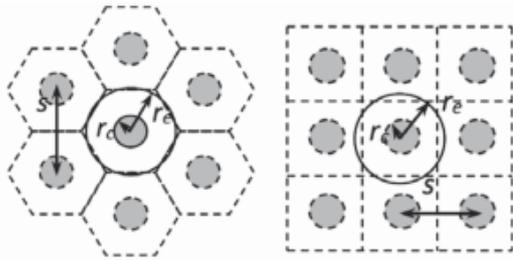
## Modelamiento analítico-numérico

Según Castro (2016) se clasifican en los siguientes tipos de modelamiento:

### a) Celda Unitaria

Consiste en el modelamiento numérico de la columna de grava respecto a un eje axisimétrico, el terreno se modelo sólo para la tajada.

**Figura 13**  
Simplificación de columna de grava

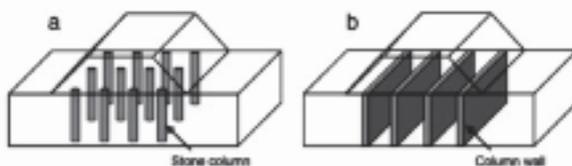


Nota: Tomado de *Modelización de columnas de grava* (p. 570) por Castro, 2016.

### b) Zanjas de columnas longitudinales

Las columnas se modelan para un solo corte, es decir se idealiza el comportamiento del terreno junto a las columnas de grava, considerando que se van a deformar linealmente, por ello se requiere una transformación para el proceso de modelado.

**Figura 14**  
Método de zanjas en el modelamiento de columnas de gravas



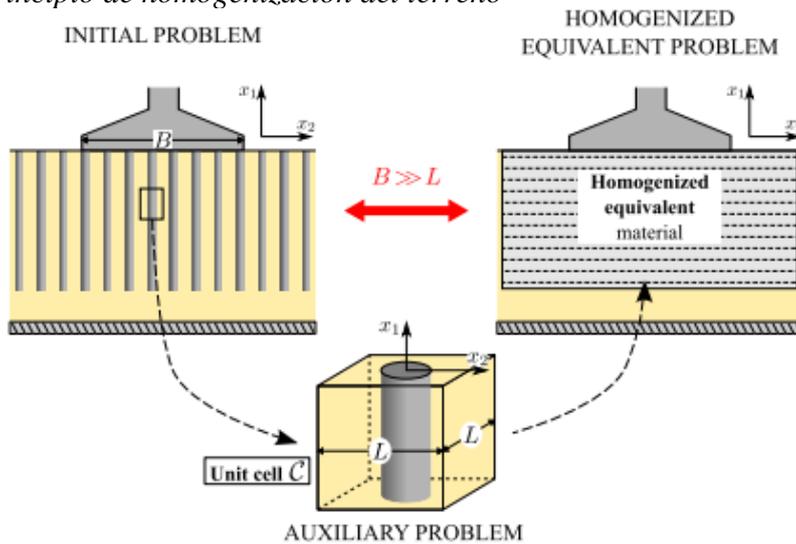
Nota: Tomado de *Modelización de columnas de grava* (p. 569) por Castro, 2016.

### c) Terreno homogéneo mejorado

El terreno mejorado se idealiza en función a las columnas de gravas impuestas, es decir se considera que las propiedades constitutivas del suelo junto a las propiedades de la columna de grava, se maneja de forma aproximada con el fin de mantener el modelamiento inicial.

**Figura 15**

Principio de homogenización del terreno



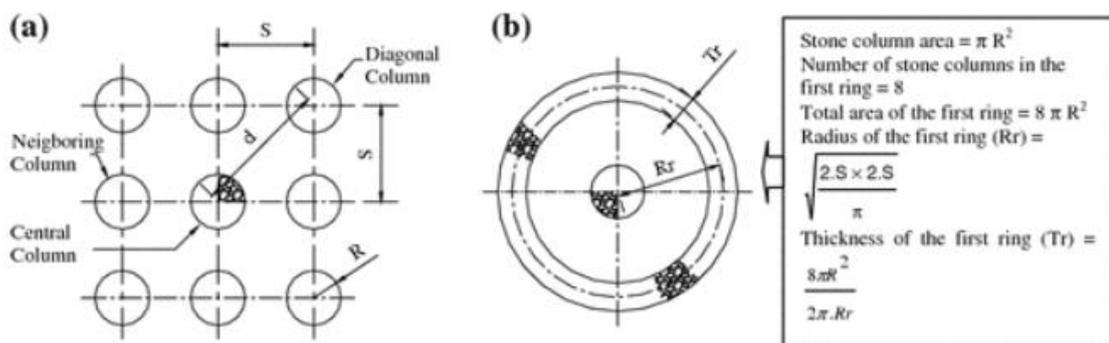
Nota: Tomado de *Stability analysis of homogenized stone column reinforced foundations using a numerical yield design approach* (p. 7) por Gueguin et al., 2015.

#### d) Anillos de columnas

En este método se procede a realizar un diseño en función a una simetría axial, caso de cimentaciones de tanques circulares, similar a la representación de zanjas longitudinales, se considera el uso de propiedades equivalentes para la simplificación del proceso de diseño.

**Figura 16**

Modelamiento representativo axisimétrico de una columna de grava



Nota: Tomado de *Modelización de columnas de grava* (p. 575) por Elshazly, Elkasabgy & Elleboudy, 2008, en Castro, 2016.

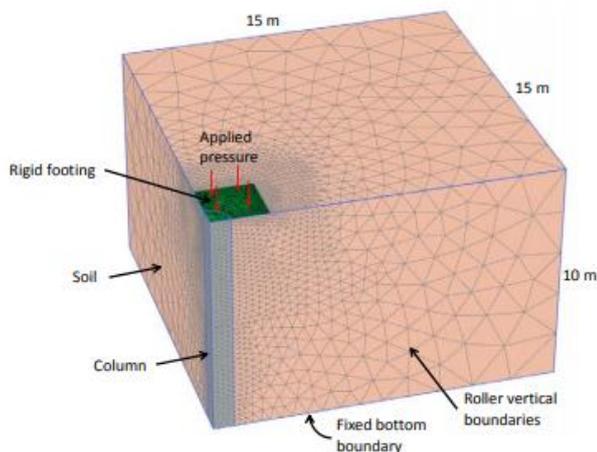
#### e) Modelo tridimensional

Consiste en la representación 3D de las columnas de gravas con el suelo a tratar, considerando las propiedades existentes, en este tipo de modelamiento no es necesario el

uso de propiedades equivalentes debido a que el modelo ya considera las propiedades de las columnas de grava y el suelo afectado.

### Figura 17

*Modelamiento en 3D de columnas de grava*



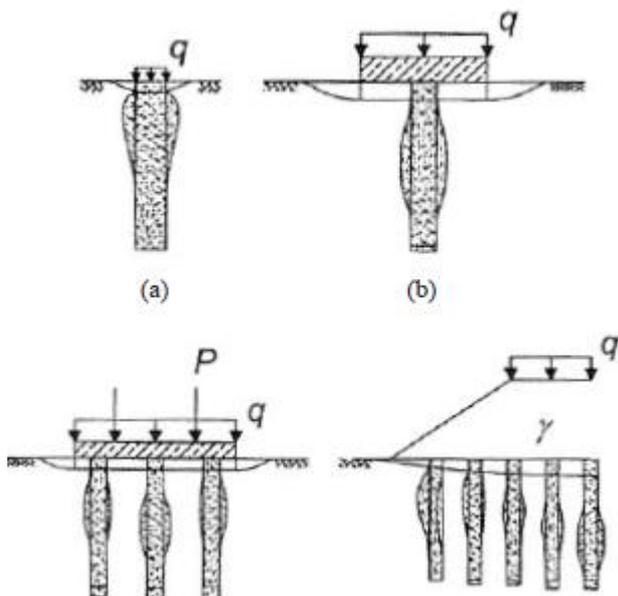
*Nota:* Tomado de *Numerical modelling of stone columns beneath a rigid footing* (p. 79) de Castro, 2014.

#### f) Columna aislada

La columna de grava se considera como un solo elemento, se le aplica una carga única sobre el área de la columna.

### Figura 18

*Modelamiento en columnas de grava aislada y grupo de columnas de grava*



*Nota:* Tomado de *Modelización de columnas de grava* (p. 576) por Kirsch y Kirsch, 2010, en Castro, 2016.

#### 2.3.3 Modelamiento numérico de la estructura y del suelo

Según Priestley et al. (1996), se consideran los siguientes tipos de modelamientos:

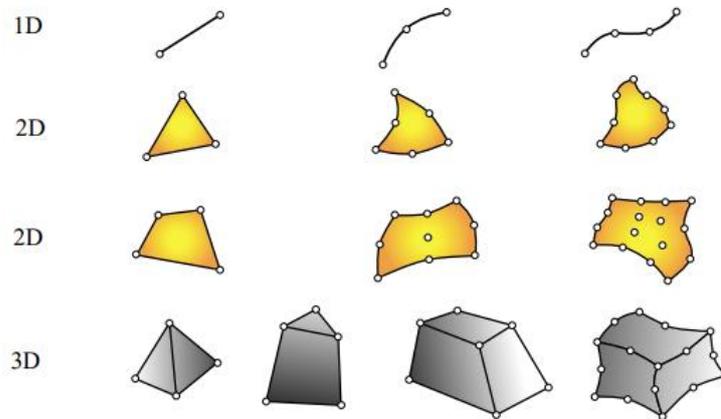
- Modelamiento tipo Agrupado (LPM): Los parámetros del puente son convenientemente concentrados en localizaciones discretas, son formulaciones matemáticas simples, pero requieren de conocimiento significativo y experiencia para formular el equivalente fuerza-deformación.
- Modelamiento estructural de elementos (SCMs): Consiste en la idealización de la estructura que es conectada para asemejar la estructura original, la caracterización de cada parte representa el comportamiento del puente en relación a las fuerzas y deformaciones.
- Modelamiento en elementos finitos (FEMs): La geometría actual del puente se discretiza para obtener una mejor aproximación de las propiedades constitutivas de los materiales, respuesta estructural, deformaciones y fuerzas, además de que ayuda en el tiempo de cálculo computacional, ya que se disminuye el número de incógnitas a calcular.

#### **2.3.3.1 Método de los elementos finitos**

Consiste en determinar el comportamiento de una estructura ante cargas empleando una solución discontinua o discreta para reemplazar una solución continua o exacta. “Para ello discretiza la estructura, es decir, la divide en elementos no diferenciales, o elementos finitos, interconectados entre sí a través de un determinado número de puntos que llamaremos nodos” (Fernández & Pérez, 2001, p. 31).

**Figura 19**

*Geometría de los elementos finitos típicos desde una dimensión hasta tres dimensiones.*



*Nota:* Imagen que muestra la representación gráfica de los elementos finitos en 1D, 2D y 3D. Tomado de *Introduction to Finite Element Methods* (p. 6-9) por Felippa, 2004, University of Colorado.

### 2.3.3.2 Elementos

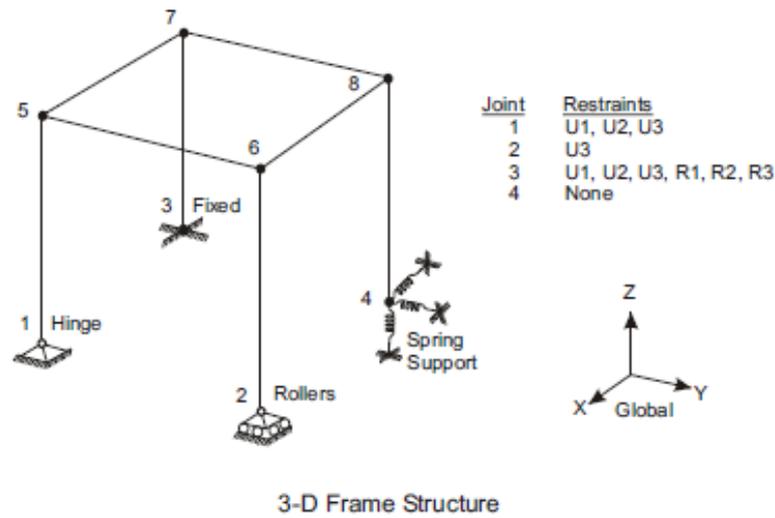
La representación estructural de los miembros estructurales es realizada mediante objetos, donde se considera la geometría actual, las propiedades de los materiales y la ubicación de acuerdo a un sistema de coordenadas en la estructura a analizar.

### Nodos

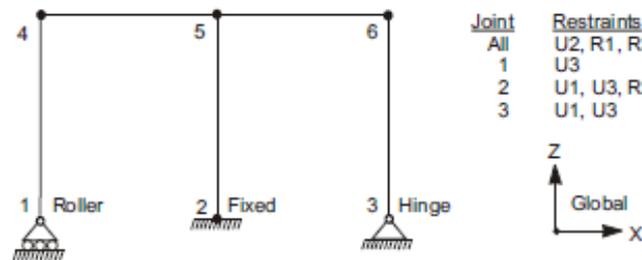
Son los puntos de conexión entre los elementos que se han determinado para el análisis estructural, los componentes de las articulaciones son denominados grados de libertad. (Computer & Structure, Inc, 2017)

**Figura 20**

Representación gráfica de las restricciones impuestas en la estructura



Notes: Joints are indicated with dots:  
 ● Solid dots indicate moment continuity  
 ○ Open dots indicate hinges  
 All joint local 1-2-3 coordinate systems are identical to the global X-Y-Z coordinate system



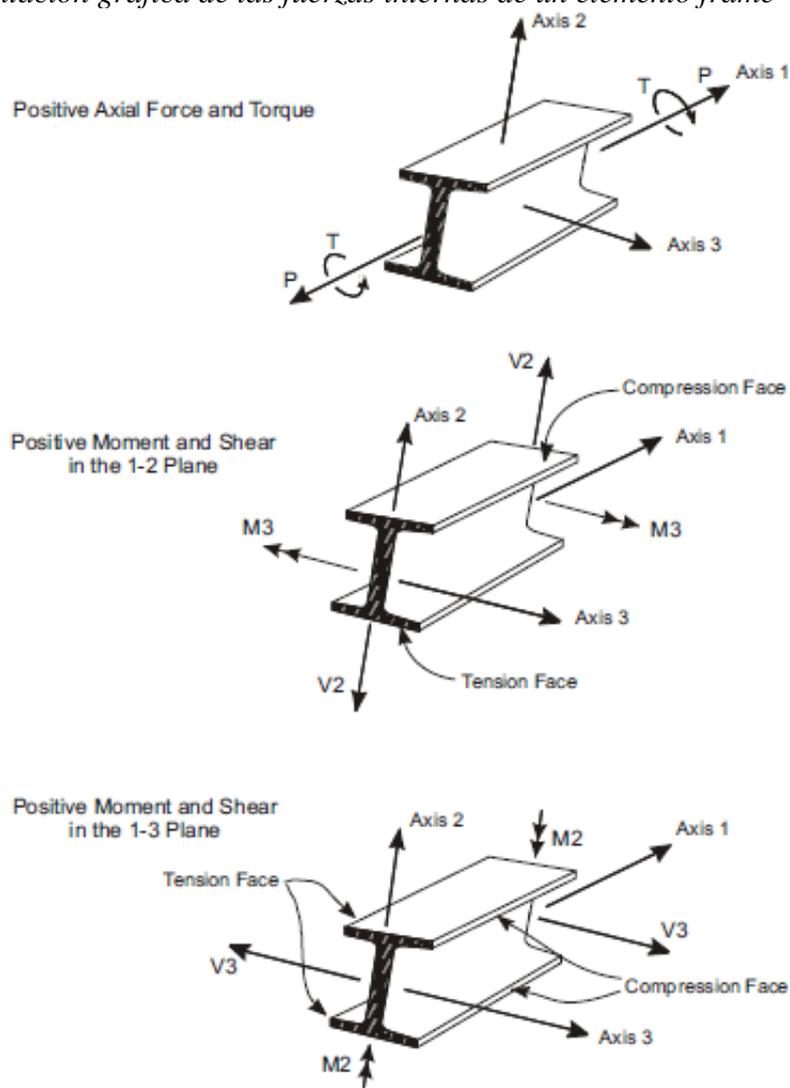
*Nota:* Imagen que muestra la representación gráfica de las condiciones de borde del sistema estructura en 2D y 3D. Tomado de *CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, SAFE and CsiBridge* (p. 35) por Computer & Structure, Inc, 2017.

### Elementos frame

Son aquellos elementos que permiten la modelización planar y tridimensional de vigas, columnas, arriostres y armaduras estructurales. (Computer & Structure, Inc, 2017)

**Figura 21**

*Representación gráfica de las fuerzas internas de un elemento frame*



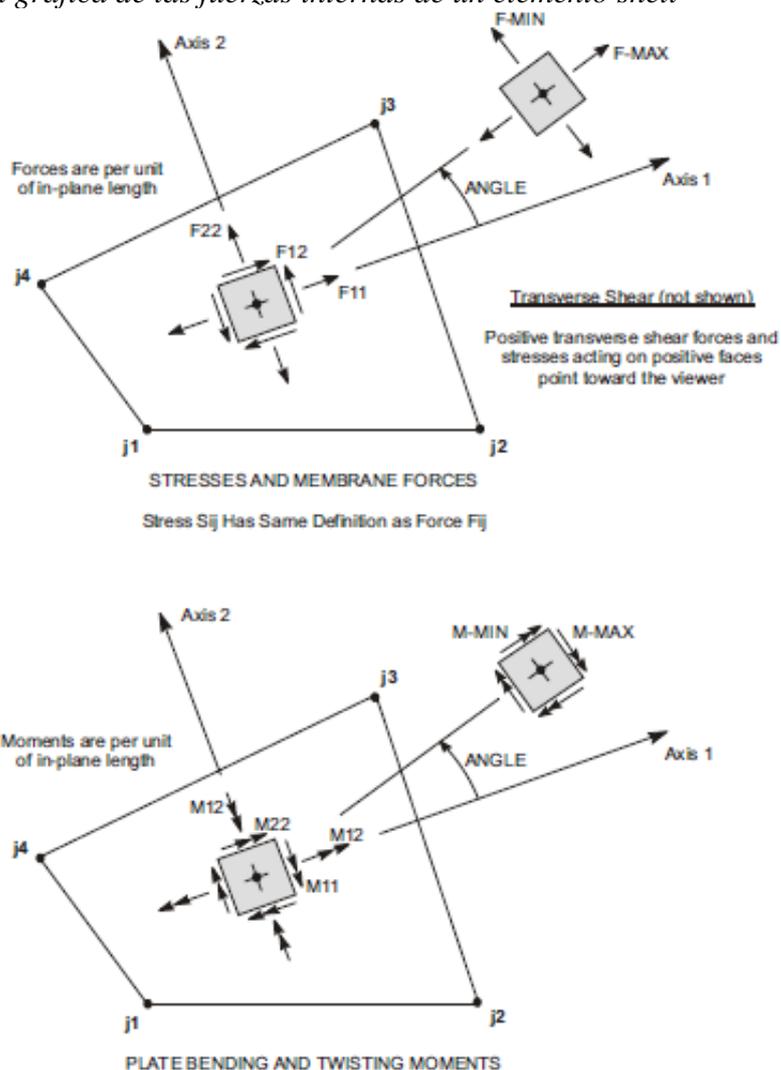
*Nota:* Imagen que muestra la representación de las fuerzas internas de los elementos frame. Tomado de *CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, SAFE and CsiBridge* (p. 143) por Computer & Structure, Inc, 2017.

### **Elementos shell**

Es un tipo de elemento utilizar para modelar en forma de planar y tridimensionales membranas, plates y cáscaras. (Computer & Structure, Inc, 2017).

**Figura 22**

Representación gráfica de las fuerzas internas de un elemento shell



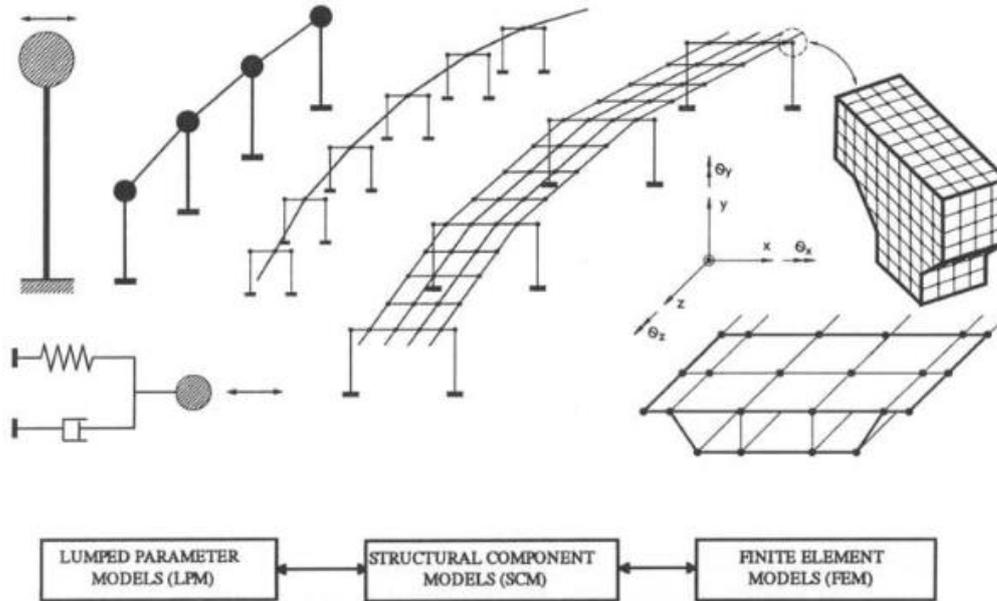
*Nota:* Imagen que muestra la representación de las fuerzas internas de los elementos shell. Tomado de *CSI Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, SAFE and CsiBridge* (p. 213) por Computer & Structure, Inc, 2017.

### 2.3.3.3 Modelamiento de la estructura

El modelamiento estructural consiste en la idealización de diferentes elementos estructurales frente a diferentes tipos de demandas (fuerzas, momentos, aceleraciones y otros).

**Figura 23**

*Niveles de modelamiento para análisis sísmico en puentes*



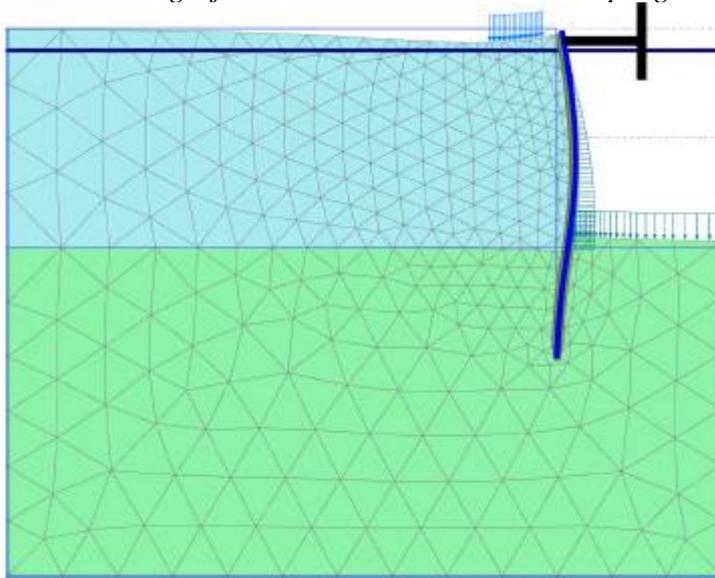
*Nota:* Tomado de *Seismic design and retrofit of bridges* (p. 159) por Priestley et Al., 1996, John Wiley & sons, Inc.

#### 2.3.3.4 Modelamiento del suelo

El modelamiento del suelo en Plaxis v20 tiene una relación directa entre los esfuerzos efectivos y las deformaciones aplicando el método de elementos finitos, por tanto, se procederá a realizar a definir los estratos de suelo, la estructura, cargas, la malla de elementos finitos y proceso constructivo para determinar las deformaciones y esfuerzos de las respuestas geotécnicas necesarias.

**Figura 24**

*Representación gráfica de resultados a través del programa Plaxis.*



*Nota:* Tomado de *PLAXIS 2D Tutorial Manual CONNECT Edition V20* de Plaxis bv (p. 40), 2019, Bentley Systems.

### **2.3.4 Análisis estructural**

#### **2.3.4.1 Definición**

El análisis estructural consiste en la determinación de los efectos en la estructura y sus componentes debido a las cargas físicas actuantes, tales como cargas gravitatorias, de viento, arena, nieve, temperatura, sísmicas y otros. A partir de este proceso del cálculo estructural se procede a realizar el diseño pertinente a los elementos, considerando las demandas obtenidas.

#### **2.3.4.2 Caracterización de grados de libertad**

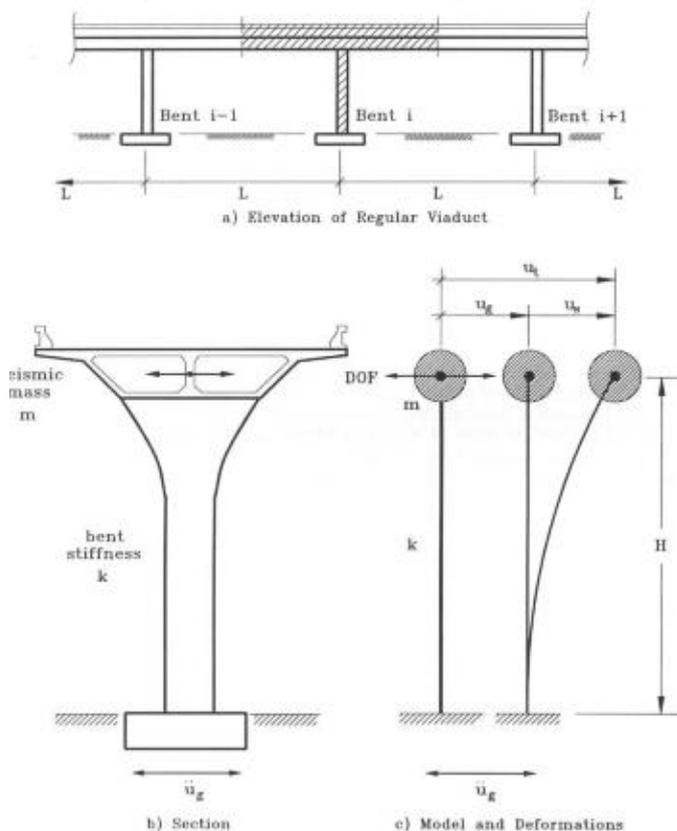
##### **2.3.4.2.1 Caracterización de un grado de libertad.**

Los puentes al tener pocos elementos que aportan rigidez, se pueden conceptualizar como un sistema de un grado de libertad, tal como se presenta en la siguiente figura, ver figura 2; esto conlleva a idealizar un vano intermedio de la superestructura, considerando cargas actuantes, elementos geométricos y otros, junto a la modelización de las partes de la subestructura, considerando los estribos u pilares, para poder representarlo en un modelo matemático que ayuda a determinar las respuestas

estructurales a nivel representativo. Este sistema de un grado de libertad se puede aplicar para realizar una verificación a modelizaciones e idealizaciones más complejas, tales como modelamiento 3D. (Priestley et al, 1996).

### Figura 25

*Sistema representativo de un solo grado de libertad de un puente.*



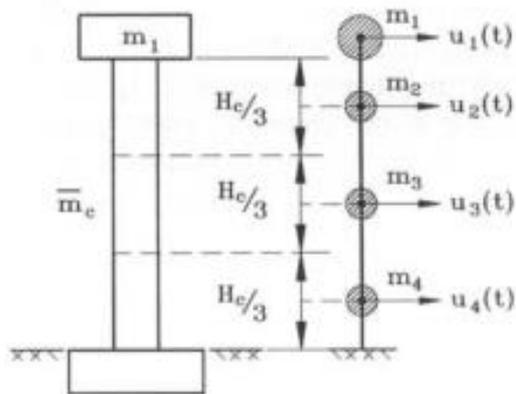
*Nota:* Tomado de *Seismic design and retrofit of bridges* por Priestley (p. 161) et al., 1996, John Wiley & sons, Inc.

#### 2.3.4.2.2 Caracterización de multigrado de libertad

La subestructura de un puente puede dividirse como masas concentradas iguales, para obtener una mejor aproximación a la realidad. En otras palabras, se observa las deformaciones y periodos dependiendo del número de discretizaciones. (Priestley et al, 1996).

**Figura 26**

*Sistema representativo de multigrado de libertad de análisis de un puente.*



*Nota:* Tomado de *Seismic design and retrofit of bridges* (p. 166) por Priestley et al., 1996, John Wiley & sons, Inc.

### 2.3.4.3 Análisis lineal

#### 2.3.4.3.1 Análisis Modal Espectral

Según Priestley et al. (1996) el análisis modal espectral es una herramienta de análisis que permiten cuantificar la máxima demanda a partir de un espectro sísmico para un tipo de suelo. Este análisis es basado en las rigideces de los elementos estructurales y la suposición de un coeficiente de amortiguamiento equivalente.

Este análisis es comúnmente utilizado para determinar los desplazamientos máximos a partir de un periodo fundamental de la estructura, basado en un análisis lineal estático porque se espera que los elementos se comporten de manera elástica.

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{c}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{k}\mathbf{u}(t) = \mathbf{p}_{\text{eff}}(t)$$

Donde  $\ddot{\mathbf{u}}(t)$  es el vector de aceleraciones,  $\dot{\mathbf{u}}(t)$  es el vector de velocidades,  $\mathbf{u}(t)$  es el vector de desplazamiento,  $\mathbf{m}$  es la matriz de masas,  $\mathbf{c}$  es la matriz de amortiguamiento, y  $\mathbf{k}$  es la matriz de rigidez.

$$\mathbf{p}_{\text{eff}}(t) = -\mathbf{m}\mathbf{r}\ddot{u}_g(t)$$

Donde  $p_{\text{eff}}$  representa la fuerza externa aplicada a la estructura,  $\mathbf{r}$  representa el vector de desplazamiento para cada grado de libertad y  $\ddot{u}_g(t)$  es la aceleración del suelo de acuerdo a una excitación sísmica.

Para un puente para el cálculo de la participación de masas ( $p$ ) se puede relacionar con la matriz “ $m$ ”, el vector de desplazamiento “ $r$ ” y los modos normalizados  $\phi$ .

$$p_i = \frac{\Phi_i^T \mathbf{m} \mathbf{r}}{\Phi_i^T \mathbf{m} \Phi_i}$$

La máxima respuesta espectral puede darse de la siguiente manera:

$$\mathbf{R}_i = p_i \cdot \Phi_i \cdot S_i$$

Donde  $S_i$  los valores máximos de contribución de cada modo para cada periodo natural  $T_i$ . Para obtener la máxima respuesta se realiza una combinación modal.

$$\mathbf{R} = \sum_i |\mathbf{R}_i| = \sum_i |p_i| \cdot |\Phi_i| \cdot S_i$$

Si se realiza de la manera anterior, se corre el riesgo de una sobrestimación de valores de respuesta, por tanto, se recurre al método de la sumatoria de la superposición cuadrática completa (SRSS) porque se considera la diferencia de signos y tiempo por cada contribución modal.

$$\mathbf{R} = \sqrt{\sum_i \sum_j \mathbf{R}_i \cdot \rho_{ij} \cdot \mathbf{R}_j}$$

Donde  $\rho_{ij}$  representa el coeficiente de acoplamiento entre los modos  $i$  y  $j$ .

$$\rho_{ij} = \frac{8\sqrt{\xi_i \xi_j} (\xi_i + t\xi_j) t^{3/2}}{(1 - t^2)^2 + 4\xi_i \xi_j t(1 + t^2) + 4(\xi_i^2 + \xi_j^2) t^2}$$

$$t = T_i/T_j$$

Donde  $T_i$  y  $T_j$  representa los periodos de los modos  $i$  y  $j$ .

### 2.3.4.4 Análisis no lineal-estático

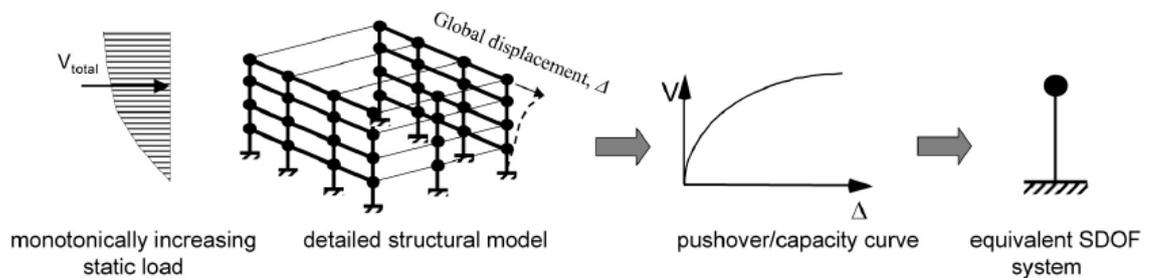
#### 2.3.4.4.1 Análisis Pushover

El análisis Pushover consiste en el desarrollo de curvas de capacidad de la estructura, convirtiendo un sistema multigrado de libertad en un sistema de un grado de libertad (SDOF) a través de la modelización de las propiedades geométricas y del

material, frente a una fuerza monótonica de tipo estática que se incrementa hasta obtener la máxima deformación global. (FEMA, 2000)

### Figura 27

Representación gráfica de un sistema de un grado de libertad (SDOF) equivalente desde una curva de capacidad.



Nota: Tomado de *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures* (p.2-4) por ATC, 2005.

#### 2.3.4.1 Comportamiento no lineal

El comportamiento no lineal de los materiales presentes en las estructuras de concreto armado difiere al comportamiento elástico lineal. Esto se observa en la presencia de otros efectos, según (Mari, 2011, en Maldonado, 2012):

- Comportamiento frágil y no lineal.
- Fenómenos reológicos presentes por la composición química del material
- El comportamiento elastoplástico del acero de refuerzo
- Incremento de los efectos de segundo orden, por el cambio de rigideces presentes en la estructura de concreto armado.
- Fenómenos de carga y descarga frente a demandas de diseño basadas en la vida útil y la construcción

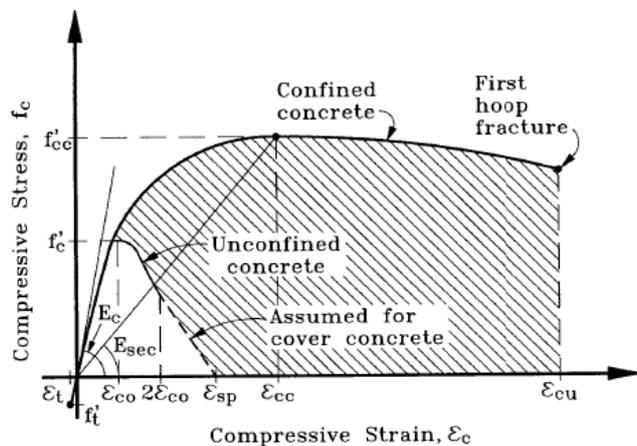
##### 2.3.4.1.1 Comportamiento no lineal del concreto

El efecto de la no linealidad del concreto debe ser incluido en análisis sísmico. En puentes la ductilidad es incluido mediante la inclusión de rótulas plásticas, igualmente, los refuerzos transversales brindan el efecto de confinamiento al concreto, evitando el efecto de pandeo al refuerzo longitudinal. Este efecto permite elevar la resistencia de compresión del núcleo de concreto frente a fuerzas externas, aumentando las propiedades

del mismo. Este efecto normalmente es omitido en el diseño y análisis estructural, ya que normalmente disminuyen frente a cargas cíclicas. (Priestley et al., 1996).

### Figura 28

Representación gráfica de esfuerzo-deformación para concreto en compresión



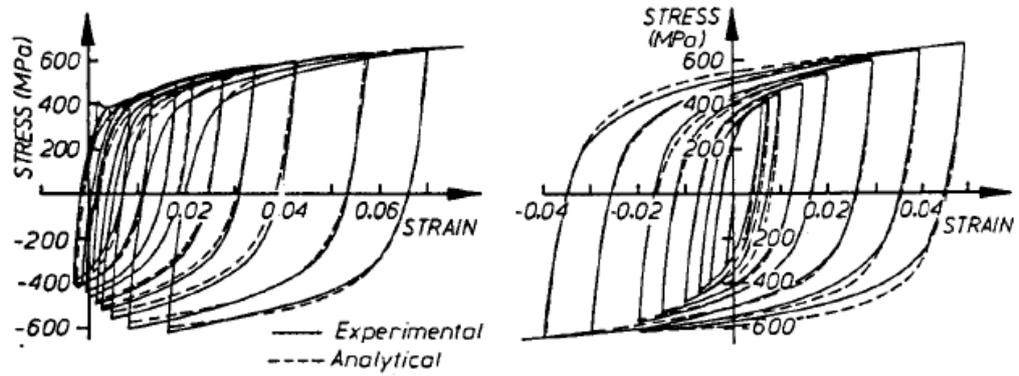
Nota: Tomado de *Seismic design and retrofit of bridges* por Priestley et al., 1996 (p. 270), John Wiley & sons, Inc.

#### 2.3.4.1.2 Comportamiento no lineal del acero de refuerzo

El acero de refuerzo presenta la ductilidad en el concreto estructural frente a cargas cíclicas generando alto niveles de plasticidad sin reducción de los esfuerzos. Durante la aplicación de cargas cíclicas se observa la presencia de un comportamiento no lineal del acero de refuerzo. La curva de esfuerzo-deformación depende de la forma cíclica de aplicación de la carga, en otras palabras, durante un evento sísmico el acero, la disposición del acero de forma simétrica u asimétrica genera un comportamiento inelástico, diferente al comportamiento elástico frente a una carga monotónica pero disipado de manera rápida. (Priestley et al., 1996).

### Figura 29

Representación gráfica de esfuerzo-deformación para el acero: (a) comportamiento asimétrico, (b) comportamiento simétrico.



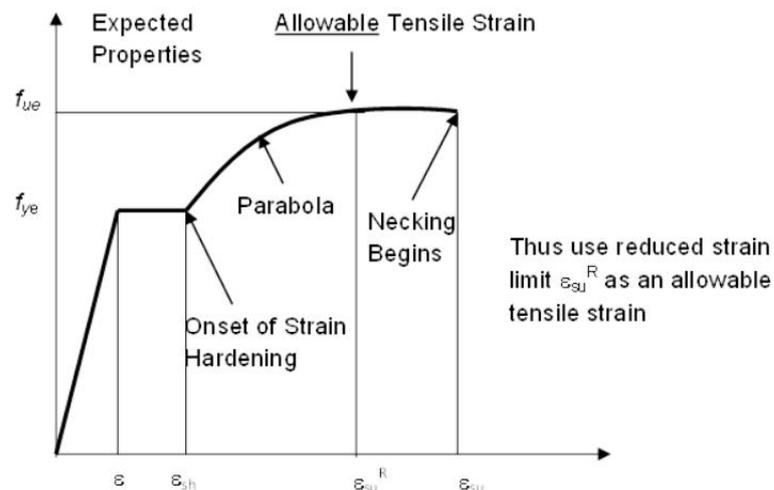
(a) With Unsymmetrical Strain Cycles

(b) With Symmetrical Strain Cycles

Nota: Tomado de *Seismic design and retrofit of bridges* por Priestley et al., 1996 (p. 276), John Wiley & sons, Inc.

### Figura 30

Modelo paramétrico del comportamiento del acero de refuerzo típico



Nota: Tomado de *LRFD Seismic Analysis and Design of Bridges Reference Manual* por Marsh et al. 2014 (p. 6-40), FHWA.

El gráfico anterior representa el comportamiento del acero de refuerzo típico, donde se observa zonas de linealidad, plasticidad, endurecimiento por deformación y estricción, condicionados por el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo último.

**Figura 31**  
*Propiedades del acero de refuerzo.*

Property	Notation	Bar Size	ASTM 706 (Gr 60)	ASTM 615 (Gr 60)
Specified Minimum Yield Stress (ksi)	$f_{ye}$	#3-#18	60	60
Expected Yield Stress (ksi)	$f_{ye}$	#3-#18	68	68
Expected Tensile Strength (ksi)	$f_{ue}$	#3-#18	95	95
Expected Yield Strain	$\epsilon_{ye}$	#3-#18	0.0023	0.0023
		#3-#8	0.015	0.015
		#9	0.0125	0.0125
		#10 & #11	0.0115	0.0115
		#14	0.0075	0.0075
		#18	0.0050	0.0050
Onset of Strain Hardening	$\epsilon_{sh}$	#4 - #10	0.090	0.060
		#11 - #18	0.060	0.040
Reduced Ultimate Strain	$\epsilon_{su}^R$	#4 - #10	0.120	0.090
		#11 - #18	0.090	0.060
Ultimate Tensile Strain	$\epsilon_{su}$	#4 - #10	0.120	0.090
		#11 - #18	0.090	0.060

*Nota:* Tomado de *LRFD Seismic Analysis and Design of Bridges Reference Manual* por Marsh et al. 2014 (p. 6-42), FHWA.

### 2.3.4.1.3 Comportamiento geométrico no lineal

Según Chen et al. (2014) para estudiar el comportamiento del momento curvatura se debe tener en cuenta los siguientes postulados:

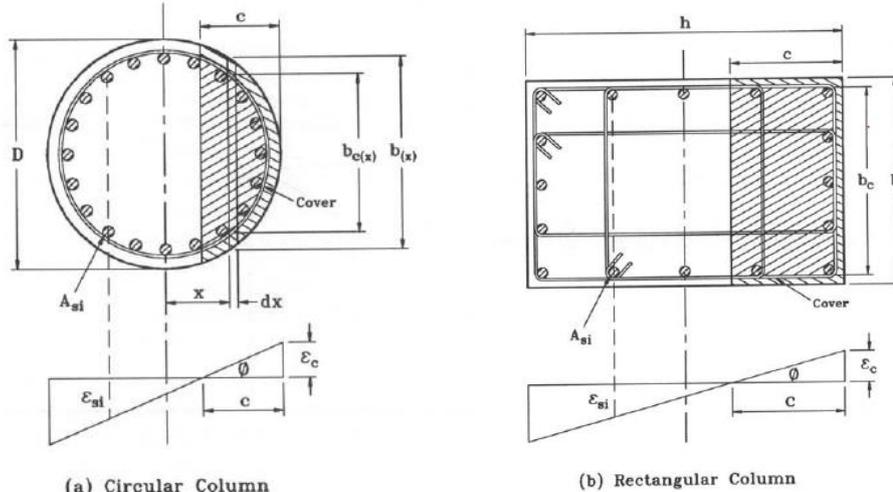
- Las secciones permanecen planas ante efectos de momentos.
- Las deformaciones de corte y torsional no se consideran
- Las relaciones del esfuerzo-deformación del concreto y el acero son consideradas.
- Se considera una adherencia perfecta entre el concreto y el acero.

### 2.3.4.2 Diagrama de momento-curvatura

Según Priestley et al. (1996) una alternativa de diseño es utilizar un bloque de esfuerzo basado en el análisis del diagrama de momento-curvatura que es usado para predecir los valores de sobrerresistencia de las rótulas plásticas.

**Figura 32**

Representación gráfica del análisis de secciones de momento-curvatura.



Nota: Tomado de *Seismic design and retrofit of bridges* por Priestley et al., 1996 (p. 300), John Wiley & sons, Inc.

Para calcular el diagrama momento curvatura se debe satisfacer las siguientes condiciones:

- Fuerza axial

$$P = \int_{x=(D/2)-c}^{D/2} [b_{c(x)}f_c(\epsilon_x) + (b(x) - b_{c(x)})f_{cu}(\epsilon_x)] dx + \sum_{i=1}^n A_{si}f_s(\epsilon_{xi})$$

- Momento flector

$$M = \int_{x=(D/2)-c}^{D/2} [b_{c(x)}f_c(\epsilon_x) + (b(x) - b_{c(x)})f_{cu}(\epsilon_x)]x dx + \sum_{i=1}^n A_{si}f_s(\epsilon_{xi})x_i$$

Y la curvatura resultante es

$$\phi = \frac{\epsilon_c}{c}$$

Donde:

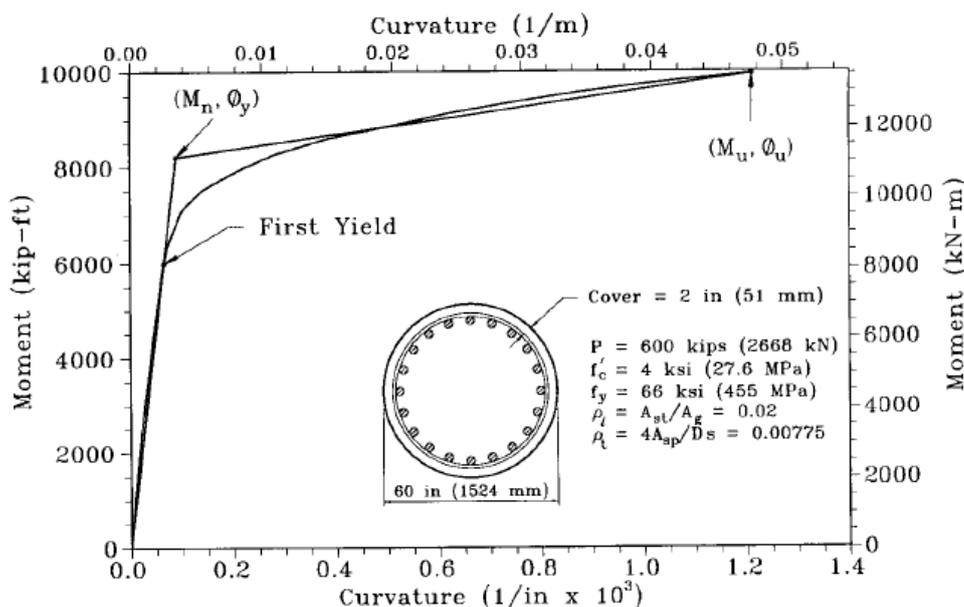
$f_c(\epsilon)$ ,  $f_{cu}(\epsilon)$ , y  $f_s(\epsilon)$  son relaciones de esfuerzo-deformaciones para concreto confinado, sin confinar y el acero de refuerzo, respectivamente.  $A_{si}$  es el área de refuerzo a una distancia "x".  $\phi$  representa la curvatura,  $\epsilon$  es la deformación unitaria.

### 2.3.4.1 Rótulas plásticas

Según Priestley et al. (1996) la rotación de la sección junto a la ductilidad de la depende de la geometría y la distribución del acero de refuerzo dentro de la región de la rótula plástica. En la rótula plástica, la sección empieza a plastificarse, sin incrementar los momentos de curvatura presentes, tal como se observa en la siguiente figura.

**Figura 33**

Representación gráfica bilinear aproximada de la relación del momento-curvatura.



*Nota:* Se observa el comportamiento bilineal idealizado de la relación momento-curvatura. Tomado de *Seismic design and retrofit of bridges* por Priestley et al., 1996 (p. 308), John Wiley & sons, Inc.

Donde:

$\phi_y$  es la curvatura de la primera fluencia de acuerdo a un momento nominal  $M_n$

$\phi_u$  es la última curvatura de acuerdo a un momento último  $M_u$

La correspondiente curvatura plástica  $\phi_p$  se obtiene de la siguiente relación;

$$\phi_p = \phi_u - \phi_y$$

Esta curvatura tiene que ser constante en una longitud de curvatura equivalente plástica  $L_p$  según la siguiente definición:

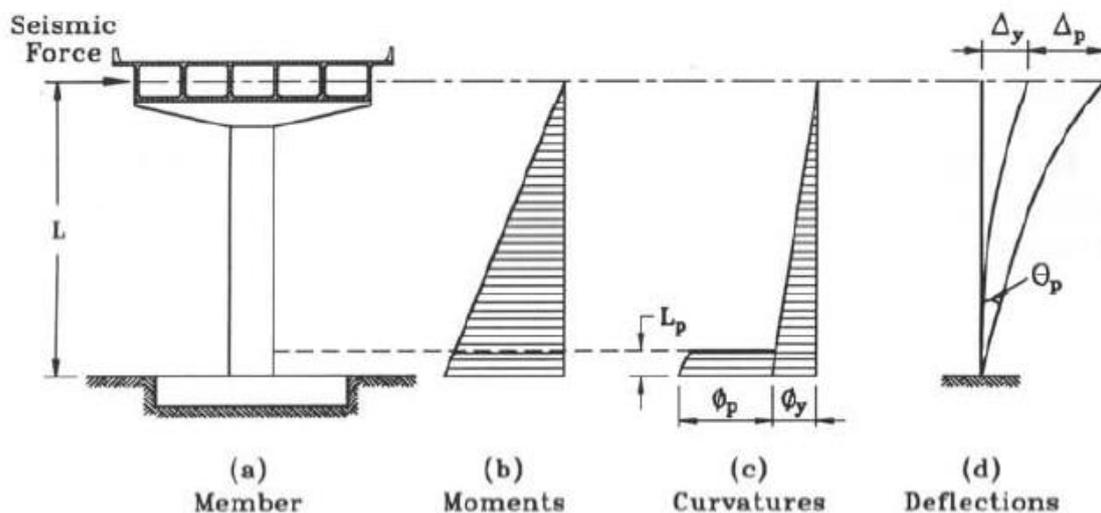
$$L_p = \begin{cases} 0.08L + 0.022f_{ye}d_{bl} \geq 0.044f_{ye}d_{bl} & (f_{ye} \text{ in MPa}) \\ 0.08L + 0.15f_{ye}d_{bl} \geq 0.3f_{ye}d_{bl} & (f_{ye} \text{ in ksi}) \end{cases}$$

Donde:

L representa la longitud total de la región crítica a estudiar, y  $d_{bl}$  es el diámetro de refuerzo principal longitudinal.

**Figura 34**

*Representación gráfica de la deformación inelástica en un pilar de puente*



*Nota:* Se observa la longitud de la rótula plástica lo que representa un aumento de curvatura total. Tomado de *Seismic design and retrofit of bridges* por Priestley et al., 1996 (p. 309), John Wiley & sons, Inc.

### 2.3.5 Respuestas sísmicas de la subestructura

#### 2.3.5.1 Definición

Respuestas máximas estudiadas para el diseño sísmico de estructuras, estos registros son de acuerdo a un estudio previo de acuerdo a data real que presenta el proyecto.

#### 2.3.5.2 Desempeño estructural

Consiste en determinar el estado de la estructura después de un evento sísmico, es decir se revisa cómo se encuentra los elementos que la componen. En otras palabras, gracias al desempeño poder evaluar la resiliencia frente a eventos sísmicos de gran magnitud para tomar medidas que salvaguarden las vidas dentro de una estructura.

### 2.3.5.2.1 Métodos de los coeficientes C/D

Este método fue desarrollado en el FEMA 356 (FEMA, 2000), presentado en el FEMA 440 (ATC, 2005) en la sección 3.4 del documento. El método calcula el desplazamiento objetivo (target displacement) a partir coeficientes determinados de un análisis no linear estático, tal como se observa en la siguiente fórmula:

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g$$

El desplazamiento objetivo ( $\delta_t$ ) corresponde a la altura del nivel calculado, en el caso del puente, se determinará en la parte superior de la superestructura.

Donde:

$C_0$ : factor de modificación relacionado al desplazamiento espectral para un sistema equivalente de un grado de libertad.

$C_1$ : factor de modificación relacionado al máximo desplazamiento esperado para un sistema equivalente de un grado de libertad con un sistema plástico histerético de respuesta.

$$C_1 = \begin{cases} 1.0 & \text{for } T_e \geq T_s \\ 1.0 + \frac{(R-1)T_s}{T_e} & \text{for } T_e < T_s \\ \frac{1}{R} & \end{cases}$$

$$R = \frac{S_a}{V_y/W} \cdot C_m$$

Donde:

$V_y$ : Límite elástico, ver sección 3.3.3.2.4, FEMA 356 (FEMA,2000).

$W$ : Peso sísmico de la estructura.

$C_m$ : masa efectiva calculada por el periodo fundamental de la estructura utilizando el método de Eigenvalue.

Estos valores calculados no pueden ser mayores a los siguientes:

$$C_1 = \begin{cases} 1.5 & \text{for } T_e < 0.1 \text{ s} \\ 1.0 & \text{for } T_e \geq T_s \end{cases}$$

$C_2$ : Factor de modificación que representa el efecto histerético, degradación de rigidez y el deterioro de la resistencia del valor máximo de respuesta.

$C_3$ : Factor de modificación para representar el desplazamiento debido al efecto P- $\Delta$ .

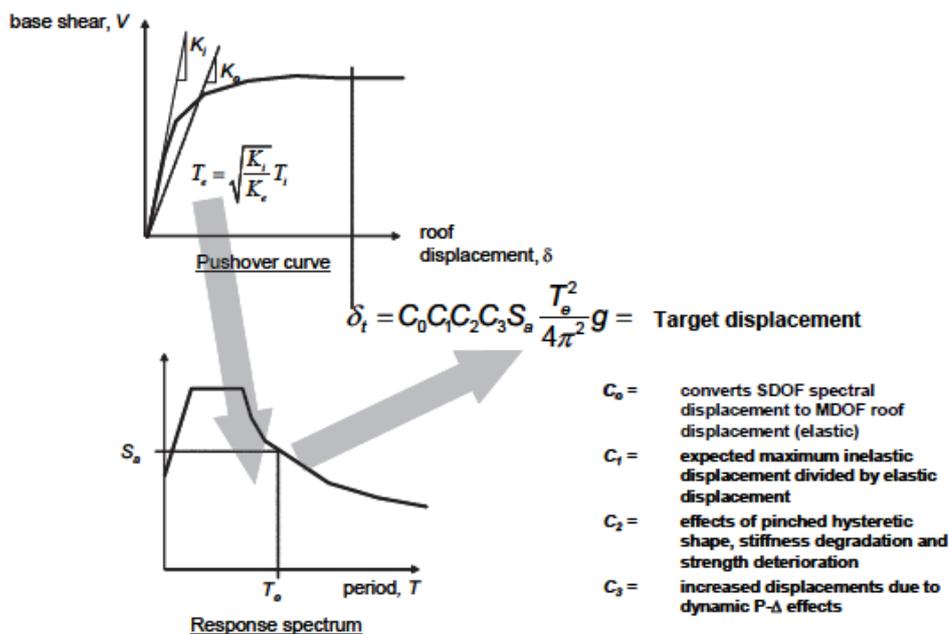
$C_3=1.0$ , en el caso de que existe una fluencia positiva, no obstante, puede tomar el siguiente valor:

$$C_3 = 1.0 + \frac{|\alpha|(R-1)^{3/2}}{T_e}$$

Donde,  $\alpha$  representa la rigidez elástica de fluencia efectiva en una relación de la fuerza no lineal se caracteriza en una función bilineal.

### Figura 35

Representación gráfica del método de coeficiente de FEMA 356 para estimar el desplazamiento objetivo.



Nota: Tomado de *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures* (p.2-10) por ATC, 2005.

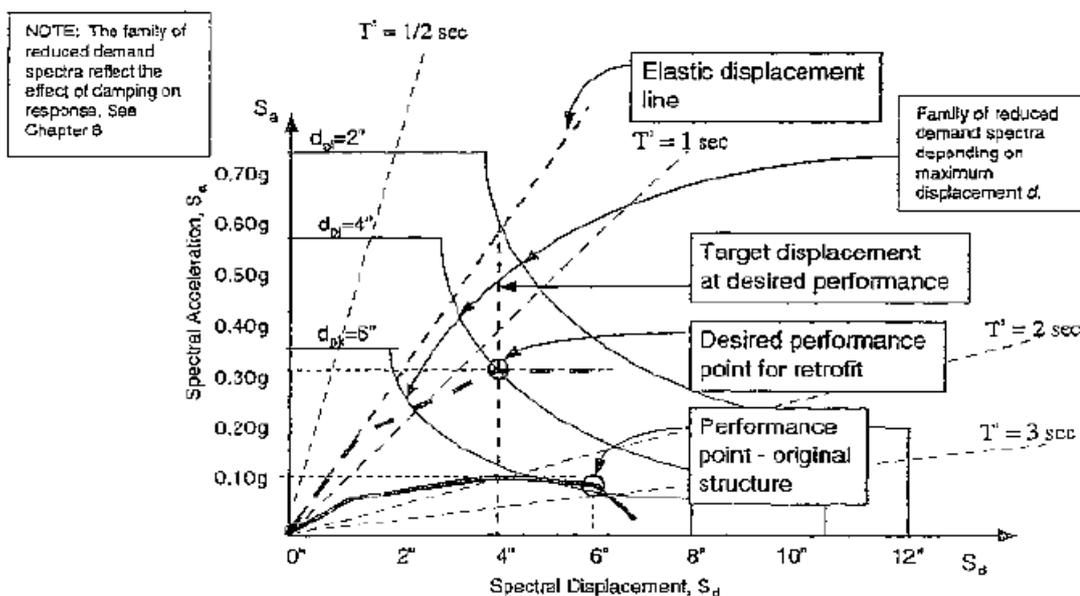
### 2.3.5.2.2 Método del espectro Capacidad

Este método fue presentado en la normativa ATC-40 (1996), el cual consiste en la representación gráfica el espectro de capacidad de capacidad global de la estructura a evaluar con el espectro de demanda sísmica para observa de manera visual la obtención del desempeño estructural.

El método constante de tres elementos: el espectro de capacidad, el espectro de demanda y el punto de desempeño, obtenido por la superposición de curvas. De igual manera, el espectro de demanda debe ser convertido a un espectro de aceleración-desplazamiento (ADRS).

**Figura 36**

*Representación gráfica del método de espectro capacidad y el espectro de respuesta de ATC-40 para estimar el punto de desempeño*



Nota: Tomado de *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings* (p.5-31) por ATC, 1996.

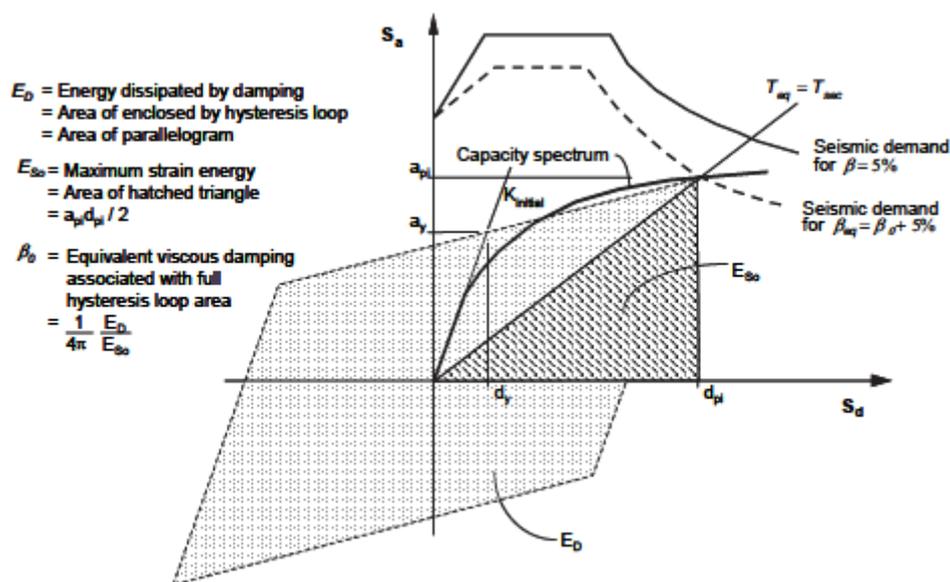
### Espectro capacidad

A partir de los resultados obtenidos se procede a comparar las curvas pushover frente la idealización de los espectros de respuesta del suelo, dicha metodología se basa en la obtención del máximo desplazamiento de la estructura en un grado de libertad, para

obtener el periodo efectivo estimado y el amortiguamiento de la estructura. Esta metodología puede ser aplicada de acuerdo al código FEMA 356, ambos llevan una simplificación en la linealización del comportamiento de la estructura, aplicando SDOF. No obstante, ambos métodos se diferencian en la técnica para determinar la máxima deformación.

### Figura 37

Representación gráfica del método de espectro capacidad de ATC-40 para estimar el desplazamiento objetivo.



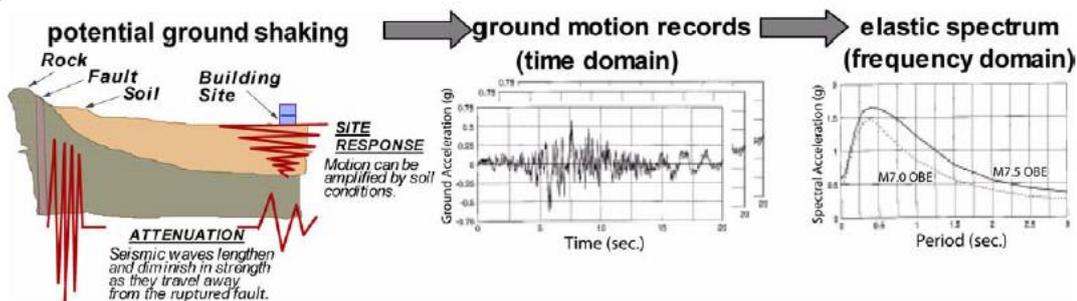
Nota: Tomado de *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures* (p.2-11) por ATC, 2005.

### Espectro de demanda

Frente al desarrollo de curvas de capacidad de las estructuras, tanto en edificaciones como en puentes; se presenta efectos dinámicos externos a las estructuras, tales como movimientos del suelo, respuestas estructurales, esfuerzos y deformaciones, en consecuencia, se puede estimar del movimiento del suelo a través de espectros de respuestas durante la ocurrencia del sismo. Existe un cierto grado de incertidumbre para el modelamiento de los espectros, por tanto, el análisis de riesgo sísmico permite la estimación de los parámetros del movimiento del suelo a partir de diferentes sismos ocurridos en el sitio. A partir de los diferentes valores obtenidos, se procede a realizar una representación del movimiento que se denomina espectro de respuesta.

**Figura 38**

Representación gráfica del movimiento de suelo y caracterización final a partir de un espectro elástico.

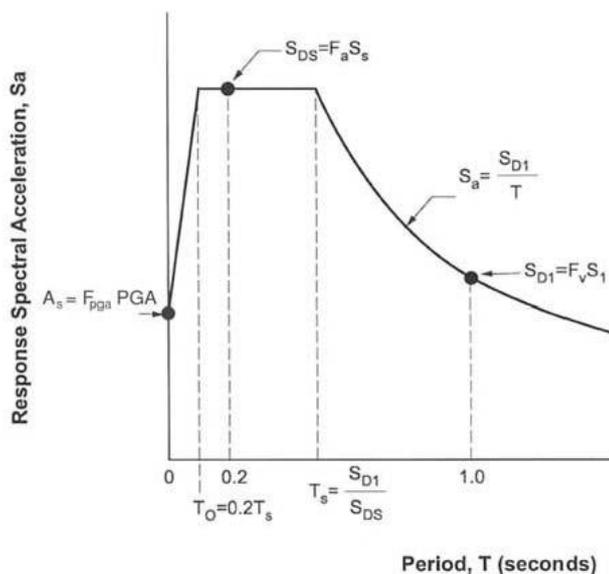


Nota: Tomado de *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures* (p.2-5) por ATC, 2005.

En el apartado 3.4.1 del documento LRFD Seismic Bridge Design se define cómo debe construirse el espectro de aceleraciones. Se incluye a continuación la figura 3.4.1-1 con la definición general del espectro.

**Figura 39**

Espectro de respuesta de aceleración.



Nota: Tomado de *AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design*. (p.3-14) por AASHTO, 2011.

Los valores del espectro se definen de la siguiente manera:

#### Coefficientes de aceleración:

PGA: Coeficiente de aceleración pico en terreno tipo C, suelo muy denso o roca blanda.

Ss: Coeficiente de aceleración espectral para un período de 0,2 s.

S1: Coeficiente de aceleración espectral para un período de 1,0 s.

**Factores de sitio:**

Fpga: Factor de sitio para la aceleración de pico

Fa: Factor de sitio para la aceleración de períodos de 0,2 s

Fv: Factor de sitio para la aceleración de períodos de 1,0 s

**Definición de los puntos principales del espectro:**

$$A_s = F_{pga} \cdot PGA$$

$$S_{Ds} = F_a \cdot S_s$$

$$S_{D1} = F_v \cdot S_1$$

**Períodos que definen la meseta del espectro:**

$$T_s = S_{D1} / S_{Ds}$$

$$T_0 = 0,2 T_s$$

Para valores intermedios de períodos las aceleraciones se definen de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$C_{sm}(T_m) := \begin{cases} A_s + (S_{DS} - A_s) \cdot \frac{T_m}{T_0} & \text{if } T_m < T_0 \\ S_{DS} & \text{if } T_0 < T_m < T_s \\ \frac{S_{D1}}{T_m} & \text{otherwise} \end{cases}$$

**Conversión de espectros a espectros ADRS**

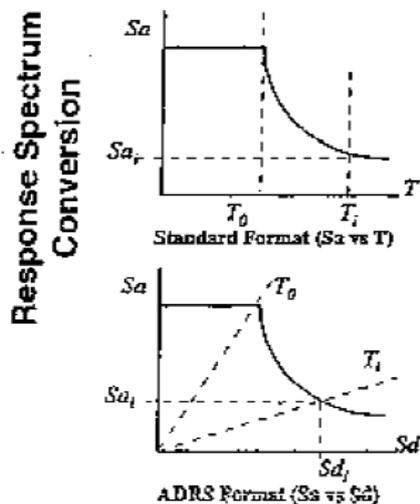
Aplicar el método de espectro-capacidad requiere que el espectro de demanda y el espectro de capacidad se encuentren en el formato ADRS, siguiendo el formato de aceleración espectral vs desplazamiento espectral. Igualmente, cada valor de desplazamiento espectral ( $S_d$ ) estará relacionada con cada punto de la aceleración espectral ( $S_a$ ), a partir de las siguientes ecuaciones:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{S_d}{S_a}}$$

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} S_a g$$

**Figura 40**

*Espectro de respuesta convertido al sistema ADRS.*



*Nota:* Tomado de *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings* (p.8-12) por ATC, 1996.

Similar caso, el espectro de capacidad debe convertirse al sistema ADRS, a partir de cada punto calculado, mediante el uso de coordenadas espectrales. Cada punto de  $V_i$ ,  $\Delta_i$  se debe convertir a las coordenadas espectrales  $(S_a, S_d)$ , mediante las siguientes fórmulas.

$$S_a = \frac{V_i}{W} / \alpha_1$$

$$S_d = \Delta_i / (PF_1 \times \phi)$$

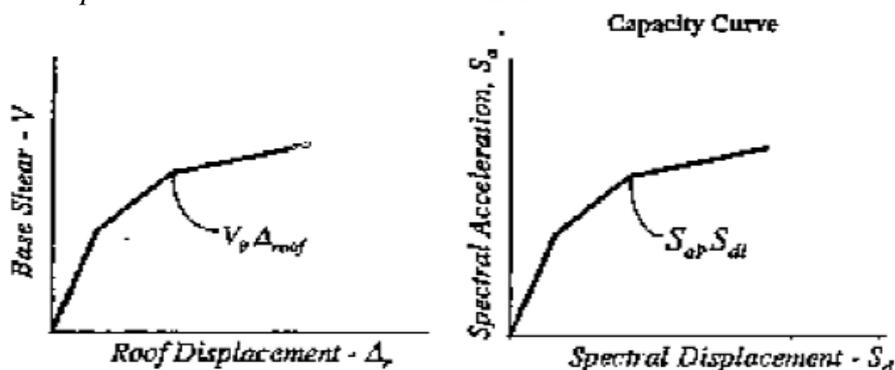
Donde:

$\phi$ : Es la amplitud del primer nivel.

$\alpha_1$  y  $PF_1$  son respectivamente la masa modal y el factor de participación del primer modo de la estructura.

**Figura 41**

*Espectro de capacidad convertido al sistema ADRS.*



*Nota:* Tomado de *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings* (p.8-12) por ATC, 1996.

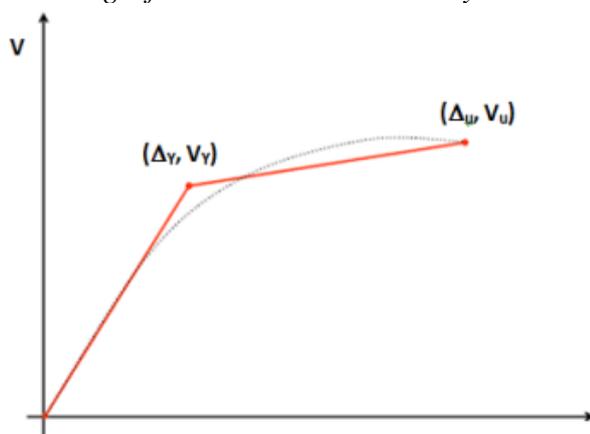
### 2.3.5.2.3 Bilinearización de la curva capacidad

Según ATC-40 (1996) la representación bilinear de la curva capacidad debe ser utilizada para determinar el amortiguamiento efectivo y la reducción de la demanda espectral. Esta curva representativa tiene la característica de poseer una energía similar a la curva capacidad calculada inicialmente (área debajo de la curva). Con la aproximación de la curva representativa a una curva bilineal se permite calcular el punto de cedencia ( $\Delta_y$ ), donde se observa el cambio de un régimen elástico a un régimen no lineal.

Adicionalmente, en la curva se representa la máxima resistencia de la estructura luego de haber pasado el estado plástico, ocasionando la presencia del punto de capacidad última ( $\Delta_u$ ).

**Figura 42**

*Representación gráfica de la curva bilineal y la curva capacidad*



*Nota:* Tomado de *Calibración de umbrales de daño sísmico para el análisis de fragilidad de estructuras de hormigón armado mediante análisis estático no lineal ("Push-over")* (p. 28) por Marte, 2014.

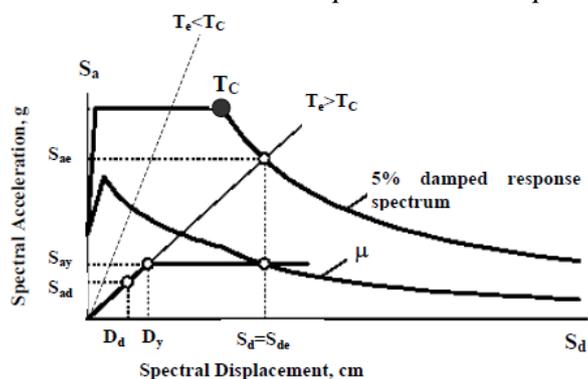
Donde  $\Delta_y$ ,  $V_y$  es la capacidad de cedencia, y  $\Delta_u$ ,  $V_u$  es la capacidad última.

#### 2.3.5.2.4 Punto de desempeño

Es el máximo desplazamiento esperado de acuerdo al sismo de diseño, aplicando las metodologías de espectro-capacidad permite cualificar en qué estado estará la estructura frente a sismos futuros.

**Figura 43**

*Determinación estimada del punto de desempeño*



*Nota:* Tomado de WP4 *Vulnerability of current building* (p. 52) por Milutinovic et al, 2003.

#### 2.3.5.2.5 Niveles de desempeño

Según ATC-40 (1996) los niveles de desempeño describen los daños físicos ocasionados por un movimiento de la estructura y del suelo, de acuerdo a la seguridad de la vida de los habitantes y la evaluación de los daños en servicio en el post sismo.

A continuación, se presenta los límites de los niveles de desempeño para la estructura, de acuerdo a Risk-UE (2003) por Milutinovic y Trendafiloski.

**Tabla 1**

*Niveles de desempeño según desplazamiento de la estructura.*

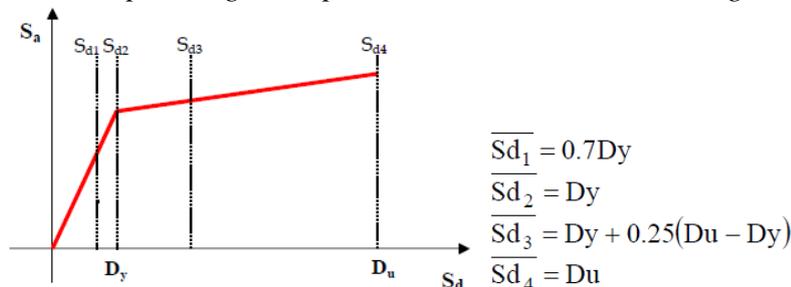
Damage Grade	Definition	Displacement Limits (AUFh)	Spectral Displacement Limits (UNIGE, CIMNE)
0	No damage	$\Delta < 0.7\Delta_y$	$D < 0.7 D_y$
1	Slight damage	$0.7\Delta_y < \Delta < 0.7\Delta_y + 0.05*\Delta_{uy}$	$0.7D_y \leq D < 1.0 D_y$
2	Moderate damage	$0.7\Delta_y + 0.05*\Delta_{uy} < \Delta < 0.7\Delta_y + 0.20*\Delta_{uy}$	$1.0 D_y \leq D < D_y + D_{uy}$
3	Extensive damage	$0.7\Delta_y + 0.20*\Delta_{uy} < \Delta < 0.7\Delta_y + 0.50*\Delta_{uy}$	$D_y + D_{uy} \leq D < D_u$
4	Very heavy damage	$0.7\Delta_y + 0.50*\Delta_{uy} < \Delta < 0.7\Delta_y + 1.00*\Delta_{uy}$	$D_u \leq D$
		$\Delta_{uy} = 0.9\Delta_u - 0.7\Delta_y$	$D_{uy} = 0.25*(D_u - D_y)$

*Nota:* Tomado de WP4 *Vulnerability of current building* (p. 61) por Milutinovic et al, 2003.

Los valores representados en la tabla 1, se puede representar gráficamente de la siguiente forma:

**Figura 44**

*Niveles de desempeño según desplazamiento de la estructura según bilinearización.*



*Nota:* Tomado de WP4 *Vulnerability of current building* (p. 62) por Milutinovic et al, 2003.

El grado de daño está en función al costo de reparación de la estructura, tal como se observa en la tabla 2.

**Tabla 2**

*Grado de daño de acuerdo al rango de daño por costo de reparación*

Damage grade	Definition	Range of damage index
0	No damage	0
1	Slight damage	0-5
2	Moderate damage	5-20
3	Extensive damage	20-50
4	Very heavy damage and collapse	50-100

*Nota:* Tomado de WP4 *Vulnerability of current building* (p. 65) por Milutinovic et al, 2003.

### 2.3.5.3 Respuestas estructurales

#### 2.3.5.3.1 Definición

Estos parámetros consisten en las demandas obtenidas frente a cargas externas en las estructuras, es decir, se observa la cuantificación de las fuerzas internas, tales como momentos, fuerzas cortantes, deformaciones laterales, giros y otros.

#### 2.3.5.3.2 Deformaciones

Son los cambios de forma de un cuerpo a partir de solicitaciones internas requeridas, es decir, frente a las acciones externas aparecen solicitaciones internas que deforman la estructura.

### 2.3.5.3.3 *Esfuerzos*

Son las fuerzas internas obtenidas frente a cargas externas.

## 2.4 **Definición de términos básicos**

**Sismo:** Se define al proceso de generación y liberación de energía para posteriormente propagarse en forma de ondas por el interior de la tierra. Al llegar a la superficie, estas ondas son registradas por las estaciones sísmicas y percibidas por la población y por las estructuras. (IGP, s.f.).

**Diseño sísmico:** Rama de la ingeniería estructural que estudia las respuestas estructurales debido a fuerzas sísmica (E.030, 2018).

**Diseño de una cimentación con columnas de grava:** Las columnas de grava surgen como extensión y mejoramiento tecnológico de la vibro-compactación o vibro-flotación, con el objetivo de ampliar su ámbito de aplicación a terrenos arcillosos o cohesivos. (Carvajal et al, 2014).

**Respuesta sísmica:** Se define como el comportamiento que tiene una estructura durante un evento sísmico, depende de parámetros como: tipo de análisis, tipo de suelo, parámetros geométricos de la estructura y otros. (Céspedes, 2019).

**Interacción suelo-estructura:** Metodología de diseño que toma en cuenta el comportamiento estructural real, considerando las propiedades del suelo para la realización de un a análisis completo. (Urteaga, 2019)

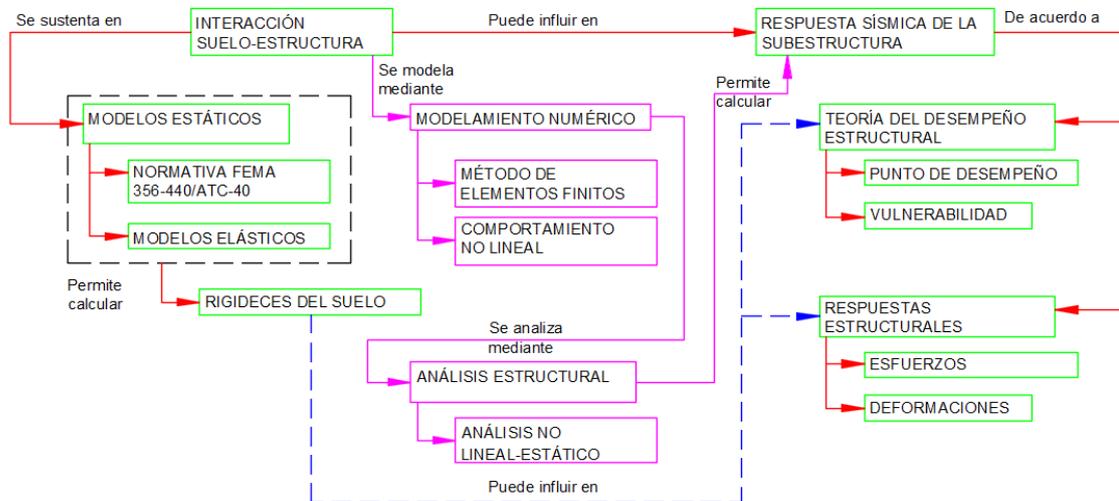
**Análisis no lineal estático:** Procedimiento de análisis que permite usar métodos simplificados de cálculo para la determinación de las deformaciones sísmicas estructurales. (FEMA 356, 1996)

**Desempeño sísmico:** Consiste en analizar la estructura de acuerdo a un desempeño adecuado, medido a través de variables dada por lineamientos. (Carrillo,2008)

## 2.5 Fundamentos teóricos que sustentan la hipótesis

**Figura 45**

*Mapa conceptual de fundamentos teóricos que sustentan la hipótesis.*



*Nota:* En la presente imagen se muestran las diferentes teorías que sustentan el estudio de esta investigación.

## 2.6 Hipótesis

### 2.6.1 General

La interacción suelo-estructura afecta en la obtención de la respuesta sísmica en la subestructura columnas de grava a través del modelamiento numérico del puente en la avenida Sánchez Cerro.

### 2.6.2 Específicas

1. Los parámetros geotécnicos del suelo afectan en la obtención de las respuestas estructurales en la subestructura a través del modelamiento numérico del puente en la avenida Sánchez Cerro.
2. Los parámetros geotécnicos del suelo afectan en la obtención del desempeño estructural en la subestructura a través del modelamiento numérico del puente en la avenida Sánchez Cerro.
3. Los parámetros de las columnas de grava afectan en la obtención de las respuestas estructurales en la subestructura a través del modelamiento numérico del puente en la avenida Sánchez Cerro.

## 2.7 Variables

**Tabla 3**  
*Operacionalización de las variables*

Objetivo	Variable	
	Variable 1	Variable 2
<b>Objetivo general:</b>  Determinar los efectos de la interacción suelo-estructura para la obtención de la respuesta sísmica de la subestructura de un puente con columnas de grava a través del modelamiento numérico.	<b>X: Interacción suelo-estructura</b>	<b>Y: Respuesta sísmica de la subestructura de un puente</b>
	<b>Dimensiones de X</b>	<b>Dimensiones de Y</b>
	X1: Parámetros geotécnicos del suelo X2: Parámetros geométricos y mecánicos del puente X3: Parámetros de las columnas de grava	Y1: Respuestas estructurales Y2: Desempeño estructural
	<b>INDICADORES DE X</b>	<b>INDICADORES DE Y</b>
	X11: Propiedades constitutivas del suelo X12: Rigideces del suelo X21: Geometría del puente X22: Propiedades de los materiales X31: Propiedades constitutivas X32: Geometría	Y11: Desplazamientos Y12: Giros transversales Y13: Fuerzas cortantes en la base Y14: Momentos flectores en la base Y15: Periodo fundamental Y21: Diagrama de curva capacidad Y22: Desplazamiento objetivo Y23: Punto de desempeño Y24: Nivel de vulnerabilidad
	1. Determinar los efectos de los parámetros geotécnicos del suelo para la obtención del desempeño estructural en la subestructura a través del modelamiento numérico del puente en la avenida Sánchez Cerro.	
	2. Determinar los efectos de parámetros geotécnicos del suelo para la obtención del desempeño estructural en la subestructura a través del modelamiento numérico del puente en la avenida Sánchez Cerro.	
	3. Determinar los efectos de los parámetros de las columnas de grava para la obtención de las respuestas estructurales en la subestructura a través del modelamiento numérico del puente en la avenida Sánchez Cerro.	

*Nota:* Se presenta el cuadro de operacionalización de variables de acuerdo a las variables independientes y dependientes.

### **3. Marco metodológico**

#### **3.1 Tipo, método de investigación y diseño de la investigación**

##### **3.1.1 Tipo de investigación**

Según Hernández (2016) la presente investigación es de carácter aplicada porque los resultados obtenidos son aplicados inmediatamente para resolver el problema de cálculo la respuesta sísmica de la subestructura debido al efecto de interacción suelo-estructura.

De igual manera, Hernández (2016) el enfoque es cuantitativo porque se van a medir las variables de estudio de forma objetiva, teniendo un juicio imparcial en la investigación aplicando la lógica deductiva, de lo general a lo particular, incluyendo el planteamiento de la hipótesis, que se medirá a partir de los indicadores.

Además, la investigación es de tipo correlacional según Hernández (2016) porque se utiliza parámetros definidos según literatura actual para relacionarse entre sí, en otras palabras, el efecto de la interacción suelo-estructura (variable independiente) hace variar a las respuestas sísmicas de la subestructura (variable dependiente).

##### **3.1.2 Método de investigación**

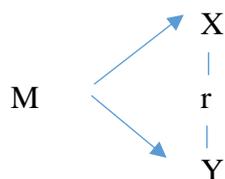
Según la clasificación de Hernández (2016), la investigación es de tipo analítico debido a que se analiza las diferentes respuestas sísmicas de la subestructura con columnas de grava.

Los estudios relacionados a la caracterización del suelo han sido realizados durante una campaña geotécnica en la zona; la geometría y propiedades mecánicas de la estructura del puente son tomadas de acuerdo a los planos de construcción. Por tanto, de acuerdo a los parámetros recopilados inicialmente se procederá a realizar un análisis computacional que servirán para determinar los efectos de la interacción suelo-estructura a partir de datos anteriores.

### 3.1.3 *Diseño investigación*

La investigación a desarrollar es de tipo no experimental según Hernández (2016); es decir no se realizará experimentos para determinar los parámetros iniciales, se considerará parámetros de campos y de planos de construcción tomados para realizar el proyecto. De acuerdo a la cantidad de mediciones es de tipo transversal, ya que se considerará solo un intervalo de tiempo referente al desarrollo del estudio. De acuerdo a la cronología es tipo retrospectivo porque se ha considerado datos referentes a un estudio de expediente “*Mejoramiento de la avenida Sánchez Cerro, tramo avenida Gullman - avenida Chulucanas, Piura-Piura*” realizada en el 2017.

Sin embargo, para efectos del análisis de las dimensiones consideradas en las variables se aplicó el diseño descriptivo correlacional.



M: Muestra: Puente en la avenida Sánchez Cerro

X: variable 1- Interacción suelo-estructura

Y: variable 2- Respuesta sísmica de la subestructura

r: relación

## 3.2 **Población y muestra**

### 3.2.1 *Población*

En el Perú, se observa la presencia de infraestructuras viales entre las cuales están las obras de arte, principalmente, puentes de diferentes tipos de sistemas estructurales, geometría de acuerdo al uso, apoyados sobre diferentes tipos de suelos, por tanto, la población se define en puentes.

### 3.2.2 *Muestra*

De los criterios mencionados anteriormente, específicamente, la muestra de estudio es el **Puente en la avenida Sánchez Cerro** ubicado en Piura de tipo no paramétrica.

Además, se procede a realizar los criterios de exclusión e inclusión a fin de definir la muestra.

- **Criterio de exclusión:** Se excluyen los puentes con secciones variables, puentes atirantados, puentes con proceso constructivo de tipo segmental, puentes integrales, puentes peatonales, puentes con diferentes sistemas de apoyos para aislamiento sísmico, puentes curvos, puentes metálicos, puentes losas y puentes vigas-losas.
- **Criterio de inclusión:** Se incluyen puentes rectos de luces de tres vanos, apoyados sobre pilares y estribos, con sistema de vigas postensadas de concreto armado apoyados sobre columnas de grava en suelos arenosos.

## 3.3 **Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

### 3.3.1 *Técnicas de recolección de datos*

#### 3.3.1.1 **Recopilación de información**

A partir de la técnica de la observación, las propiedades del suelo del presente estudio se obtuvieron de una campaña geotécnica existente realizada en el 2016 para la ejecución del proyecto Puente en la avenida Sánchez Cerro, en el cual se realizaron los siguientes ensayos:

- Ensayos SPT
- Análisis Granulométrico
- Límite de Plasticidad
- Gravedad Específica

- Ensayos Triaxiales
- Ensayos de Corte Directo
- Investigaciones geofísicas
- Ensayos en columnas de grava

Asimismo, se procedió realizar el estudio de acuerdo a los planos existentes, los cuales ya tienen definido la geometría, propiedades de los materiales, ubicación y proceso constructivo, junto con la aplicación del mejoramiento de terreno de columna de grava.

### **3.3.1.2 Análisis numérico y documental**

Con los datos obtenidos, se procedió a realizar el análisis numérico a partir de una recopilación documental de teorías, metodologías y aplicaciones para determinar los efectos de la interacción suelo-estructura.

### **3.3.2 Instrumentos**

#### **3.3.2.1 Ficha descriptiva de datos**

Esta ficha tiene como finalidad, identificar y medir los parámetros iniciales para determinar los efectos de la interacción suelo-estructura, ver anexo D. El procesamiento de la información obtenida en campo y planos será almacenado en estas fichas adecuadas a los parámetros del suelo, puente y de las columnas de grava, dividida de la siguiente manera:

- Parámetros del puente
- Parámetros del suelo
- Parámetros de las columnas de grava

#### **3.3.2.2 Guía de observación para los resultados a través del Plaxis v20.**

Esta guía de observación tiene como finalidad medir los resultados obtenidos de los parámetros de la interacción suelo estructura con la ayuda de software computacional en el campo de la ingeniería geotécnica para simular un comportamiento realista del

modelo propuesto con la utilización de Plaxis v20, ver anexo E. La guía de observación representa la dimensión “Parámetros geotécnicos del suelo” de la variable independiente “Interacción suelo estructura”.

### **3.3.2.3 Guía de observación para los resultados a través del software CSI**

#### **Bridge v22.0.2**

Esta guía de observación tiene como finalidad medir los resultados obtenidos en las respuestas sísmicas de la subestructura considerando el efecto de la interacción suelo-estructura con la ayuda de software computacional en el campo de la ingeniería estructural para simular un comportamiento realista del modelo propuesto con la utilización de C.S.I Bridge v20.02, ver Anexo E. La guía de observación representa la dimensión “Respuestas estructurales” y “Desempeño estructural” de la variable dependiente “Respuestas sísmicas”.

#### **3.3.2.4 Validez de instrumentos**

Las fichas descriptivas de datos y las guías de observación son instrumentos ampliamente utilizados para organizar la información obtenida y saber la magnitud de los parámetros que se tiene para desarrollar un proyecto o una investigación, fueron validados por 3 expertos de la especialidad de Ingeniería Estructural con base a su juicio de expertos para la toma de datos en la presente investigación, ver anexo F.

Los softwares computacionales, CSI Bridge y SAP2000 v14, son respaldados por numerosos trabajos e investigaciones a nivel mundial en el campo de la ingeniería estructural, a su vez, la empresa desarrolladora del programa, *Computer and Structure Inc*, posee una alta reputación a nivel mundial de acuerdo a los proyectos manejados en el ámbito estructural. De igual manera, su trayectoria es mayor a cuatro décadas lo que la convierte en una opción confiable de los profesionales del diseño estructural. (CSI, 2020).

### **3.4 Descripción de procedimientos de análisis de datos**

A partir del uso de los instrumentos mencionados anteriormente, el procedimiento de datos se realizó mediante el uso de softwares computacionales de ingeniería tales como SAP2000, Plaxis v20, CSI-Bridge, Mathcad v15 y otros, que ayudó en la obtención de las salidas de datos tales como rigideces de suelo y las respuestas sísmicas de la subestructura (respuestas estructurales y desempeño estructural), a través del modelamiento numérico en 2D y 3. A su vez se aplicó el método de elementos finitos como método de solución, considerando las propiedades de los materiales, relaciones constitutivas, tipos de análisis, estados de esfuerzos y otros aspectos relevantes presentado en la guía de observación.

Finalmente, los resultados obtenidos por los diferentes softwares de computacional de ingeniería estructural y/o geotécnica serán medidos a través de la guía de observación planteada en el presente estudio.

## 4. Resultados y análisis de resultados

### 4.1 Resultados

#### 4.1.1 Descripciones del modelo

##### 4.1.1.1 Propiedades del suelo

Para la determinación de las propiedades del suelo se realizó una campaña geotécnica y geológica para el proyecto “Mejoramiento de la avenida Sánchez Cerro, tramo avenida Gullman - avenida Chulucanas, Piura-Piura” (2017).

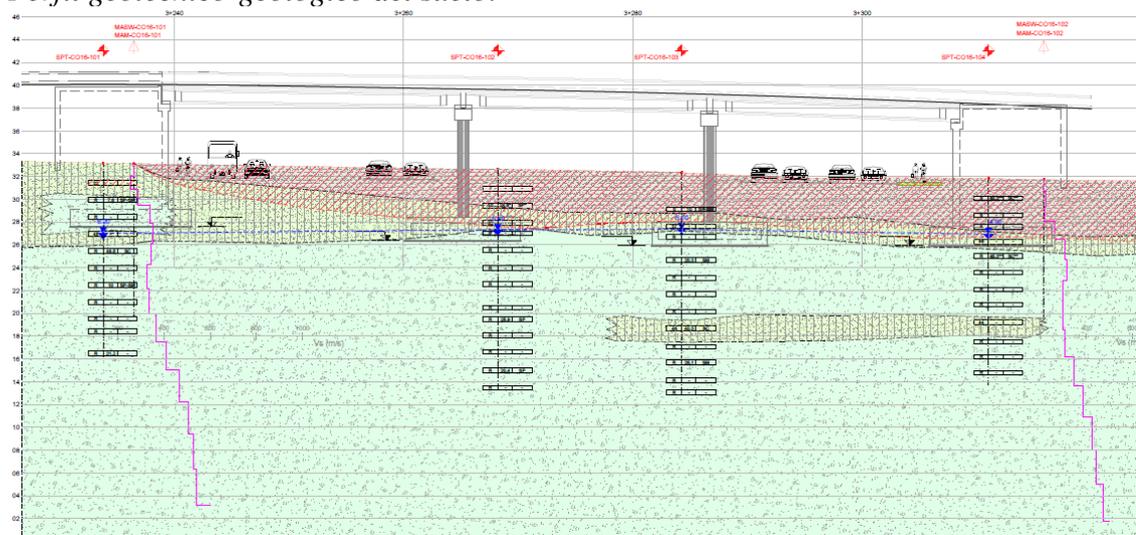
**Tabla 4**  
*Propiedades del suelo*

	Arena Sueltas	Arenas medianamente densas	Arenas densas
Profundidad de estrato	2 a 5 m	5 a 13 m	13 a 20m
Ángulo de fricción interna	28°	32°	37°
Cohesión	0kPa	0kPa	0kPa
Peso específico	16 kN/m <sup>3</sup>	17 kN/m <sup>3</sup>	18 kN/m <sup>3</sup>
Coefficiente de Poisson	0.3	0.3	0.3
Módulo de deformación	$E= 5z+5$	$E= 0.63z+32$	$E= 5z-25$
Comportamiento	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb

*Nota:* Tabla de propiedades del suelo de acuerdo al Proyecto “Puente en la avenida Sánchez Cerro” (2017).

En el siguiente gráfico se muestra la disposición de estratos del suelo donde se cimentará la estructura del puente.

**Figura 46**  
**Perfil geotécnico-geológico del suelo.**

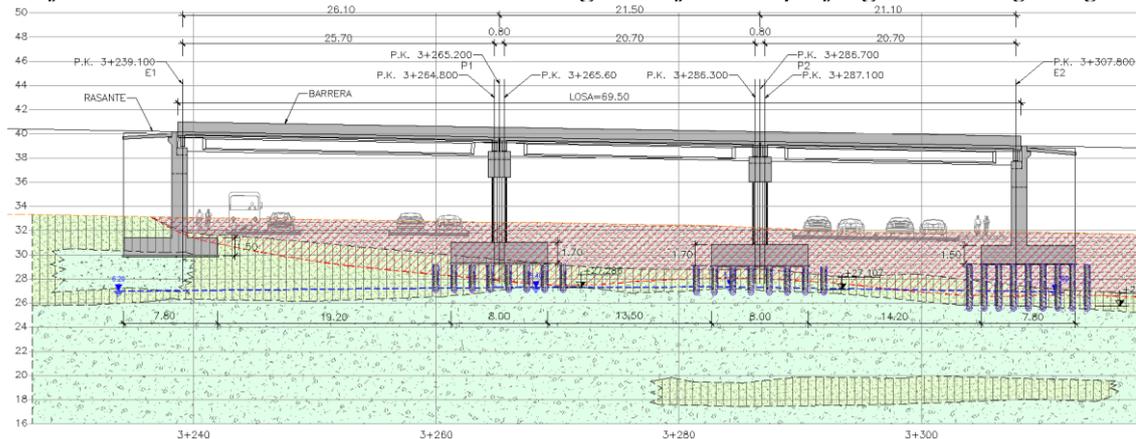


*Nota:* En la presente imagen se muestra la disposición de estratos geológicos. Tomado de proyecto “Mejoramiento de la avenida Sánchez Cerro, tramo avenida Gullman - avenida Chulucanas, Piura-Piura”, 2017, de Piura Región.

#### 4.1.1.2 Propiedades de la columna de grava

El mejoramiento de suelo consistió en la aplicación de columnas de grava repartida entre las diferentes cimentaciones del puente, tal como se presenta en la siguiente figura:

**Figura 47**  
**Perfil de tratamiento de suelo “columnas de grava” junto al perfil geotécnico-geológico.**



*Nota:* Tomado de “Mejoramiento de la avenida Sánchez Cerro, tramo avenida Gullman - avenida Chulucanas, Piura-Piura” (2017) de Piura Región.

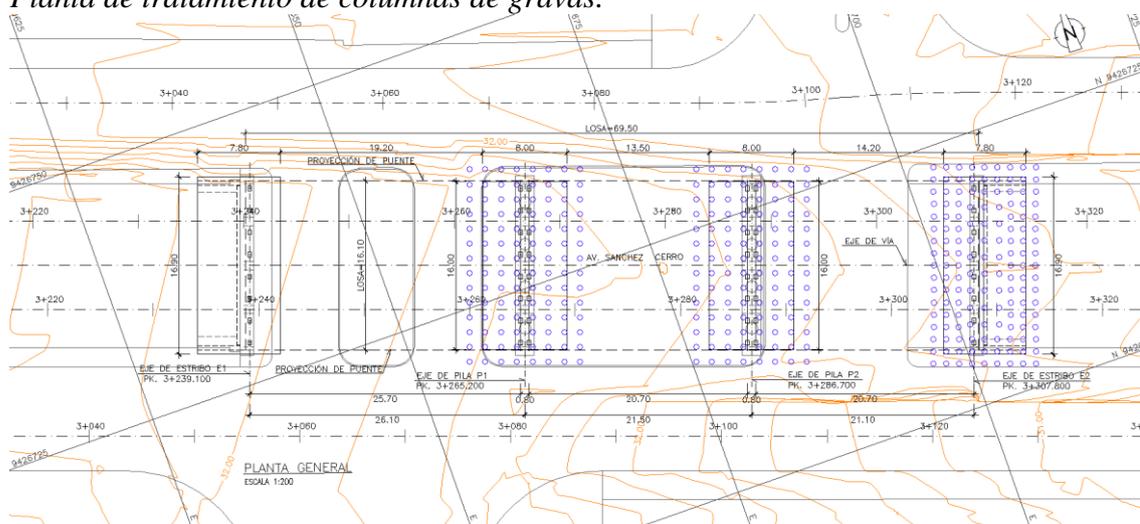
**Tabla 5**  
**Propiedades de las columnas de grava.**

<b>Columnas de grava</b>	
Diámetro	0.51 m
Espaciamiento	1.50 m
Longitud	2 a 3.50 m
Peso específico	16.5 kN/m <sup>3</sup>
Ángulo de rozamiento	36°
Cohesión	0kPa
Comportamiento	Elástico-lineal

*Nota:* Tabla de propiedades de las columnas de grava de acuerdo al Proyecto “Puente en la avenida Sánchez Cerro” (2017).

La construcción y ejecución de las columnas de grava se instalaron siguiendo el esquema planteado, tal como se muestra en la figura 48. El comportamiento elástico lineal presentado en la tabla 5, el comportamiento elástico lineal se verificó mediante la creación de un modelo axisimétrico representativo de la columna de grava.

**Figura 48**  
**Planta de tratamiento de columnas de gravas.**

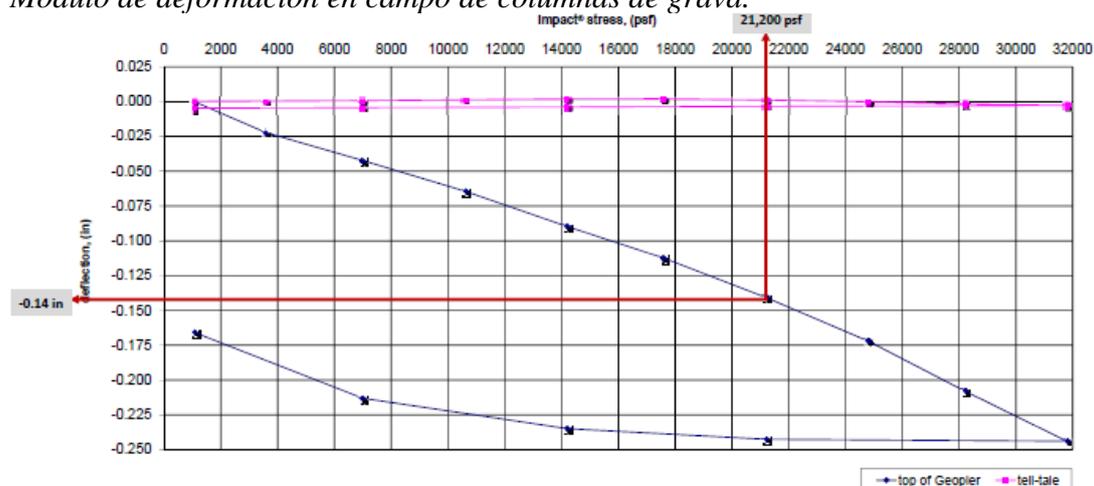


*Nota:* En la presente imagen se muestra la disposición de espaciamiento y distribución de las columnas de grava en los pilares y estribos del puente. Tomado de “Mejoramiento de la avenida Sánchez Cerro, tramo avenida Gullman - avenida Chulucanas, Piura-Piura” (2017) de Piura Región.

Además, se presenta el ensayo realizado por la empresa EMIN (2017) para la verificación del módulo de deformación de las columnas de grava, cuyo resultado nos ayudará a calibrar el modelo y determinar el módulo de elasticidad teórica referente a las columnas.

**Figura 49**

*Módulo de deformación en campo de columnas de grava.*



*Nota:* En la presente imagen se muestra el incremento de la deflexión vertical respecto a una carga aplicada. Tomado de Modulus Test (2017) de EMIN.

#### 4.1.1.3 Geometría y propiedades del puente

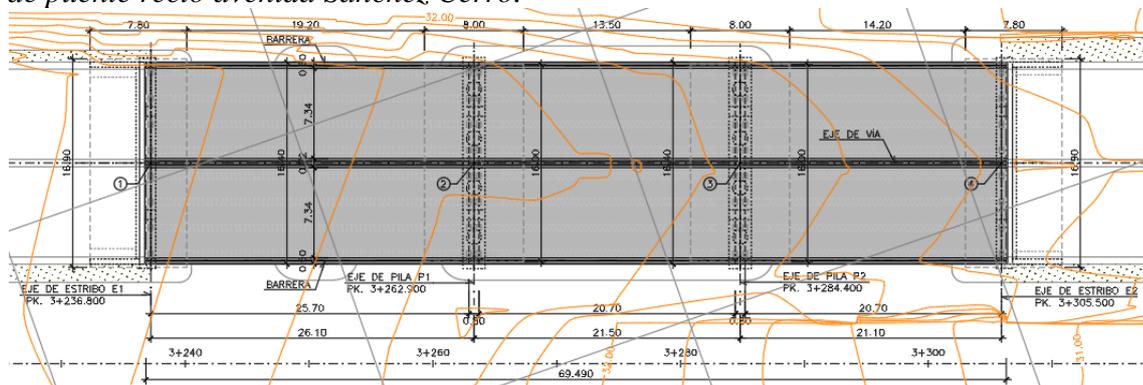
Para el modelamiento del puente, se utilizó la geometría del puente de la avenida Sánchez Cerro ubicado en el departamento de Piura, Perú. En este ítem se procedió a mostrar la geometría de la superestructura y subestructura, además, se presenta algunas secciones y elevaciones.

##### 4.1.1.3.1 Geometría del puente

El puente es de tipo recto posee tres vanos de longitudes 21.5m, 21.5m y 26m, para los vanos 1, 2 y 3, respectivamente con un ancho constante de 16.90m.

**Figura 50**

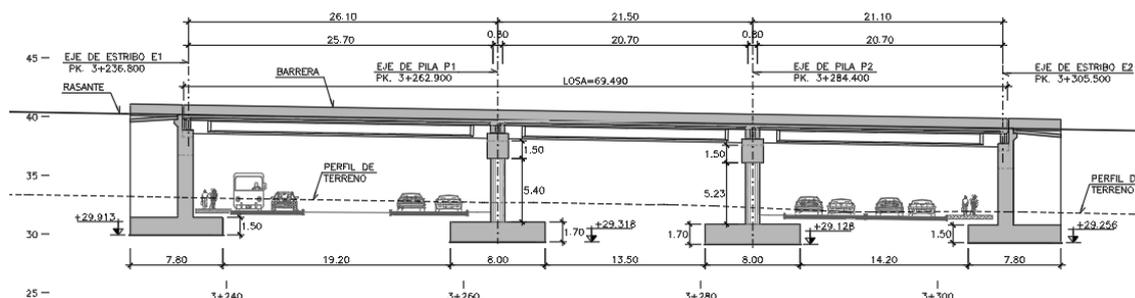
*Planta de puente recto avenida Sánchez Cerro.*



*Nota:* Tomado de “Mejoramiento de la avenida Sánchez Cerro, tramo avenida Gullman - avenida Chulucanas, Piura-Piura” (2017) de Piura Región.

La elevación del puente presenta dos estribos en los extremos y dos pilares centrales con una altura aproximada de 5.40m a 5.23m desde el nivel del terreno.

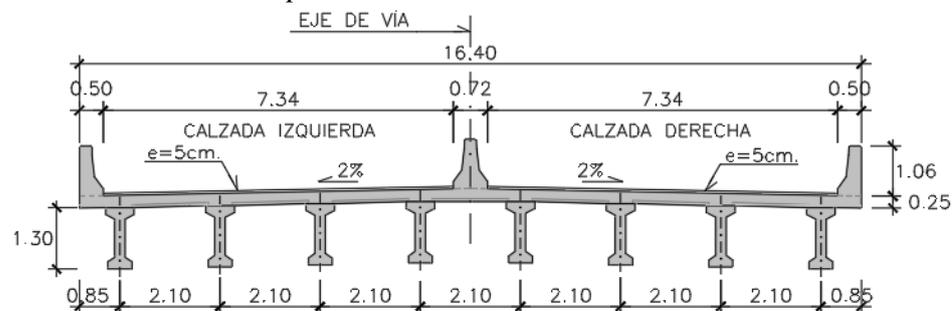
**Figura 51**  
*Elevación de puente recto avenida Sánchez Cerro.*



*Nota:* Tomado de “Mejoramiento de la avenida Sánchez Cerro, tramo avenida Gullman - avenida Chulucanas, Piura-Piura” (2017) de Piura Región.

El puente está conformado en cada vano por 8 vigas doble T prefabricada, con un peralte de 1.30m, a su vez, las vigas tienen un espaciamento de 2.10 m. Igualmente, encima de las vigas se disponen prelosas de 6 cm de espesor para conformar, próximamente, una losa a compresión de 25 cm.

**Figura 52**  
*Sección transversal tipo recto avenida Sánchez Cerro.*

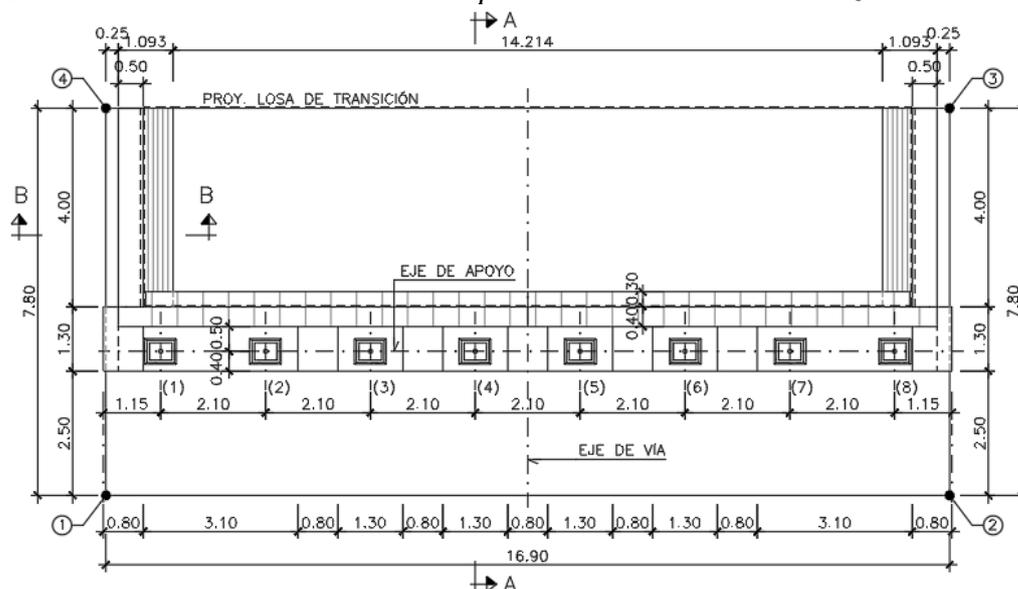


*Nota:* Tomado de “Mejoramiento de la avenida Sánchez Cerro, tramo avenida Gullman - avenida Chulucanas, Piura-Piura” (2017) de Piura Región.

Las cimentaciones del puente en estribos son de tipo superficial con y sin tratamiento en la base, estas tienen como dimensiones de ancho 7.80m y de largo 10.30m.

**Figura 53**

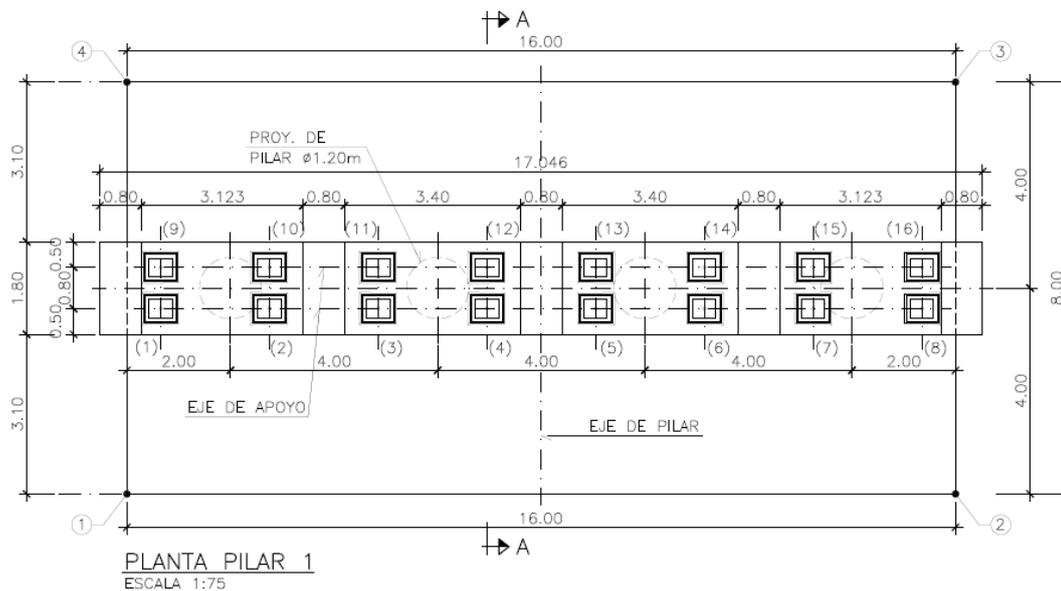
*Planta de cimentación en estribo de puente recto avenida Sánchez Cerro.*



*Nota:* Tomado de “Mejoramiento de la avenida Sánchez Cerro, tramo avenida Gullman - avenida Chulucanas, Piura-Piura” (2017) de Piura Región.

**Figura 54**

*Planta de cimentación de pilares centrales de puente recto avenida Sánchez Cerro*



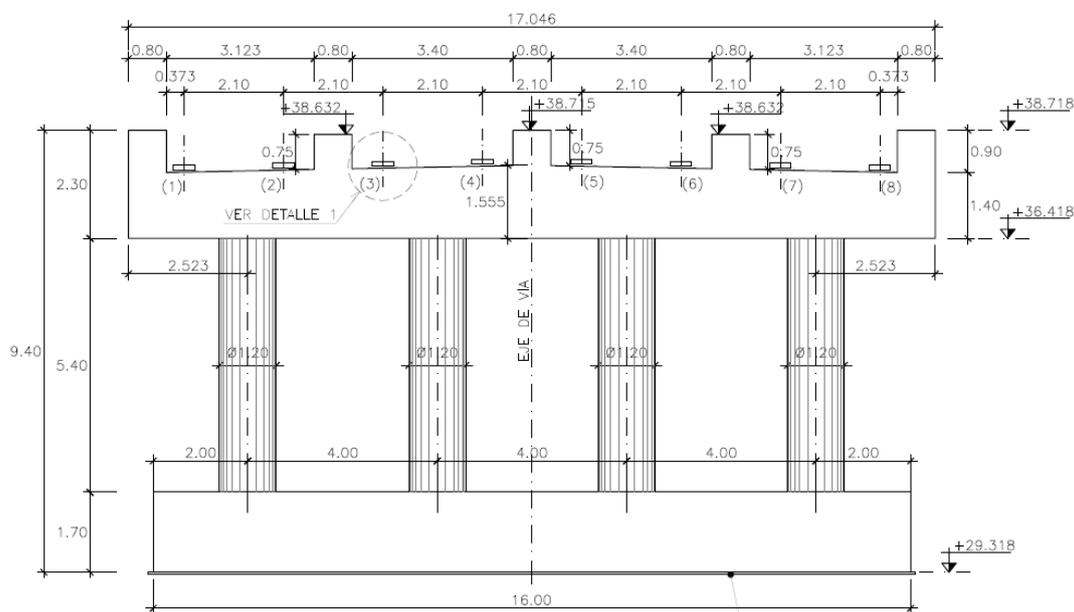
*Nota:* Tomado de “Mejoramiento de la avenida Sánchez Cerro, tramo avenida Gullman - avenida Chulucanas, Piura-Piura” (2017) de Piura Región.

Las dimensiones de las cimentaciones de los pilares son 8m de ancho y 16m de largo de sección constante, con un desplante del terreno aproximado 3.25m. Encima de la cimentación se encuentra los pilares circulares de 5.40m a 5.23m aproximados de altura de una sección circular de 1.20m. El encepado es de sección variable de 1.55 a 1.40m en

altura y un ancho de 1.80m constante con una longitud total de 17.00m aproximadamente, tal como se presenta en la siguiente figura.

**Figura 55**

*Elevación de pilares centrales de puente recto avenida Sánchez Cerro*



*Nota:* Tomado de “Mejoramiento de la avenida Sánchez Cerro, tramo avenida Gullman - avenida Chulucanas, Piura-Piura” (2017) de Piura Región.

#### 4.1.1.3.1 Propiedades de los materiales

De acuerdo a los planos obtenidos del proyecto, se presenta las siguientes propiedades de los materiales:

**Tabla 6**

*Propiedades de los materiales del puente.*

#### Características de los materiales

Resistencia a compresión del concreto en estribos	28 MPa
Resistencia a compresión del concreto en resto	21 MPa
Armadura vigas y pilares (ASTM A706 grado 60)	412 MPa
Armadura resto (ASTM A615 grado 60)	412 MPa

*Nota:* Tabla de propiedades de los materiales del puente de acuerdo al Proyecto “Mejoramiento de la avenida Sánchez Cerro, tramo avenida Gullman - avenida Chulucanas, Piura-Piura” (2017).

#### 4.1.1.4 Sismo

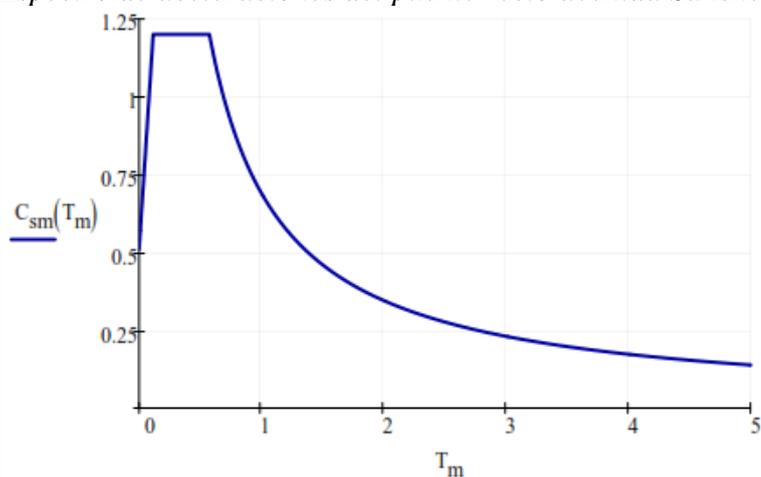
De acuerdo a la ubicación del puente, se consideró los siguientes valores siguiendo los estándares del documento LRFD Seismic Bridge Design (2011):

**Tabla 7***Coefficientes sísmicos para estudio.*

Coefficientes sísmicos	
PGA	0.51
Ss	1.20
S1	0.46
Fpga	1.00
Fa	1.00
Fv	1.50

*Nota:* Valores de coeficientes sísmicos de acuerdo al Proyecto “Mejoramiento de la avenida Sánchez Cerro, tramo avenida Gullman - avenida Chulucanas, Piura-Piura” (2017).

Ahora se procede a graficar el espectro de respuesta sísmico a considerar en el presente estudio con un periodo de retorno de 1000 años.

**Figura 56***Espectro de aceleraciones del puente recto avenida Sánchez Cerro.*

*Nota:* Valores tomados de informe técnico “Mejoramiento de la avenida Sánchez Cerro, tramo avenida Gullman - avenida Chulucanas, Piura-Piura” (2017) de Piura Región.

#### 4.1.1.5 Modelamiento numérico

El modelamiento numérico tanto para puente, suelo y columnas de grava consideró la aplicación del método de elementos finitos para su solución, asumiendo los la información obtenida por planos y la campaña geotécnica realizada para el desarrollo del proyecto.

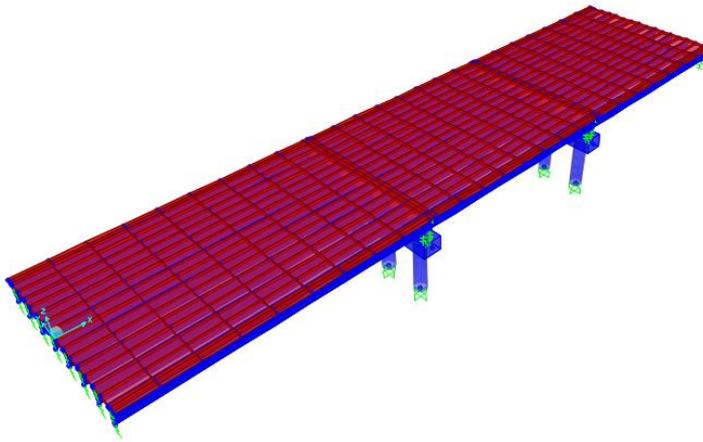
#### 4.1.1.5.1 Modelamiento del puente

##### Modelado del puente con base empotrada

El modelo consta de elementos frames para las columnas y vigas, mientras para el tablero se ha considerado elementos tipo Shell. Adicionalmente, se ha considerado el apoyo de la estructura con el suelo de tipo empotrado.

##### Figura 57

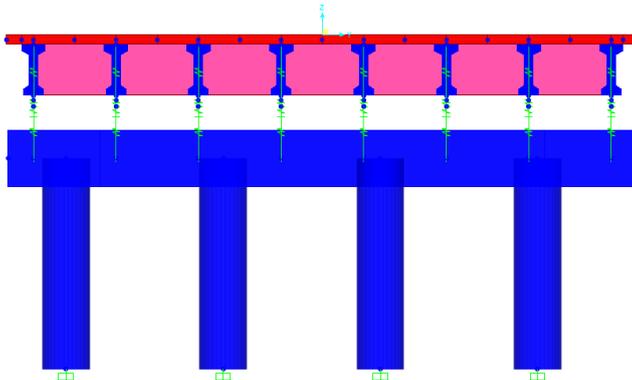
*Modelo matemático extruido con base fija del puente recto avenida Sánchez Cerro.*



*Nota:* Modelo matemático en programa CSI Bridge v22.0.2.

##### Figura 58

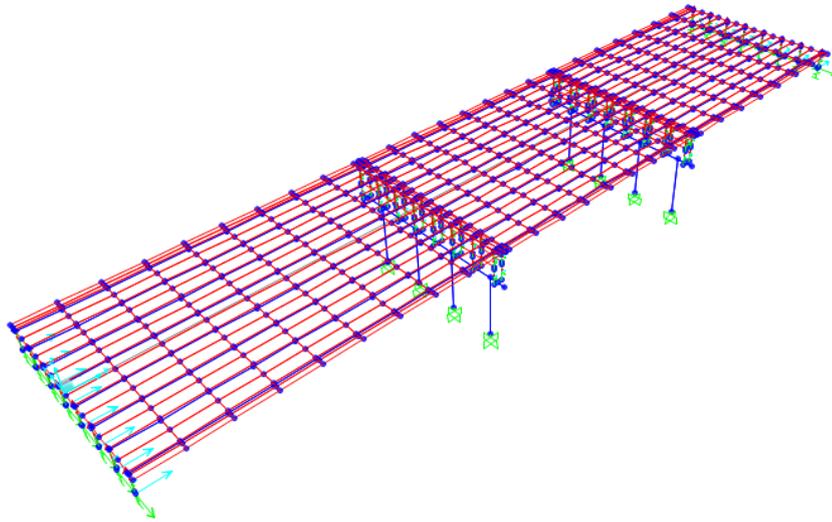
*Vista seccional del modelo matemático del puente recto avenida Sánchez Cerro.*



*Nota:* Modelo matemático en programa CSI Bridge v22.0.2.

**Figura 59**

*Modelo matemático con base empotrada del puente recto avenida Sánchez Cerro.*



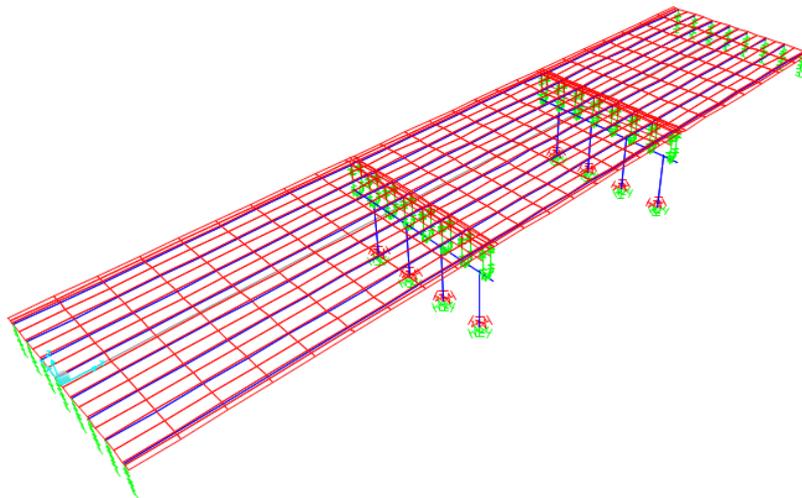
*Nota:* Modelo matemático en programa CSI Bridge v22.0.2.

### **Modelado del puente con base flexible**

Este modelo se aplicará para las condiciones en que el suelo aporta rigidez a la base, es decir, se ha calculado las rigideces del suelo, los elementos modelados tendrán las mismas propiedades indicadas en el modelo con base empotrada, a excepción de la base.

**Figura 60**

*Modelo matemático con base flexible del puente recto avenida Sánchez Cerro.*



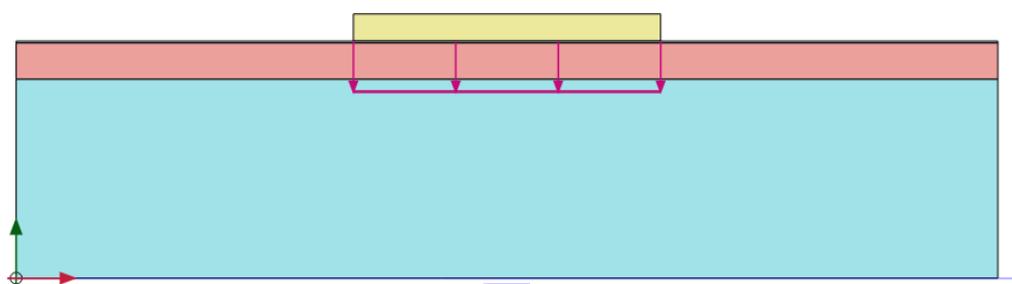
*Nota:* Modelo matemático en programa CSI Bridge v22.0.2.

#### 4.1.1.5.2 *Modelamiento del suelo*

Para el modelamiento del suelo se ha considerado las propiedades iniciales, ver sección 4.1.1.1. No obstante, se ha modelado solo dos estratos porque el bulbo de presiones solo afecta los dos primeros estratos. Asimismo, los estratos (arenas sueltas y arenas medias) se modelaron con base al modelo Mohr-Coulomb. A continuación, se presenta los modelos del suelo realizados en el programa Plaxis v20.

#### **Figura 61**

*Vista seccional del modelo matemático del puente recto avenida Sánchez Cerro.*



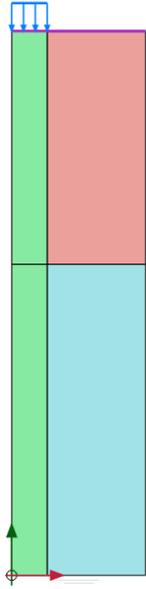
*Nota:* Modelo matemático en programa Plaxis v20.

#### 4.1.1.5.3 *Modelamiento de las columnas de grava*

Para el cálculo del módulo de deformación de las columnas de grava, se consideró el comportamiento elástico lineal de la grava junto con el comportamiento de los demás estratos en función a Mohr-Coulomb. El modelo axisimétrico de las columnas de gravas se calibró en función a la información de campo obtenida, tanto en propiedades como en deformaciones verticales, considerando teorías de elasticidad. Este modelo verifica el comportamiento de la columna de grava que luego será incorporada en los demás modelos 2d en Plaxis v20.

**Figura 62**

*Modelo axisimétrico de una columna de grava.*

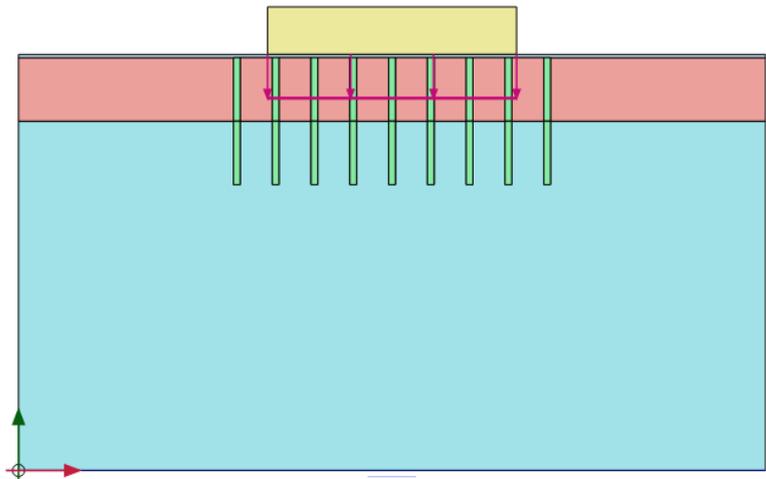


*Nota:* Modelo matemático en programa Plaxis v20.

En las siguientes figuras, se observan los estratos considerando las columnas de grava con espesores equivalentes de acuerdo a su geometría y las cimentaciones en sentido transversal y longitudinal presentadas en el proyecto del Puente de la Avenida Sánchez Cerro.

**Figura 63**

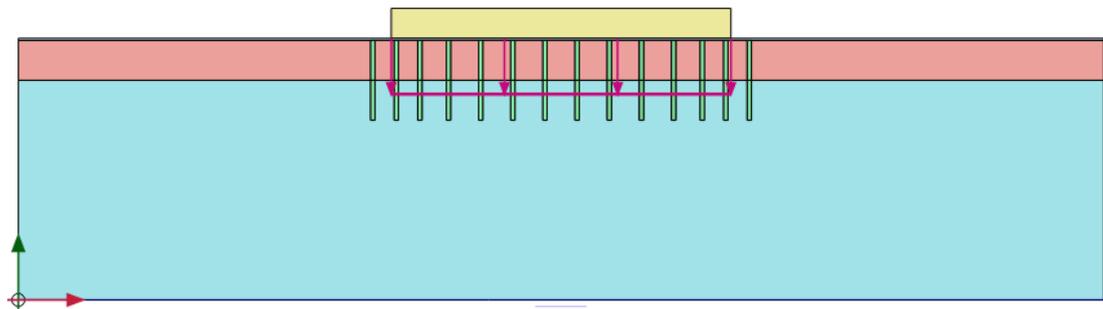
*Vista seccional del modelo matemático representativo en dirección transversal de la cimentación.*



*Nota:* Modelo matemático en programa Plaxis v20.

**Figura 64**

*Vista seccional del modelo matemático representativo en dirección longitudinal de la cimentación.*



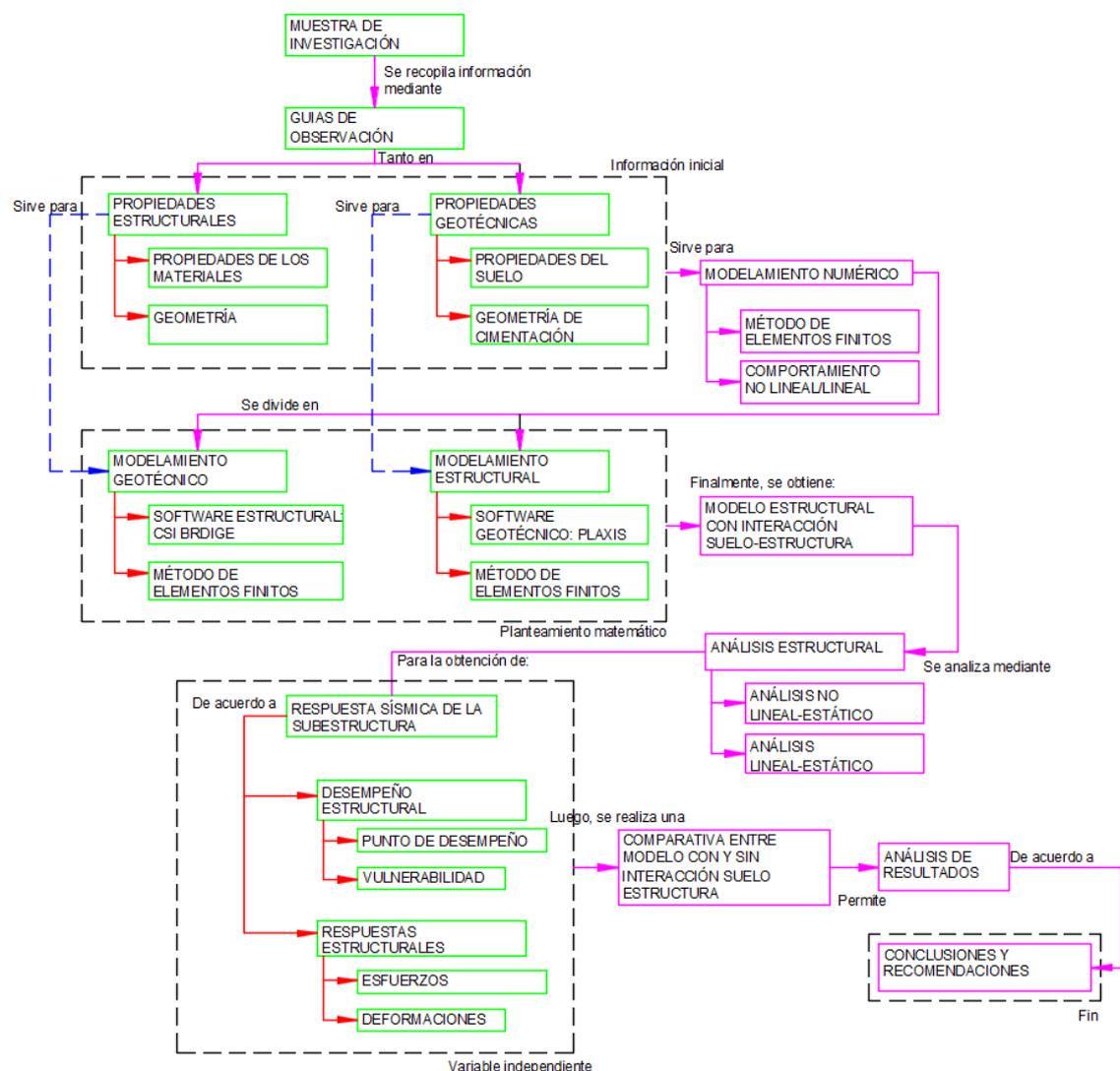
*Nota:* Modelo matemático en programa Plaxis v20.

#### **4.1.2 Metodología del estudio**

El estudio realizado toma en cuenta la información brindada para el proyecto del puente de la avenida Sánchez Cerro (2017). Esta información fue organizada y recopilada mediante guías de observación tanto geotécnicas como estructurales. Luego, se procedió a desarrollar el modelo geotécnico, tanto para suelo flexible como para suelo flexible con columnas de grava, que ayudó al cálculo de las propiedades de las rigideces del suelo.

Siguiendo con lo anterior, se desarrolló los modelos estructurales que consideran el efecto de la interacción suelo-estructura. A través de los modelos desarrollados, se realizó el análisis estructural, mediante análisis lineales y no lineales para la obtención de las respuestas sísmicas del puente que luego será comparado con el modelo sin considerar el efecto de la interacción suelo-estructura, es decir con un apoyo empotrado. Finalmente, se analiza los resultados de acuerdo a las variables de estudio y dimensiones para validar las hipótesis planteadas. Estos pasos de la metodología de estudio, se observan en la siguiente figura:

**Figura 65**  
*Representación del flujo de investigación realizada*



*Nota:* Metodología de la presentación investigación realizada

En la figura anterior, se presenta el flujo de trabajo desarrollado en la investigación que brinda los pasos secuenciales.

#### **4.1.3 Resultados en Interacción suelo estructura**

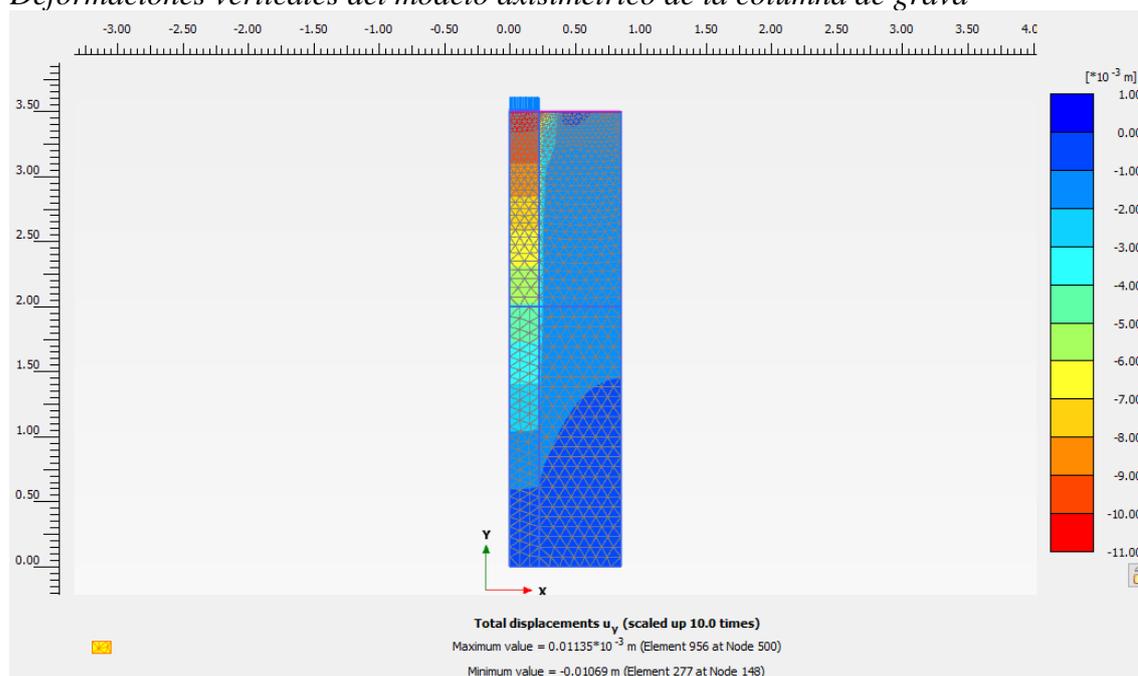
En esta sección, se presentarán los resultados obtenidos mediante la modelación del programa Plaxis v20. A través del modelamiento realizado, se procede a calcular la fuerza aplicada y el desplazamiento correspondiente tanto en la dirección “X” e “Y” que responden tanto transversalmente como longitudinalmente.

#### 4.1.3.1 Calibración de modelo de columnas de grava

El cálculo de las propiedades de las columnas de grava se realizó mediante el modelamiento unitario axisimétrico de una columna de grava con propiedades lineales, considerando las propiedades de los estratos del suelo. A continuación, se presenta el gráfico de las deformaciones obtenidas por la aplicación de una carga vertical unitaria.

**Figura 66**

*Deformaciones verticales del modelo axisimétrico de la columna de grava*

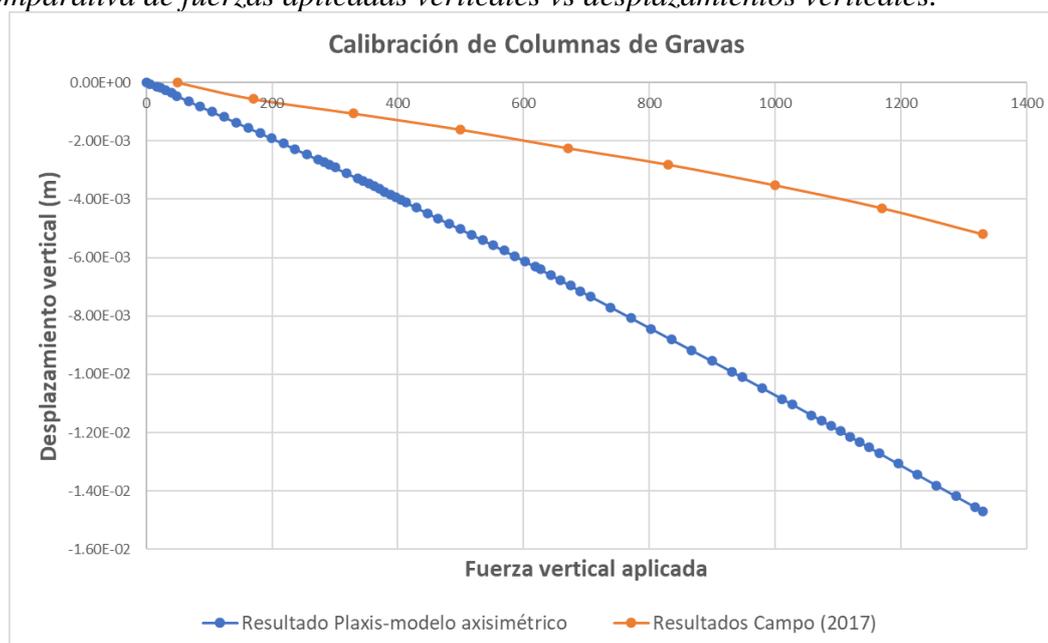


*Nota:* Deformaciones verticales (m) en el programa Plaxis v20.

Este modelamiento consiste en tomar una columna de grava en el eje, considerando las propiedades geométricas de la columna de grava y de los estratos adyacente. Además, se asumió que el comportamiento de las columnas de grava es elástico-lineal, mientras el suelo adyacente tiene comportamiento de Mohr-Coulomb. El valor del módulo de elasticidad de campo de las columnas de grava en campo es 255 MPa, mientras para el suelo adyacente se consideró lo indicado en la sección 4.1.1.1.

**Figura 67**

*Comparativa de fuerzas aplicadas verticales vs desplazamientos verticales.*



*Nota:* Deformaciones verticales (m) vs fuerzas aplicadas (kN) del modelo axisimétrico y resultados de campo

En la figura anterior, se observa la obtención de las deformaciones verticales y las fuerzas aplicadas en campo y numéricamente, obteniéndose una pendiente casi similar a la presentada en campo. Por tanto, al asumir un comportamiento del suelo de tipo Mohr-Coulomb y un comportamiento de las columnas de gravas de tipo lineal-elástico resulta válido en ambos casos.

#### **4.1.3.2 Resultados numéricos del modelamiento geotécnico**

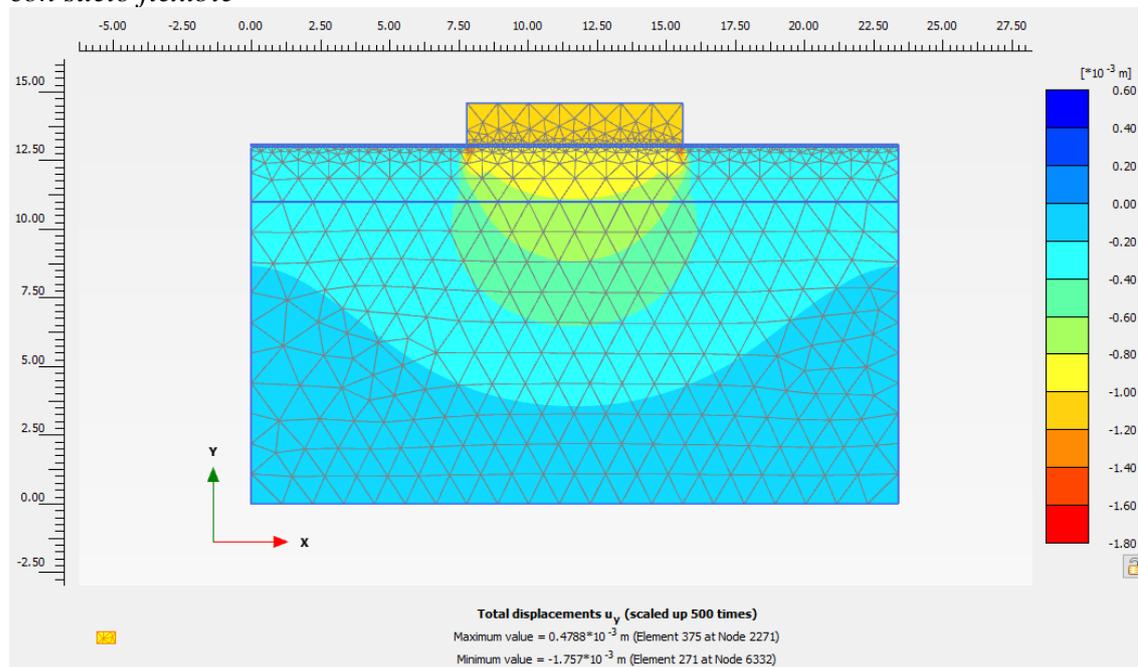
En esta sección se presenta los gráficos de las deformaciones verticales, horizontales y rotacionales, considerando la aplicación de una carga unitaria vertical y horizontal en la dirección transversal y en la dirección longitudinal de la cimentación de los pilares centrales del puente. Similar caso, se consideró una carga triangular que sirvió para el cálculo de las rigideces rotacionales

##### **4.1.3.2.1 Resultados numéricos suelo flexible**

En esta sección se presenta las deformaciones verticales, laterales y rotacionales para un suelo flexible sin columnas de grava, incluyendo su bulbo de presión.

**Figura 68**

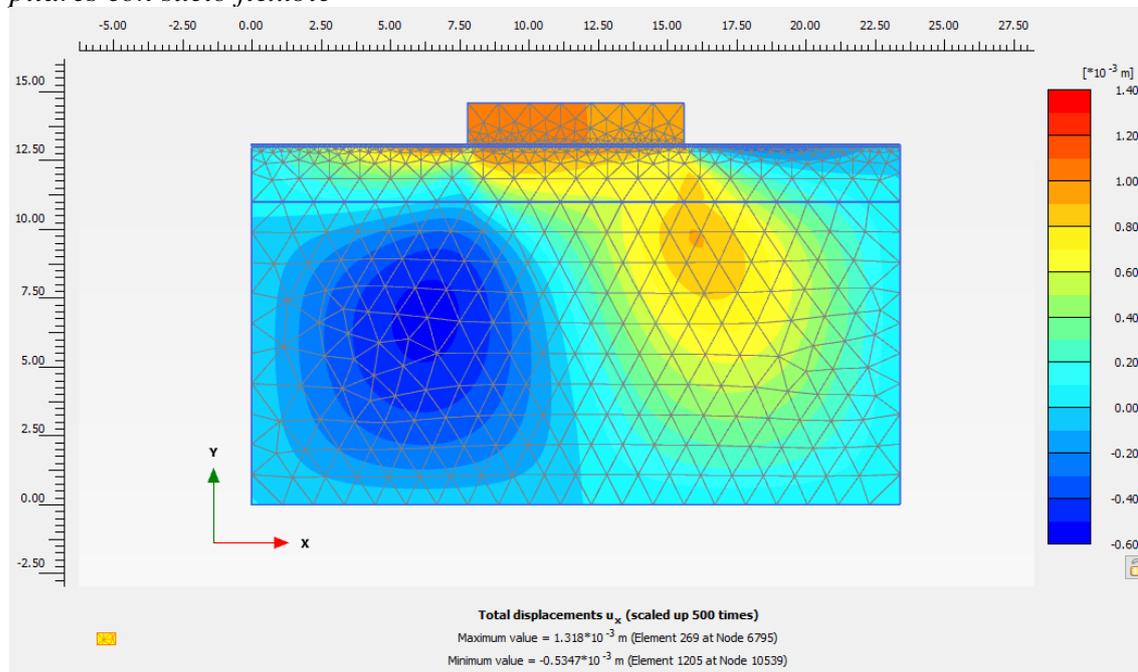
*Deformaciones verticales para la dirección longitudinal de la cimentación de los pilares con suelo flexible*



*Nota:* Deformaciones (m) en el programa Plaxis v20.

**Figura 69**

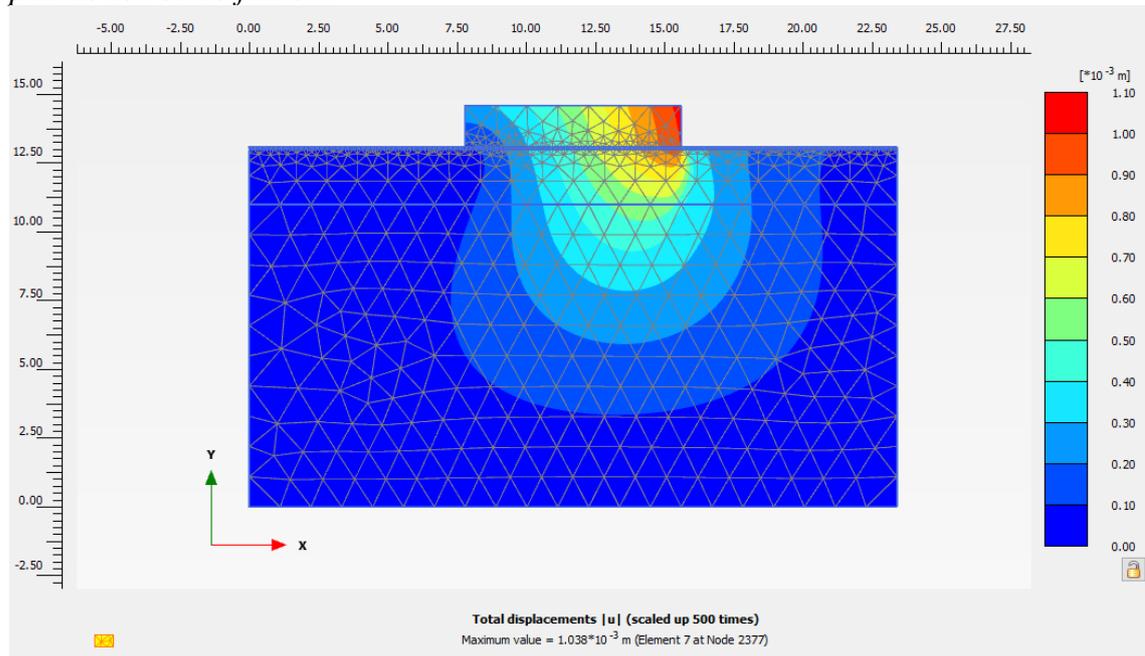
*Deformaciones horizontales para la dirección longitudinal de la cimentación de los pilares con suelo flexible*



*Nota:* Deformaciones (m) en el programa Plaxis v20.

**Figura 70**

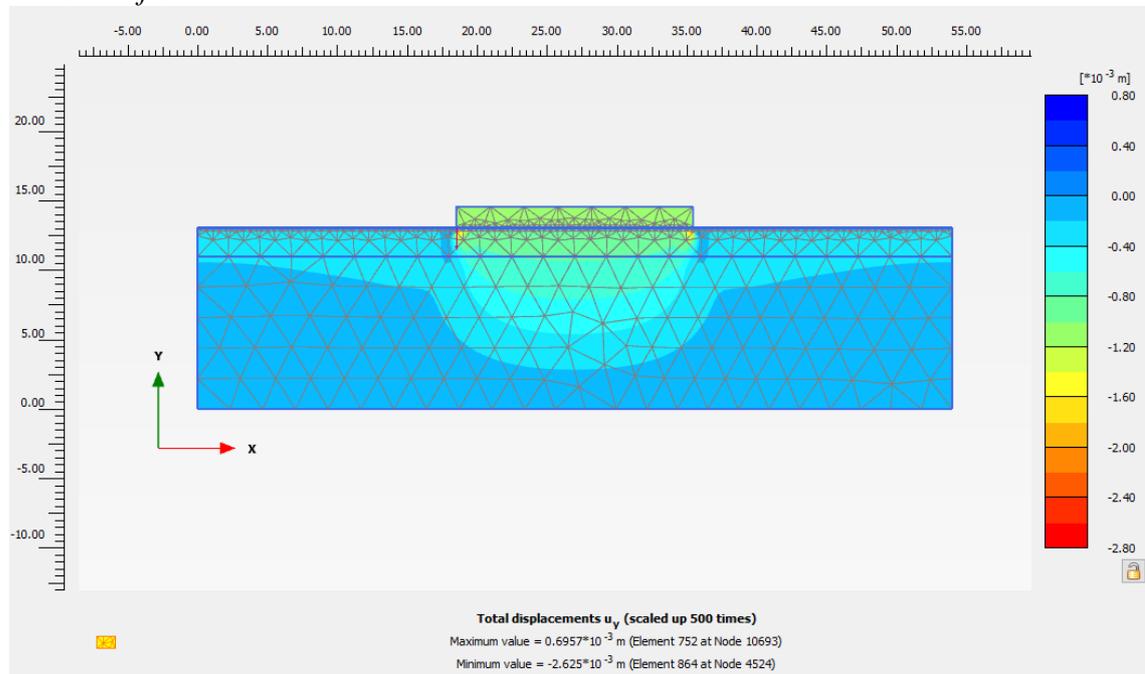
*Deformaciones rotacionales para la dirección longitudinal de la cimentación de los pilares con suelo flexible*



*Nota:* Deformaciones (m) en el programa Plaxis v20.

**Figura 71**

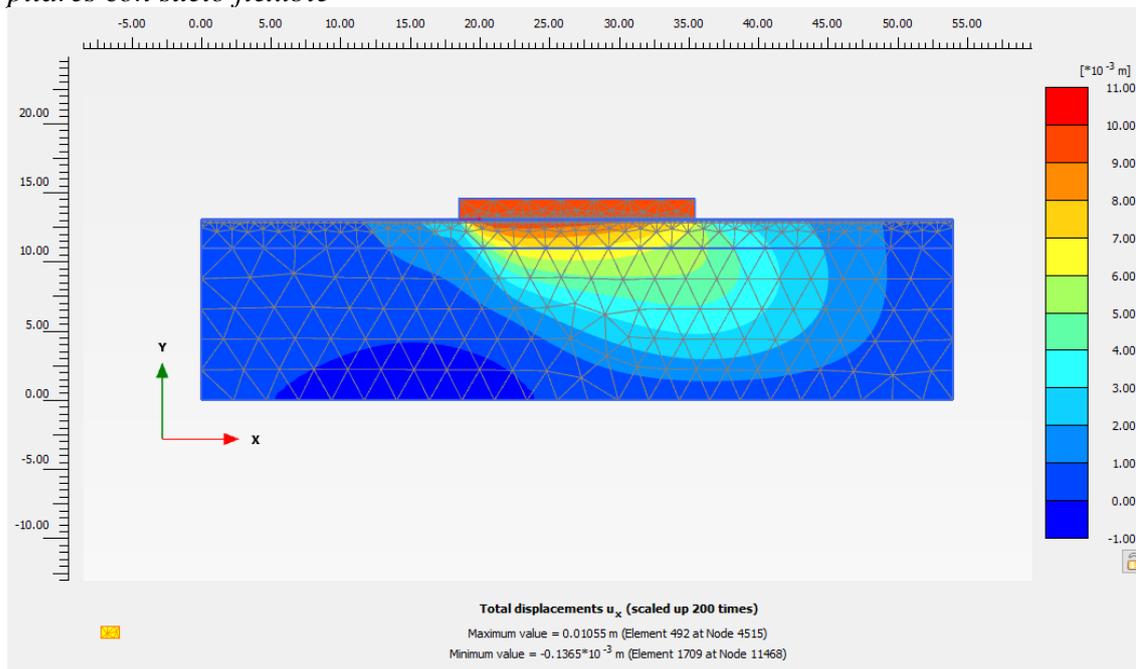
*Deformaciones verticales para la dirección transversal de la cimentación de los pilares con suelo flexible*



*Nota:* Deformaciones (m) en el programa Plaxis v20.

**Figura 72**

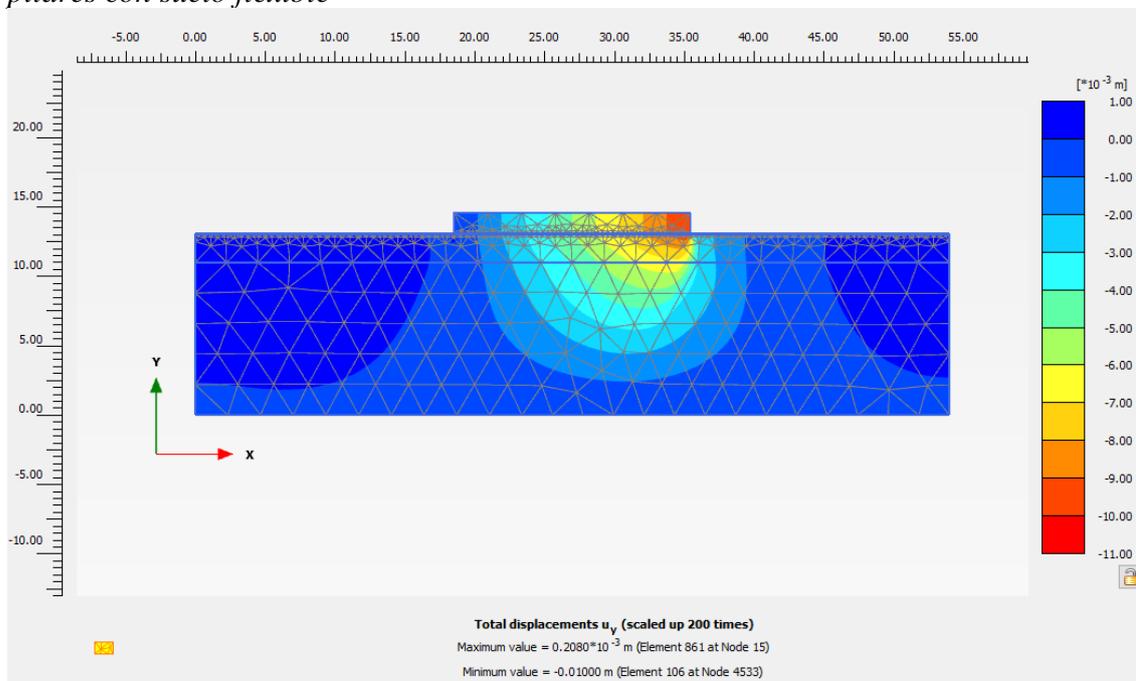
*Deformaciones horizontales para la dirección transversal de la cimentación de los pilares con suelo flexible*



*Nota:* Deformaciones (m) en el programa Plaxis v20.

**Figura 73**

*Deformaciones rotacionales para la dirección transversal de la cimentación de los pilares con suelo flexible*



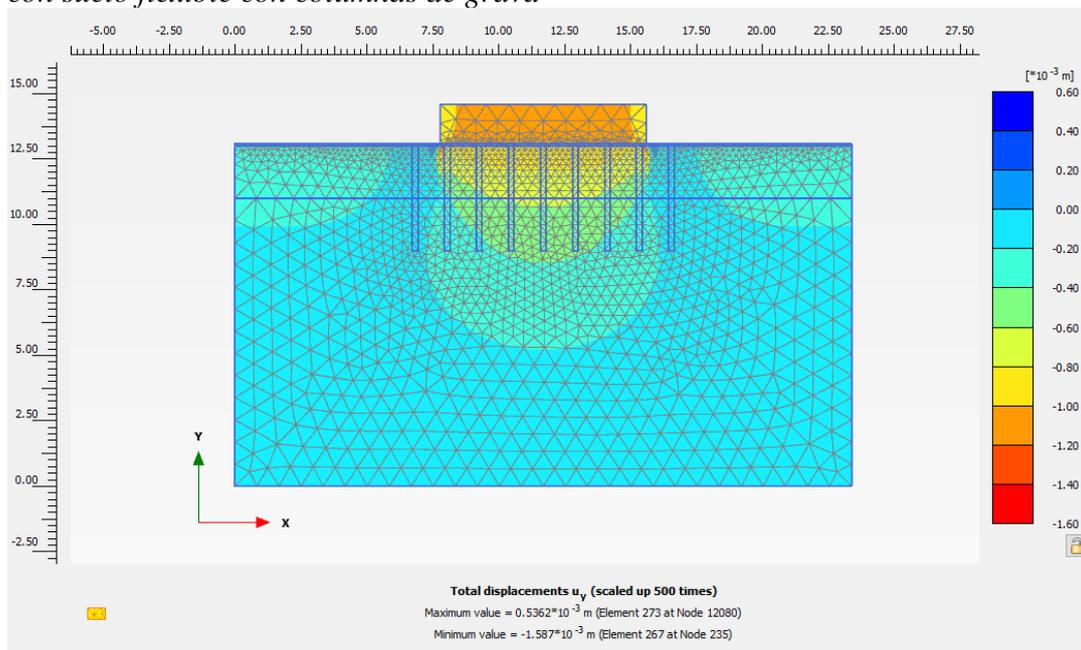
*Nota:* Deformaciones (m) en el programa Plaxis v20.

### 4.1.3.2.1 Resultados numéricos suelo flexible con columnas de grava

En esta sección se presenta las deformaciones para un suelo flexible con columnas de grava.

#### Figura 74

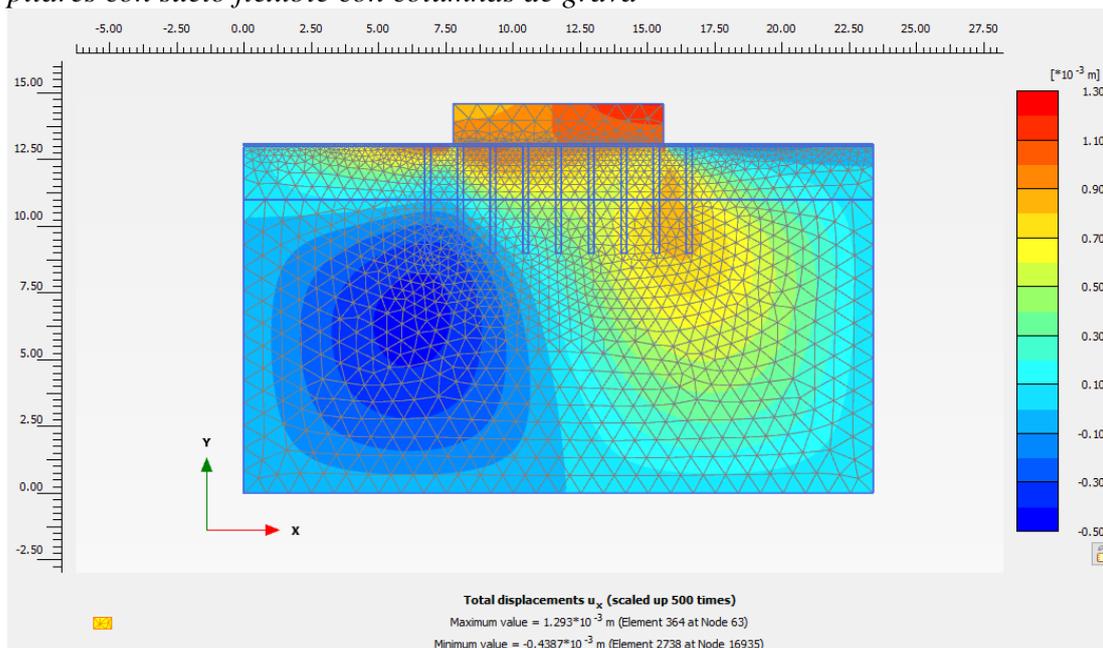
Deformaciones verticales para la dirección longitudinal de la cimentación de los pilares con suelo flexible con columnas de grava



Nota: Deformaciones (m) en el programa Plaxis v20.

#### Figura 75

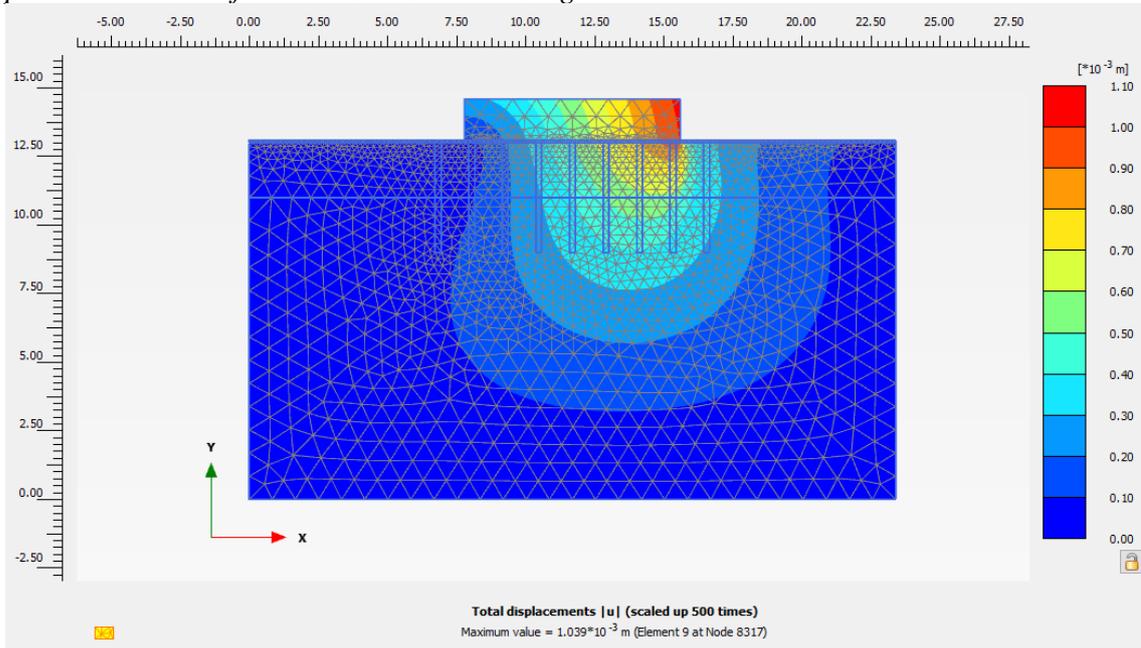
Deformaciones horizontales para la dirección longitudinal de la cimentación de los pilares con suelo flexible con columnas de grava



Nota: Deformaciones (m) en el programa Plaxis v20.

**Figura 76**

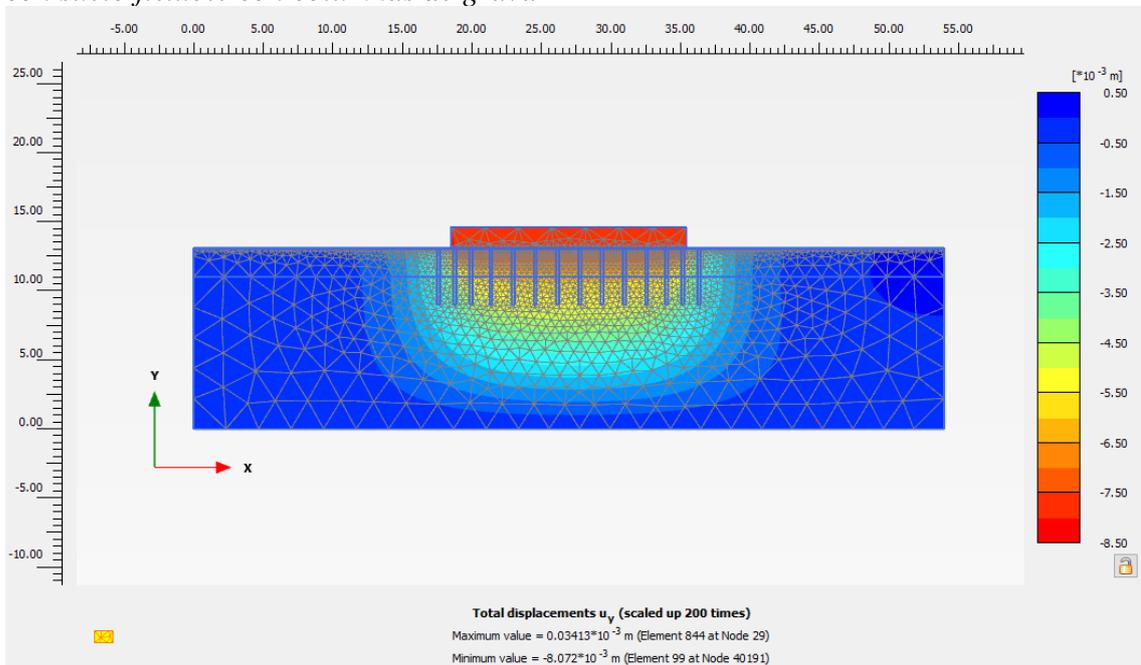
*Deformaciones rotacionales para la dirección longitudinal de la cimentación de los pilares con suelo flexible con columnas de grava*



*Nota:* Deformaciones (m) en el programa Plaxis v20.

**Figura 77**

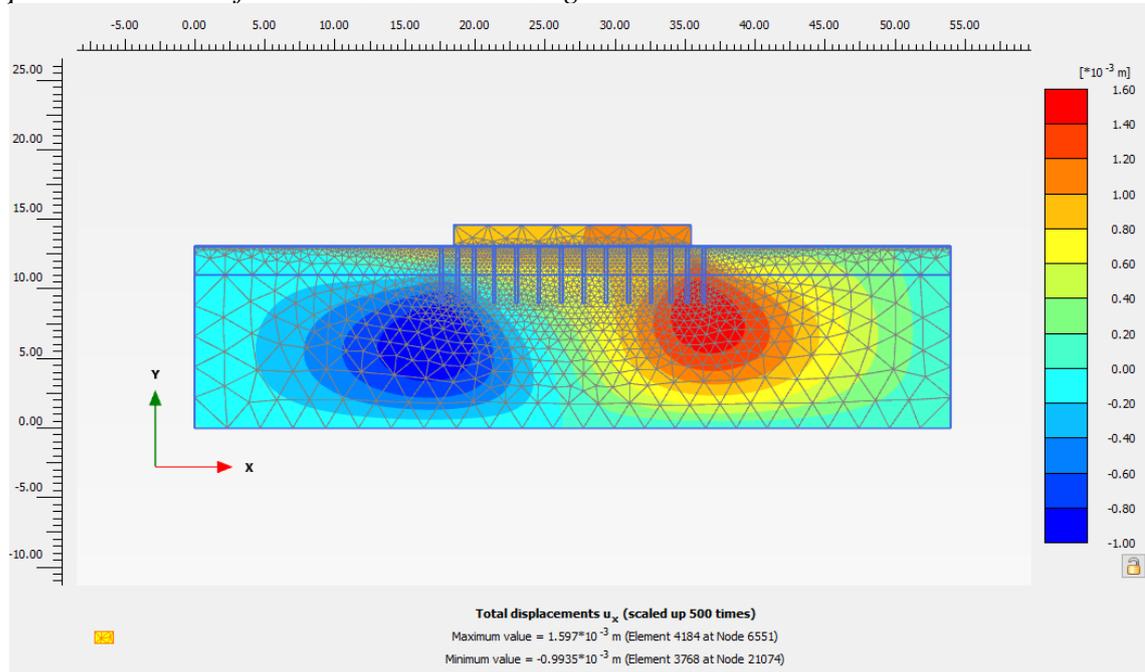
*Deformaciones verticales para la dirección transversal de la cimentación de los pilares con suelo flexible con columnas de grava*



*Nota:* Deformaciones (m) en el programa Plaxis v20.

**Figura 78**

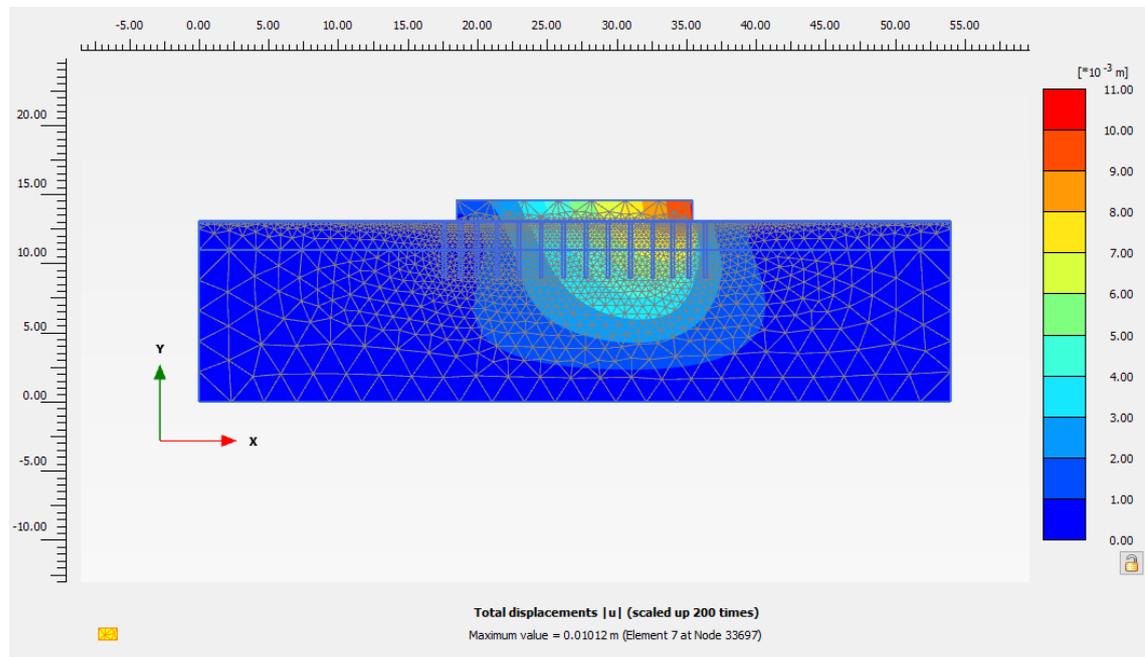
*Deformaciones horizontales para la dirección transversal de la cimentación de los pilares con suelo flexible con columnas de grava*



*Nota:* Deformaciones (m) en el programa Plaxis v20.

**Figura 79**

*Deformaciones rotacionales para la dirección transversal de la cimentación de los pilares con suelo flexible con columnas de grava*



*Nota:* Deformaciones (m) en el programa Plaxis v20.

A fin de continuar el cálculo numérico, los estribos se han considerado como apoyos fijos, debido a la alta rigidez que poseen y el suelo que los contiene.

#### 4.1.3.3 Deformaciones y cargas resultante en el suelo

El cálculo de los resultados del suelo, se consideró las propiedades constitutivas del suelo, presentadas en la sección 4.1.1.1. Mediante el programa Plaxis v20 se calculo las siguientes respuestas de la cimentación.

**Tabla 8**

*Resultados de programa plaxis v20 del suelo.*

	Dirección Longitudinal			Dirección Transversal		
	Nodo	Fuerza (kN/m)	Desplazamiento (m)	Nodo	Fuerza (kN/m)	Desplazamiento (m)
<b>Vertical</b>	6332	255.53	0.0018	4523	563.60	0.0026
<b>Horizontal</b>	2780	27.73	0.0010	10673	273.59	0.0100
<b>Giro</b>	2377	19.47	0.0010	4565	334.68	0.0100

*Nota:* Se presenta el cálculo de la fuerza aplicada y el desplazamiento obtenido en Plaxis v20.

**Tabla 9**

*Resultados de programa plaxis v20 del suelo con columnas de grava.*

	Dirección Longitudinal			Dirección Transversal		
	Nodo	Fuerza (kN/m)	Desplazamiento (m)	Nodo	Fuerza (kN/m)	Desplazamiento (m)
<b>Vertical</b>	11981	174.30	0.0008	39271	512.90	0.0010
<b>Horizontal</b>	12079	28.81	0.0010	40191	36.83	0.0010
<b>Giro</b>	8317	20.29	0.0010	33697	342.53	0.0100

*Nota:* Se presenta el cálculo de la fuerza aplicada y el desplazamiento obtenido en Plaxis v20.

En las tablas 8 y 9, se presentan las deformaciones verticales, horizontales y de giro con las fuerzas aplicadas en cada caso, considerando los estratos del suelo con y sin columnas de grava.

#### 4.1.3.4 Factores de corrección de desplante en cimentación

Se presenta los factores de corrección de acuerdo a la altura desplante de la cimentación según FEMA 356 (1996), estos valores amplifican los valores de rigideces obtenidas.

**Tabla 10**

*Factores de desplante por tipo de rigidez.*

Factores de corrección por desplante	
<b>nz</b>	1.073
<b>ny</b>	1.576

<b>nx</b>	1.519
<b>nyy</b>	1.921
<b>nxx</b>	1.549

*Nota:* Se presenta los factores de corrección de las rigideces principales de la cimentación de acuerdo al FEMA 356 (1996).

#### 4.1.3.5 Rigideces del suelo

La representación matemática de las propiedades del suelo se manifiesta a través de las rigideces del suelo de manera elástica, relacionado directamente entre la fuerza aplicada con la deformación calculada, tal como se presenta a continuación:

**Tabla 11**

*Rigideces del suelo de acuerdo a parámetros geotécnicos.*

Dimensiones	Indicadores	Ítems	
		Suelo flexible sin columnas de grava	Suelo flexible con columnas de grava
<b>Parámetros geotécnicos del suelo</b>	Rigidez traslacional en dirección "z" (kN/m)	2346351.614	4298124.825
	Rigidez traslacional en dirección "x" (kN/m)	758193.66	787695.678
	Rigidez traslacional en dirección "y" (kN/m)	420453.112	464327.424
	Rigidez rotacional en dirección "y" (kN*m/m)	4184341.457	4356569.209
	Rigidez rotacional en dirección "x"(kN*m/m)	9258052.032	9475201.872

*Nota:* Valores de rigideces principales calculados de acuerdo al programa Plaxis v20, considerando un comportamiento lineal del suelo.

#### 4.1.4 Resultados en la respuesta sísmica de la subestructura

La respuesta sísmica de la subestructura fue calculada a partir de un análisis modal espectral y un análisis no lineal estático (Pushover) considerando el espectro de aceleraciones del proyecto.

##### 4.1.4.1 Efectos de interacción Respuestas estructurales

###### 4.1.4.1.1 Desplazamientos

A partir del análisis modal espectral se dio como resultados desplazamientos longitudinales y transversales, tal como se presenta en la tabla 12. Se observan los

desplazamientos considerando apoyos en la cimentación de tipo empotrado, un suelo flexible y un suelo flexible con columnas de grava.

**Tabla 12**

*Desplazamientos obtenidos del análisis modal espectral.*

	Base empotrada		Suelo flexible		Suelo flexible con columnas de grava	
	Pilar 1:	Pilar 2:	Pilar 1:	Pilar 2:	Pilar 1:	Pilar 2:
Desplazamiento transversal (Dir Y)	16.44	13.56	22.28	18.45	21.30	17.30
Desplazamiento longitudinal (Dir X)	55.07	51.94	61.64	58.50	61.70	58.60
Desplazamiento vertical			1.08	2.83	1.27	1.30

*Nota:* Valores obtenidos de acuerdo a los diferentes modelos de cálculo en milímetros.

En la tabla 12, se observa el incremento de desplazamiento tanto longitudinalmente como transversalmente comparado con el modelo de base empotrada. Este incremento es aproximadamente 35% en forma transversal, 6% longitudinalmente, observándose la variación de las deformaciones. Similar caso, aparece deformaciones verticales debido a la consideración de resortes verticales en el suelo con desplazamientos de 1.08 a 2.83 mm, calculados de acuerdo al modelamiento de Plaxis v20.

#### 4.1.4.1.2 Giros

**Tabla 13**

*Giros obtenidos del análisis modal espectral.*

	Base empotrada		Suelo flexible		Suelo flexible con columnas de grava	
	Pilar 1:	Pilar 2:	Pilar 1:	Pilar 2:	Pilar 1:	Pilar 2:
Giros transversales (Dir Y)			3.64	5.52	3.35	4.97
Giros longitudinales (Dir X)			2.38	2.37	2.31	2.29

*Nota:* Valores obtenidos de acuerdo a los diferentes modelos de cálculo en milímetros.

La tabla 13 muestra la aparición de giros en la base de la cimentación por la consideración de rigideces rotacionales de la cimentación tanto en el suelo flexible como

en el suelo flexible con columnas de grava. No obstante, en el modelo de base empotrada no se presentan por la consideración de una rigidez rotacional infinitamente rígida.

#### 4.1.4.1.3 *Fuerzas cortantes*

A continuación, se presenta las fuerzas cortantes en los tres modelos desarrollados (con base empotrada, con suelo flexible y con suelo flexible con columnas de grava) de acuerdo a un análisis sísmico modal-espectral.

**Tabla 14**

*Fuerzas cortantes obtenidos del análisis modal espectral*

	Base empotrada		Suelo flexible		Suelo flexible con columnas de grava	
Fuerzas cortantes en la base transv. (Dir Y)	Pilar 1: 1343.89	Pilar 2: 1216.15	Pilar 1: 1329.02	Pilar 2: 1184.73	Pilar 1: 1357.97	Pilar 2: 1189.10
Fuerzas cortantes en la base long. (Dir X)	Pilar 1: 1035.82	Pilar 2: 1063.73	Pilar 1: 1001.10	Pilar 2: 1029.08	Pilar 1: 1002.42	Pilar 2: 1030.41

*Nota:* Valores obtenidos de acuerdo a los diferentes modelos de cálculo en kN.

De acuerdo a lo presentado en la tabla 14, se observa el cálculo de las fuerzas cortantes tanto en dirección X e Y, en columnas representativos de los pilares 1 y 2. Se observa el aumento de la cortante en la dirección X en los casos de suelos flexibles desde un valor de 1035.82 kN hasta un valor de 1001.10 kN, representado una disminución de 5%. Caso contrario en dirección Y en el pilar 1, presentado en una disminución de 2% de cortante; además, en el pilar 2 hay una disminución de 3%.

#### 4.1.4.1.4 *Momentos flectores*

A continuación, se presenta los momentos flectores tomados en la base de la cimentación en los tres modelos desarrollados (con base empotrada, con suelo flexible y con suelo flexible con columnas de grava) de acuerdo a un análisis sísmico modal-espectral.

**Tabla 15***Momentos flectores obtenidos del análisis modal espectral*

	<b>Base empotrada</b>		<b>Suelo flexible</b>		<b>Suelo flexible con columnas de grava</b>	
Momentos flectores en la base (Dir Y)	Pilar 1: 3660.68	Pilar 2: 3209.18	Pilar 1: 3676.1	Pilar 2: 3176.95	Pilar 1: 3671.21	Pilar 2: 3113.63
Momentos flectores en la base (Dir X)	Pilar 1: 6159.76	Pilar 2: 6171.12	Pilar 1: 5911.92	Pilar 2: 5928.09	Pilar 1: 5921.31	Pilar 2: 5937.32

*Nota:* Valores obtenidos de acuerdo a los diferentes modelos de cálculo en kN\*m.

De acuerdo a la tabla 15, se observa que los momentos flectores en el caso del modelo con base empotrado resultan en 6159.76 kN\*m en la dirección “X”, mientras en la dirección “Y”, resulta en 3660.68 kN\*m. En cambio, en un suelo flexible, se observa que los momentos disminuyen con valores de 5911.92 kN\*m en dirección “X”, y en el caso de la dirección “Y”, 3676.1 kN\*m. Si se compara con el modelo de base empotrado con el suelo flexible, en dirección “X”, es aproximadamente, 1% como aumento; en cambio, para la dirección “Y” es aproximadamente, 1%. Es decir, se observa una reducción de momentos flectores en ambos casos. De igual manera, en el caso de suelo flexible con columnas de grava, la reducción de valores está presente, con valores similares a un modelo de suelo flexible condicionado a una menor rigidez en todas las direcciones.

#### 4.1.4.1.5 *Periodo fundamental*

**Tabla 16***Periodos fundamentales en dirección longitudinal (modo 1)*

	<b>Base empotrada</b>	<b>Suelo flexible</b>	<b>Suelo flexible con columnas de grava</b>
Periodo fundamental (s)	0.94	0.95	0.95
% Participación	94.51	92.40	92.40

*Nota:* Periodos fundamentales de acuerdo a los diferentes modelos de cálculo.

**Tabla 17***Periodos fundamentales en dirección transversal (modo 2)*

	<b>Base empotrada</b>	<b>Suelo flexible</b>	<b>Suelo flexible con columnas de grava</b>
Periodo fundamental (s)	0.85	0.86	0.86
% Participación	67.57	88.89	75.07

*Nota:* Periodos fundamentales de acuerdo a los diferentes modelos de cálculo.

En la tabla 16, el periodo en dirección longitudinal en el modo 1 de la estructura en el modelo con base empotrada es 0.94 s llegando hasta un 94.51% de masa total, mientras en el caso de suelo flexible (ambos casos) el periodo es 0.95s con un porcentaje de masas de 92%, representando un aumento de 1% con respecto al modelo con base empotrada. En la tabla 17, se observa el periodo en dirección transversal en el modo 2, el modelo de base empotrada, se presenta un periodo de 0.85s aumentando a 0.86s en el caso de los modelos de suelo flexible, es decir, aumento de 1%. La estructura se vuelve un poco más flexible por el aumento del periodo.

#### 4.1.4.2 Efectos en el desempeño estructural

##### 4.1.4.2.1 Sección pilar

Se presenta la sección de pilar utilizada para determinar las propiedades no lineales, la cual se utilizó para los modelos presentados anteriormente.

**Figura 80**

##### Sección de pilar

Caltrans Section Properties - Round

Region	Ring	No. of Bundles	Bundle Type	Bundle Bar No.	Bundle Area	Bundle Material	Conf. Type	Conf. Spacing	Conf. Bar No.	Conf. Area	Conf. Material
Core1	Ring1	23	Single	#11	0.001	A706Gr60...	Hoop	0.15	#5	0.0002	A706Gr60...
Prestress		0	Tendon	N/A	0.	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Casing		N/A	Casing	N/A	0.	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

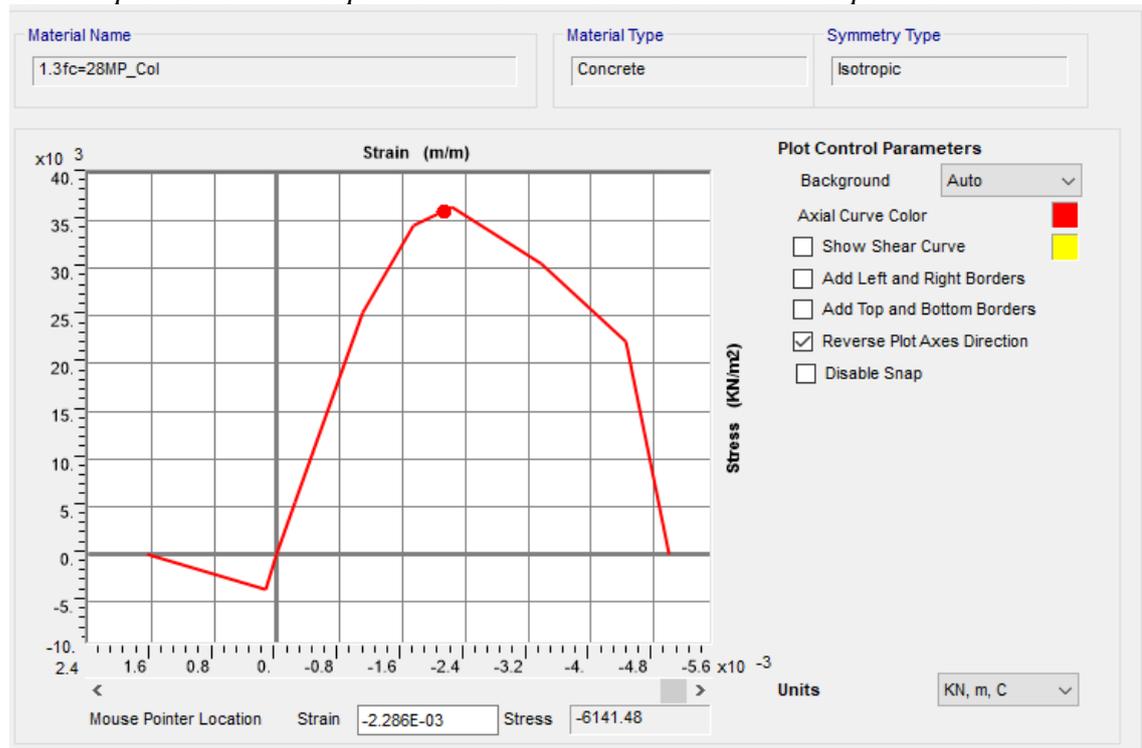
*Nota:* Sección de columna de pilar en CSI Bridge v22.0.2.

##### 4.1.4.2.2 Resistencia a la compresión del concreto

La resistencia a la compresión sin confinar del concreto se ha considerado el modelo de Mander et. al. (1984), donde se observa las deformaciones unitarias vs los esfuerzos a compresión del concreto, ver figura 81.

**Figura 81**

*Modelo paramétrico de representación de la resistencia a la compresión del concreto*



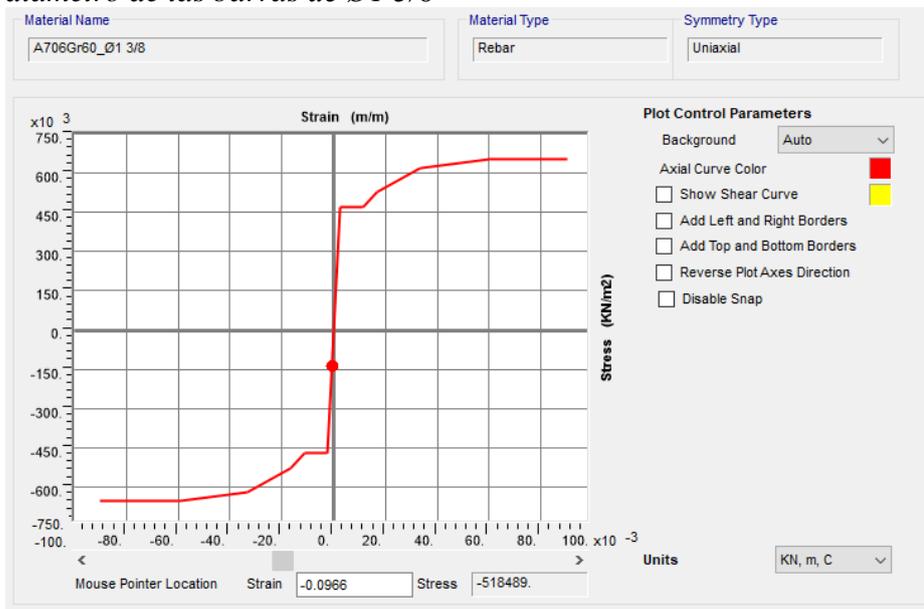
*Nota:* Representación paramétrica de la resistencia a la compresión en Csi Bridge v22.0.2.

#### 4.1.4.2.3 Acero de refuerzo

El comportamiento del acero de refuerzo se ha considerado de acuerdo a lo indicado en la sección 2.3.4.1.3; por tanto, se presenta la parametrización de las propiedades del acero de refuerzo a las barras de refuerzos presentes en los pilares.

**Figura 82**

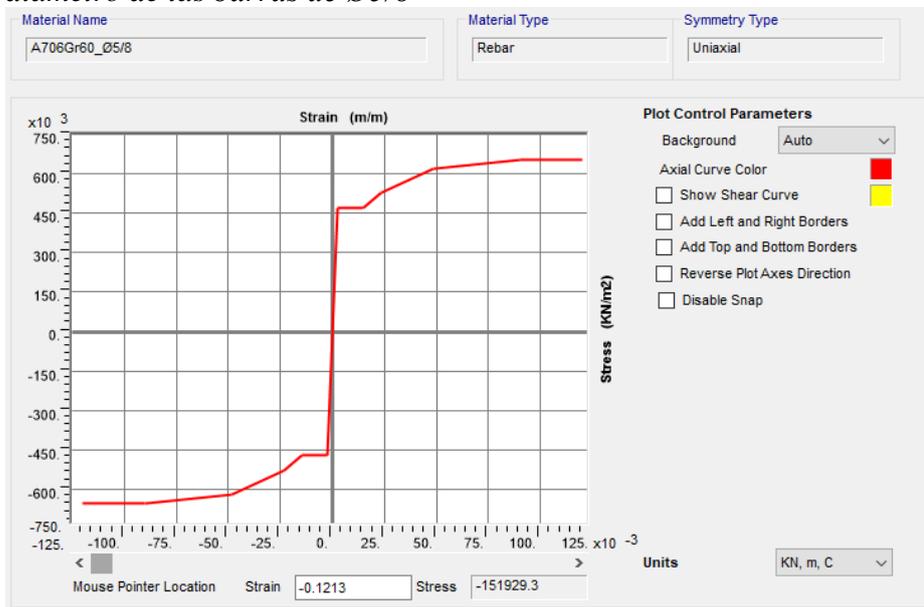
*Modelo paramétrico de representación del acero de refuerzo Caltrans de acuerdo al diámetro de las barras de Ø1 3/8”*



*Nota: Representación paramétrica del comportamiento del acero de refuerzo para varillas Ø1 3/8” en CSI Bridge v22.0.2.*

**Figura 83**

*Modelo paramétrico de representación del acero de refuerzo Caltrans de acuerdo al diámetro de las barras de Ø5/8”*



*Nota: Representación paramétrica del comportamiento del acero de refuerzo para varillas Ø5/8” en CSI Bridge v22.0.2.*

#### 4.1.4.2.4 Momento curvatura

La carga axial para el cálculo del momento curvatura de la sección planteada se ha considerada igual en los tres modelos, por tanto, solo se utilizará el modelo de base empotrada por ser más conservador. Asimismo, se ha considerado el peso de las acciones permanentes en el puente tales como peso propio, carpeta asfáltica y barandas.

**Tabla 17**

*Carga axial para acciones permanentes.*

Base empotrada	
Carga Axial(kN)	1569

*Nota:* Valor obtenido de acuerdo modelo de cálculo empotrado.

En el siguiente gráfico, se procede a determinar el diagrama de momento curvatura de la sección, considerando la carga axial planteada, las propiedades de los materiales y la geometría de la sección. Donde se calcula las curvaturas de fluencia y última junto con sus respectivos momentos flectores.

**Figura 84**

*Diagrama de momento curvatura de sección utilizada*



*Nota:* Diagrama de momento curvatura calculado en Csi Bridge v22.0.2.

A partir del diagrama presentado, se calcula la ductilidad de la sección ( $\mu$ ) donde el valor de la curvatura fluencia es  $\varepsilon_y = 4.7 * 10^{-3}$ , mientras el valor de la curvatura última es  $\varepsilon_u = 49.6 * 10^{-3}$ , resultando  $\mu = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_u} = 10.5$ .

#### 4.1.4.2.5 Rótulas plásticas

Se procede a definir las rótulas plásticas de acuerdo al momento curvatura dada, donde se define la rotación y los momentos de curvatura.

### Figura 85

*Propiedades de las rótulas plástica transversalmente y longitudinalmente.*

Displacement Control Parameters

Point	Moment/SF	Rotation/SF
E-	-1.	-0.0432
D-	-1.	-0.0432
C-	-1.	-0.0432
B-	-1.	0.
A	0.	0.
B	1.	0.
C	1.	0.0438
D	1.	0.0438
E	1.	0.0438

Symmetric

Load Carrying Capacity Beyond Point E

Drops To Zero

Is Extrapolated

Scaling for Moment and Rotation

Use Yield Moment      Moment SF      Positive: 5827.6611      Negative: 5810.7178

Use Yield Rotation      Rotation SF      Positive: 1.      Negative: 1.

(Steel Objects Only)

Acceptance Criteria (Plastic Rotation/SF)

Immediate Occupancy      Positive: 0.0109      Negative: -0.0108

Life Safety      Positive: 0.0219      Negative: -0.0216

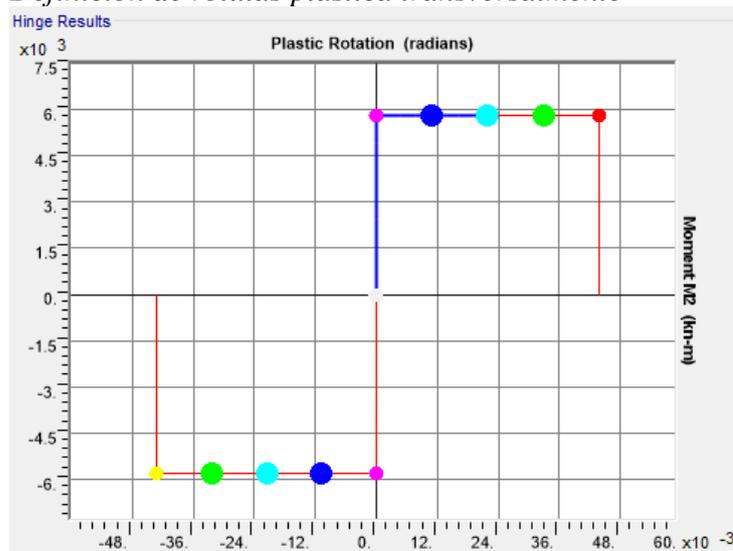
Collapse Prevention      Positive: 0.0328      Negative: -0.0324

Show Acceptance Criteria on Plot

*Nota:* Propiedades de las rótulas definidas tanto transversalmente como longitudinalmente en Csi Bridge v22.0.2.

En los modelos estructurales de los puentes (con base empotrada, suelo flexible y suelo flexible con columnas de grava) se ha definido las rótulas plásticas. Donde A hacia B representa la zona elástica, B hacia C es la zona plástica, mientras de C a E es la zona de sobre resistencia tanto en transversal como longitudinal, esto valores se denominan límites de estados. Adicionalmente, se ha definido los límites de desempeño IO (Ocupación inmediata), LS (Seguridad de vida) y CP (Prevención de colapso); de estos valores se cuantificará el máximo valor desarrollado por la estructura en el análisis Pushover.

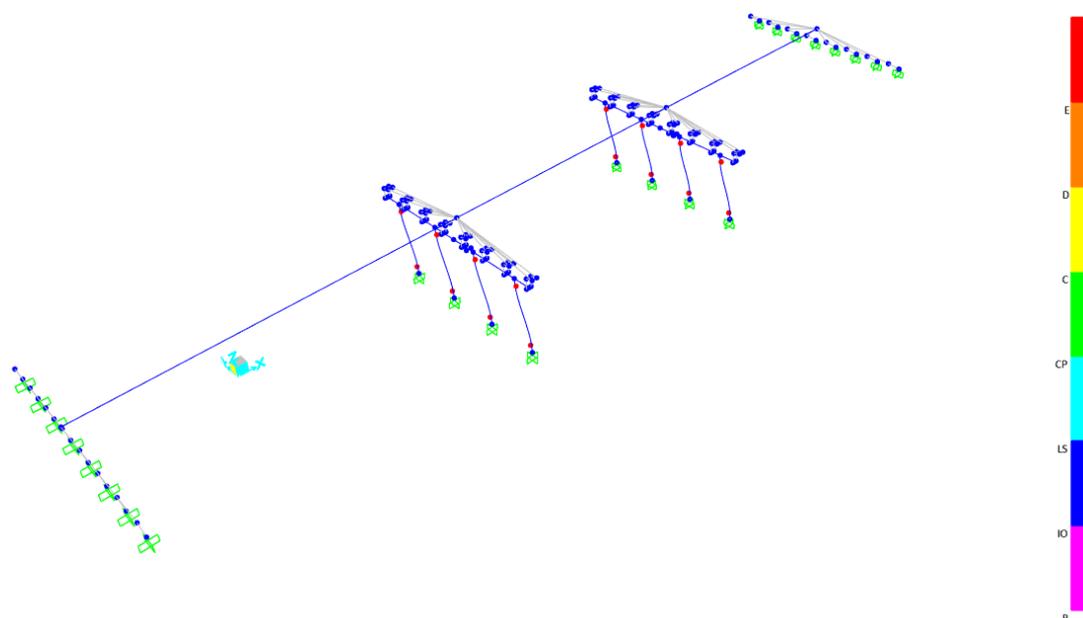
**Figura 86**  
Definición de rótulas plástica transversalmente



Nota: Valores utilizados en el programa CSI Bridge v22.0.2

La definición de la rótula plástica dependerá de los valores colocados en la definición de las rótulas, donde si llega al estado E (color rojo), se produce el desplazamiento último de la pila del puente. A continuación, se presenta resultados de las rótulas plástica para la dirección transversal y longitudinal, presenciando la formación de rótulas:

**Figura 87**  
Formación de rótulas plásticas transversales en pilares en el modelo con base empotrada

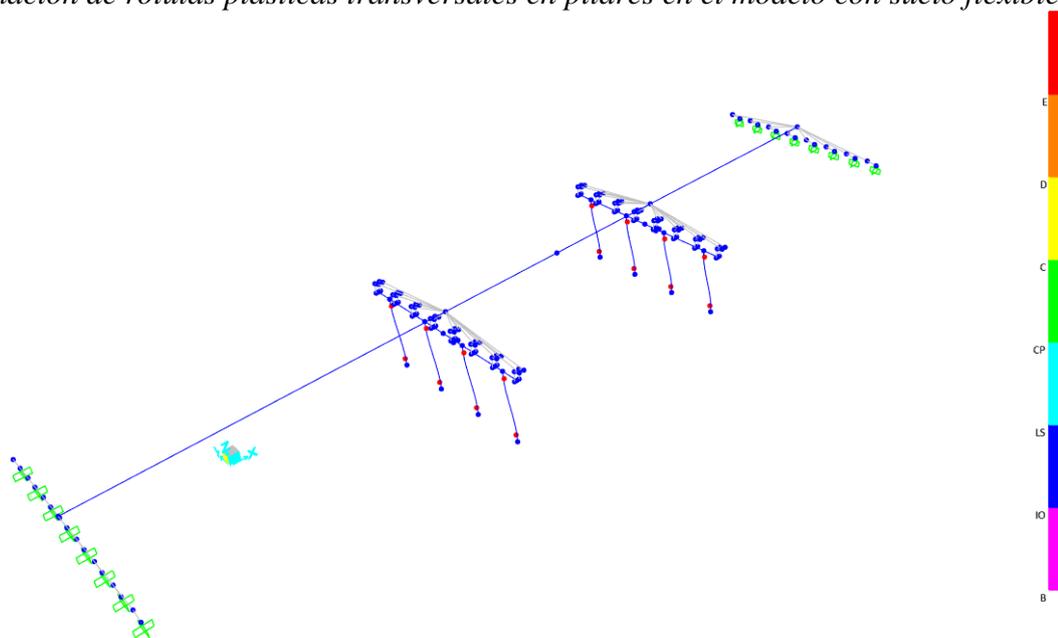


Nota: Formación de rótulas plásticas en el paso 18 para el modelo con base empotrada en el programa CSI Bridge v22.0.2

**Tabla 18***Rótula plástica transversalmente, análisis no lineal, puente con base empotrada*

Rótula	Paso	M2 (kN*m)	R2PI (rad)	Estado R2	Estatus R2
29H1	0	0	0	A to <=B	A to <=IO
29H1	1	5593.7949	0	A to <=B	A to <=IO
29H1	2	5719.6368	0	A to <=B	A to <=IO
29H1	3	5895.3004	0	B to <=C	A to <=IO
29H1	7	5895.3045	0.0192	B to <=C	IO to <=LS
29H1	8	5895.3064	0.028016	B to <=C	LS to <=CP
29H1	9	5895.3082	0.036833	B to <=C	>CP
29H1	10	5895.3095	0.042671	C to <=D	>CP
29H1	11	5895.4223	0.042672	D to <=E	>CP
29H1	12	5895.4266	0.04314	>E	>CP

Nota: Rótulas plásticas para el modelo con base empotrada en el programa CSI Bridge v22.0.2

**Figura 88***Formación de rótulas plásticas transversales en pilares en el modelo con suelo flexible*

Nota: Formación de rótulas plásticas en el paso 20 para el modelo con suelo flexible en el programa CSI Bridge v22.0.2

**Tabla 19***Rótula plástica transversalmente, análisis no lineal, puente con suelo flexible*

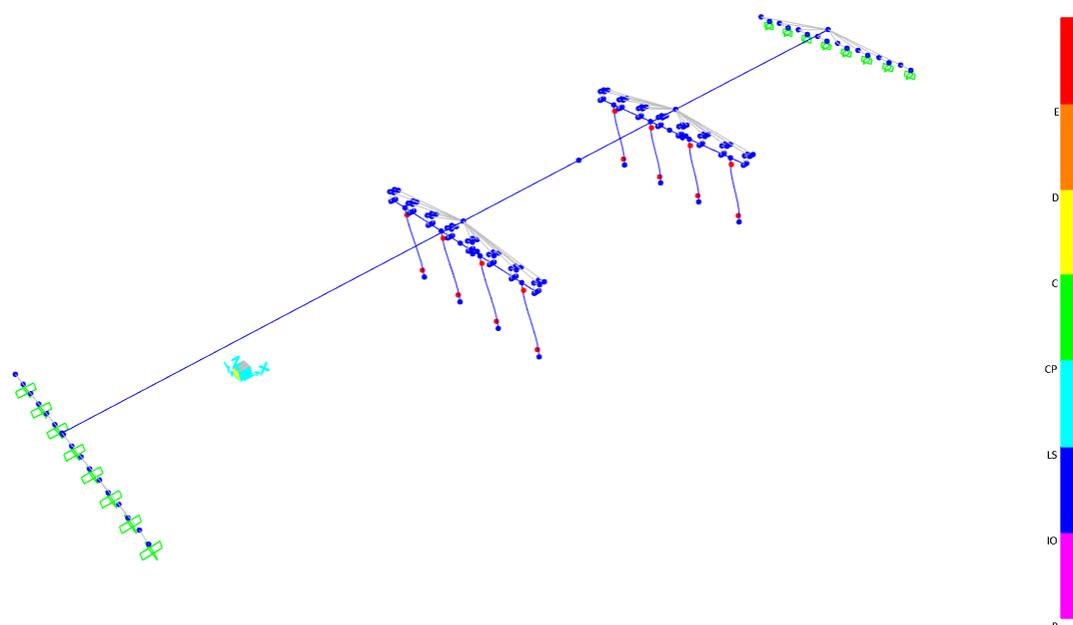
Rótula	Paso	M2 (kN*m)	R2PI (rad)	Estado R2	Estatus R2
26H1	0	0	0	A to <=B	A to <=IO
26H1	1	3654.4898	0	A to <=B	A to <=IO
26H1	2	5659.2786	0	A to <=B	A to <=IO
26H1	3	5732.5447	0	A to <=B	A to <=IO
26H1	4	5815.0795	0	B to <=C	A to <=IO
26H1	8	5815.0824	0.013411	B to <=C	IO to <=LS

26H1	9	5815.0836	0.019326	B to <=C	IO to <=LS
26H1	10	5815.0849	0.02524	B to <=C	LS to <=CP
26H1	11	5815.0861	0.031155	B to <=C	LS to <=CP
26H1	12	5815.0874	0.03707	B to <=C	>CP
26H1	17	5815.0886	0.043006	C to <=D	>CP
26H1	18	5815.2046	0.043007	>E	>CP
26H1	19	5815.206	0.04948	>E	>CP
26H1	20	5815.2061	0.050154	>E	>CP

*Nota:* Rótulas plásticas para el modelo con suelo flexible en el programa CSI Bridge v22.0.2

### Figura 89

*Formación de rótulas plásticas transversales en pilares en el modelo con suelo flexible con columnas de grava*



*Nota:* Formación de rótulas plásticas en el paso 20 para el modelo con suelo flexible con columnas de grava en el programa CSI Bridge v22.0.2

### Tabla 20

*Rótula plástica transversalmente, análisis no lineal, puente con suelo flexible con columnas de grava*

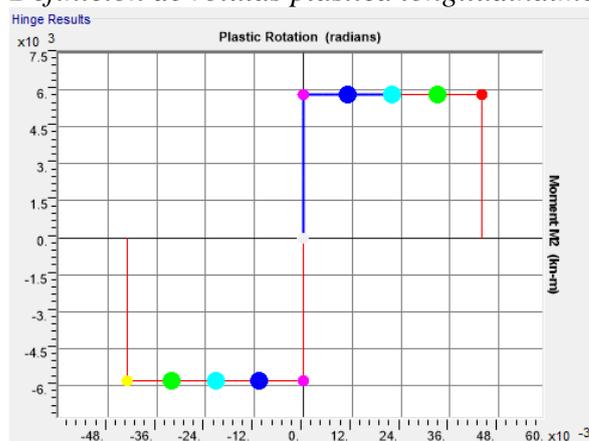
Rótula	Paso	M2 (kN*m)	R2PI (rad)	Estado R2	Estatus R2
26H1	0	0	0	A to <=B	A to <=IO
26H1	4	5857.5144	0	B to <=C	A to <=IO
26H1	10	5857.5193	0.022985	B to <=C	LS to <=CP
26H1	11	5857.5204	0.028414	B to <=C	LS to <=CP
26H1	12	5857.5216	0.033843	B to <=C	>CP
26H1	18	5857.5235	0.04282	C to <=D	>CP
26H1	19	5857.6406	0.042821	>E	>CP
26H1	20	5857.6412	0.045752	>E	>CP

*Nota:* Rótulas plásticas para el modelo con suelo flexible con columnas de grava en el programa CSI Bridge v22.0.2

En las figuras 86, 88 y 89 se presenta el desarrollo de las rótulas plásticas en el sentido transversal. Por ello, el sistema estructural es similar a un pórtico en la zona central que se representa con la colocación de las rótulas en la base y en la parte superior de los pilares.

### Figura 90

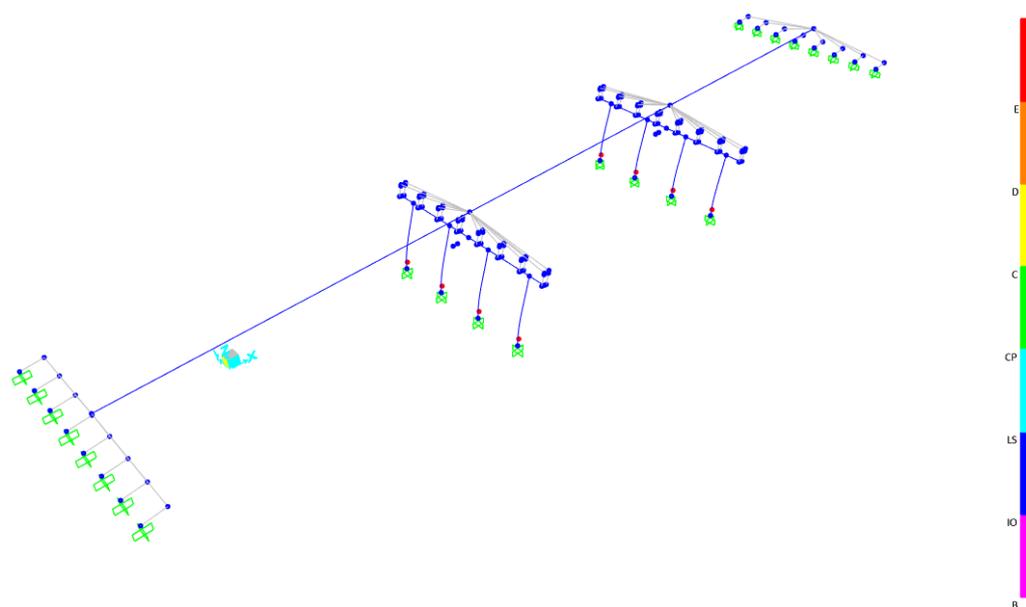
*Definición de rótulas plástica longitudinalmente*



*Nota:* Valores utilizados en el programa CSI Bridge v22.0.2

### Figura 91

*Formación de rótulas plásticas longitudinalmente en pilares en el modelo con base empotrada*



*Nota:* Formación de rótulas plásticas en el paso 19 para el modelo con suelo flexible con base empotrada en el programa CSI Bridge v22.0.2

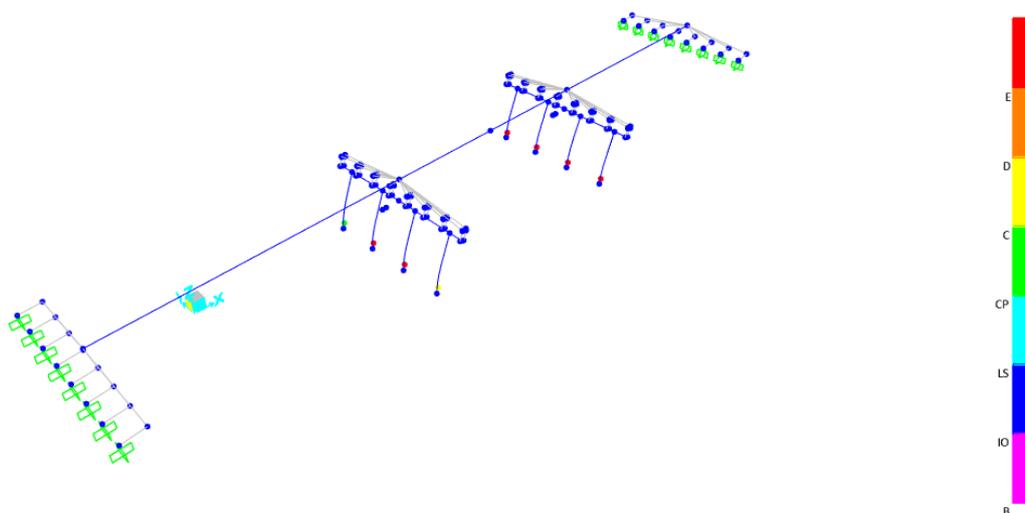
**Tabla 21***Rótulas plásticas longitudinalmente, análisis no lineal, puente con base empotrada*

Rótula	Paso	M3 (kN*m)	R3PI (rad)	Estado R3	Estatus R3
26H1	0	0.000	0.000	A to <=B	A to <=IO
26H1	1	5060.989	0.000	A to <=B	A to <=IO
26H1	2	5128.582	0.000	A to <=B	A to <=IO
26H1	3	5776.142	0.000	A to <=B	A to <=IO
26H1	4	5877.421	0.000	B to <=C	A to <=IO
26H1	5	5877.423	0.006	B to <=C	A to <=IO
26H1	6	5877.424	0.012	B to <=C	IO to <=LS
26H1	7	5877.425	0.018	B to <=C	LS to <=CP
26H1	8	5877.427	0.024	B to <=C	>CP
26H1	14	5877.427	0.025	C to <=D	>CP
26H1	15	5877.544	0.025	>E	>CP

Nota: Rótulas plásticas para el modelo con base empotrada en el programa CSI Bridge v22.0.2

**Figura 92**

*Formación de rótulas plásticas longitudinalmente en pilares en el modelo con suelo flexible*



Nota: Formación de rótulas plásticas en el paso 19 para el modelo con suelo flexible en el programa CSI Bridge v22.0.2

**Tabla 22***Rótulas plásticas longitudinalmente, análisis no lineal, puente con suelo flexible*

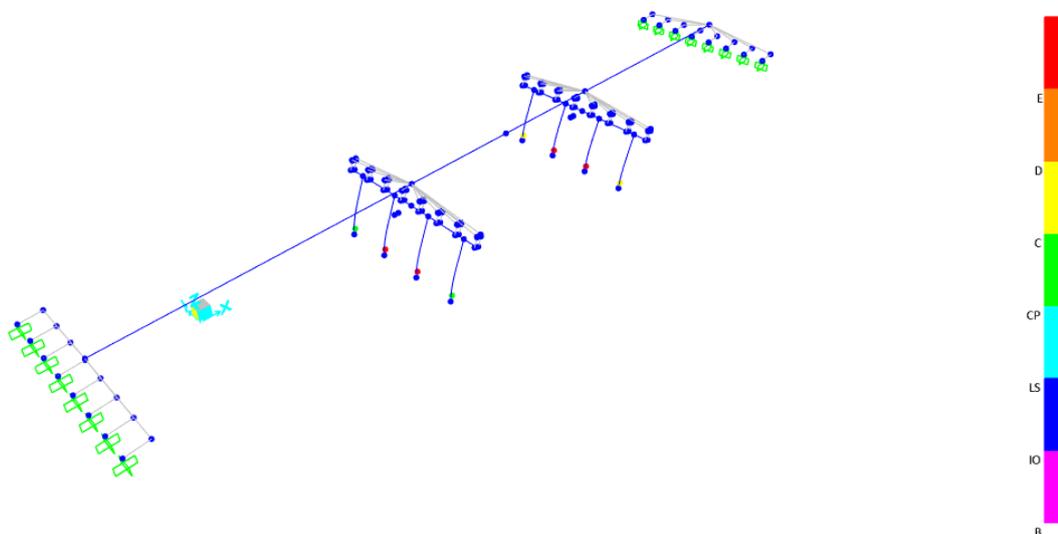
Rótula	Paso	M3 (kN*m)	R3PI (rad)	Estado R3	Estatus R3
26H1	0	0.000	0.000	A to <=B	A to <=IO
26H1	1	3654.490	0.000	A to <=B	A to <=IO
26H1	2	5659.279	0.000	A to <=B	A to <=IO
26H1	3	5732.545	0.000	A to <=B	A to <=IO
26H1	4	5815.080	0.000	B to <=C	A to <=IO

26H1	5	5815.080	0.001	B to <=C	A to <=IO
26H1	6	5815.080	0.002	B to <=C	A to <=IO
26H1	7	5815.081	0.007	B to <=C	A to <=IO
26H1	8	5815.082	0.013	B to <=C	IO to <=LS
26H1	9	5815.084	0.019	B to <=C	IO to <=LS
26H1	10	5815.085	0.025	B to <=C	LS to <=CP
26H1	11	5815.086	0.031	B to <=C	LS to <=CP
26H1	12	5815.087	0.037	B to <=C	>CP
26H1	13	5815.088	0.042	B to <=C	>CP
26H1	14	5815.088	0.042	B to <=C	>CP
26H1	15	5815.089	0.042	B to <=C	>CP
26H1	16	5815.0885	0.042	B to <=C	>CP
26H1	17	5815.0886	0.043	C to <=D	>CP
26H1	18	5815.2046	0.043	>E	>CP
26H1	19	5815.206	0.049	>E	>CP
26H1	20	5815.2061	0.050	>E	>CP

Nota: Rótulas plásticas para el modelo con suelo flexible en el programa CSI Bridge v22.0.2

### Figura 93

Formación de rótulas plásticas longitudinalmente en pilares en el modelo con suelo flexible con columnas de grava.



Nota: Formación de rótulas plásticas en el paso 13 para el modelo con suelo flexible con columnas de grava en el programa CSI Bridge v22.0.2

### Tabla 23

Rótulas plásticas longitudinalmente, análisis no lineal, puente con suelo flexible con columnas de grava

Rótula	Paso	M3 (kN*m)	R3PI (rad)	Estado R3	Estatus R3
26H1	0	0.000	0.000	A to <=B	A to <=IO

26H1	1	3535.934	0.000	A to <=B	A to <=IO
26H1	2	5552.140	0.000	A to <=B	A to <=IO
26H1	3	5737.333	0.000	A to <=B	A to <=IO
26H1	4	5857.514	0.000	B to <=C	A to <=IO
26H1	5	5857.515	0.000	B to <=C	A to <=IO
26H1	6	5857.515	0.001	B to <=C	A to <=IO
26H1	7	5857.516	0.007	B to <=C	A to <=IO
26H1	8	5857.517	0.012	B to <=C	IO to <=LS
26H1	9	5857.518	0.018	B to <=C	IO to <=LS
26H1	10	5857.519	0.023	B to <=C	LS to <=CP
26H1	11	5857.520	0.028	B to <=C	LS to <=CP
26H1	12	5857.522	0.034	B to <=C	>CP
26H1	13	5857.523	0.039	B to <=C	>CP
26H1	14	5857.523	0.042	B to <=C	>CP
26H1	15	5857.523	0.042	B to <=C	>CP
26H1	16	5857.5234	0.042	B to <=C	>CP
26H1	17	5857.5234	0.042	B to <=C	>CP
26H1	18	5857.5235	0.043	C to <=D	>CP
26H1	19	5857.6406	0.043	>E	>CP
26H1	20	5857.6412	0.046	>E	>CP

*Nota:* Rótulas plásticas para el modelo con suelo flexible con columnas de grava en el programa CSI Bridge v22.0.2

En las figuras 91, 92 y 93 se presenta el desarrollo de las rótulas plásticas en el sentido longitudinal. Por ello, el sistema estructural es similar a una viga en voladizo que se representa con la colocación de las rótulas en la base de los pilares.

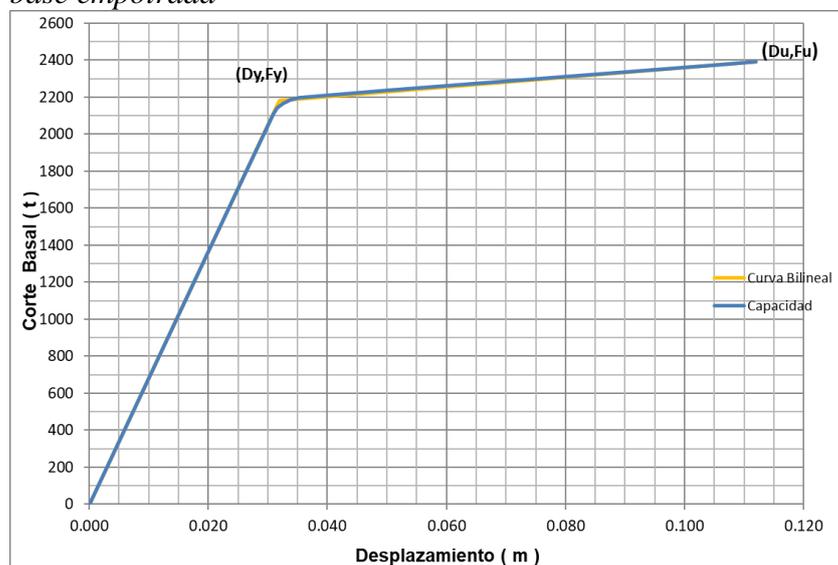
#### **4.1.4.2.6 Curva Capacidad**

En la presente sección se presenta la curva capacidad de la estructura tanto en sentido longitudinal como en transversal. Además, se procede a mostrar la curva capacidad bilinealizada en función de los puntos de fluencia y rotura, calculados a partir de una equivalencia de áreas.

## Puente con base empotrada

**Figura 94**

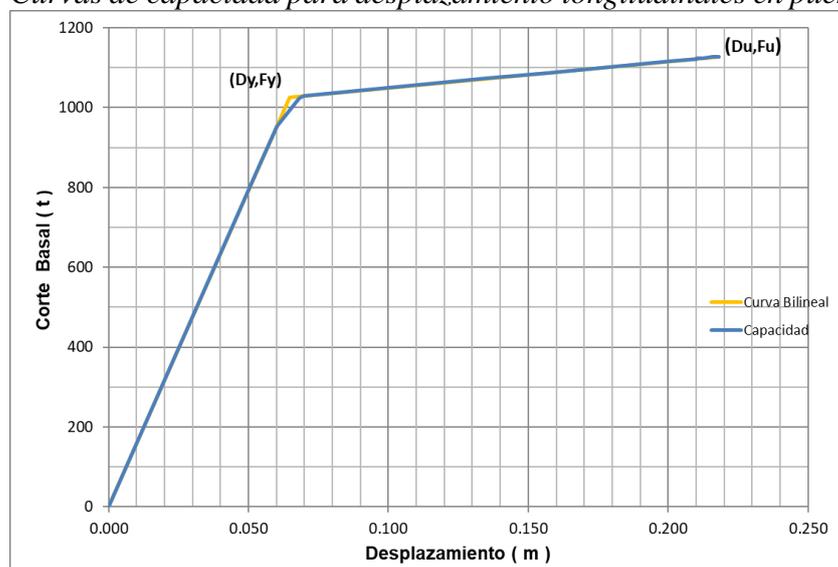
*Curvas de capacidad para desplazamiento transversales en puente con suelo flexible con base empotrada*



*Nota:* Curvas de capacidad y curva bilineal representativa de modelo en puente con base empotrada.

**Figura 95**

*Curvas de capacidad para desplazamiento longitudinales en puente con base empotrada.*



*Nota:* Curvas de capacidad y curva bilineal representativa de cada modelo en puente con base empotrada

En las figuras 94 y 95, se presentan las curvas capacidad del modelo y las curvas de capacidad idealizadas de manera bilineal para el sistema empotrado. En la figura 94, se observa la curva capacidad transversal con un desplazamiento de fluencia de 0.032 m y un desplazamiento de rotura de 0.112 m, mientras en el caso de la cortante basal se

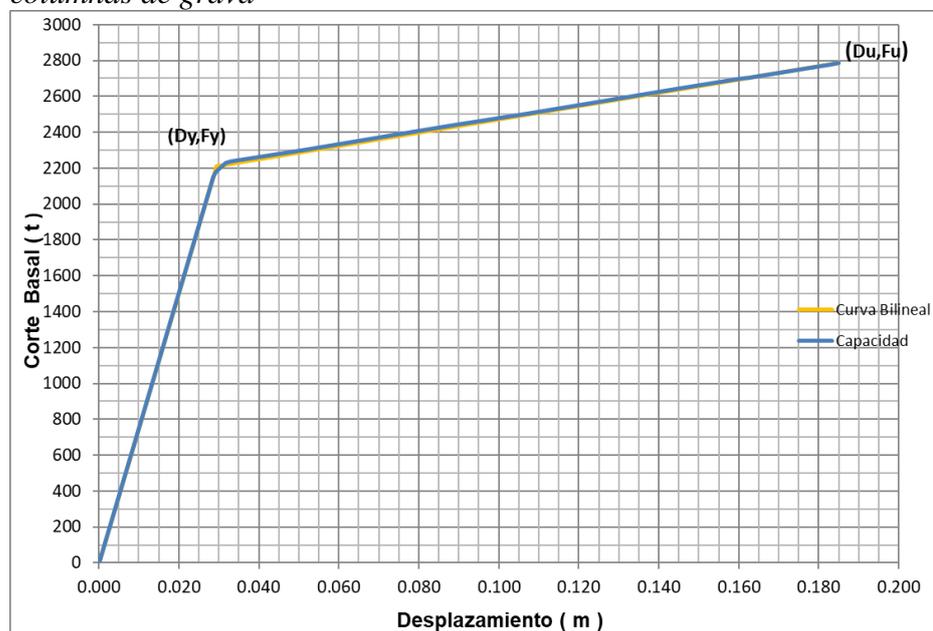
obtiene 2182 t en fluencia, 2392 t en rotura. En la figura 95, se observa la curva capacidad longitudinal se observa un desplazamiento de fluencia de 0.065 m y un desplazamiento de rotura de 0.218 m, mientras en el caso de la cortante basal se obtiene 1026 t en fluencia, 1128 t en rotura.

A partir de las curvas capacidades, se calcula la ductilidad de la estructura en sentido transversal ( $\mu_{str\_trans}$ ) donde el valor del desplazamiento en fluencia es  $d_{py\_trans} = 0.032m$  mientras el valor del desplazamiento último es  $d_{pu\_trans} = 0.112m$ , resultando  $\mu_{str\_trans} = \frac{d_{py}}{d_{pu}} = 3.50$ . En cambio, en el sentido longitudinal, se calcula la ductilidad de la estructura ( $\mu_{str\_long}$ ) donde el valor del desplazamiento en fluencia es  $d_{py\_long} = 0.065m$  mientras el valor del desplazamiento último es  $d_{pu\_long} = 0.218m$ , resultando  $\mu_{str\_long} = \frac{d_{py}}{d_{pu}} = 3.35$ .

### Puente con suelo flexible

#### Figura 96

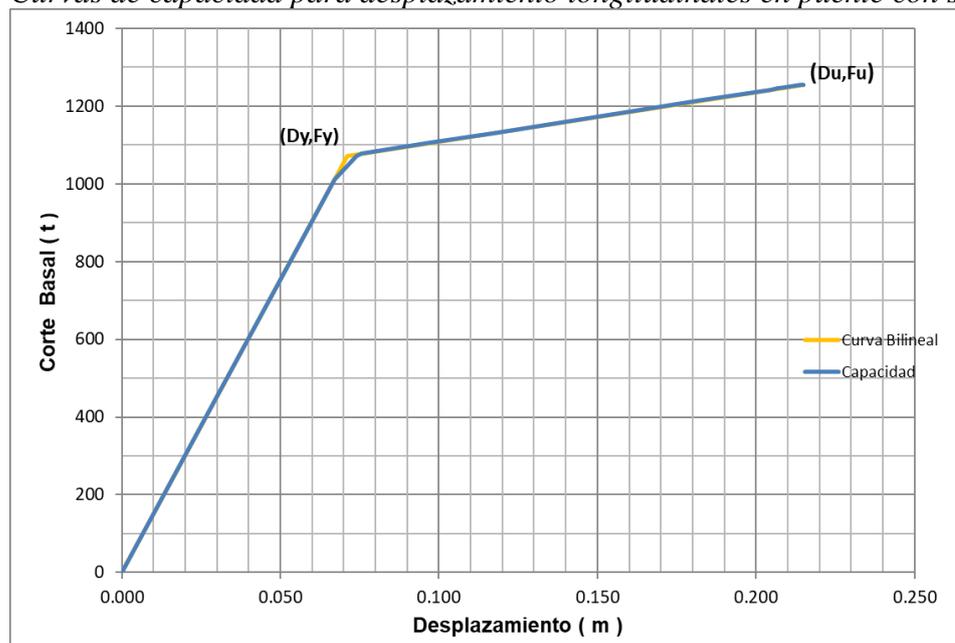
Curvas de capacidad para desplazamiento transversales en puente con suelo flexible con columnas de grava



Nota: Curvas de capacidad y curva bilineal representativa de modelo en puente con suelo flexible

**Figura 97**

*Curvas de capacidad para desplazamiento longitudinales en puente con suelo flexible*



*Nota:* Curvas de capacidad y curva bilineal representativa de cada modelo en puente con suelo flexible

En las figuras 96 y 97, se presentan las curvas capacidad del modelo y las curvas de capacidad idealizadas de manera bilineal para un sistema de suelo flexible. En la figura 96, se observa la curva capacidad transversal se observa un desplazamiento de fluencia de 0.029 m y un desplazamiento de rotura de 0.185 m, mientras en el caso de la cortante basal se obtiene 2213 t en fluencia, 2786 t en rotura. En la figura 97, se observa la curva capacidad longitudinal con un desplazamiento de fluencia de 0.071 m y un desplazamiento de rotura de 0.215 m, mientras en el caso de la cortante basal se obtiene 1071 t en fluencia, 1256 t en rotura. En este modelo estructural se observa un aumento de respuestas frente al modelo con base empotrada.

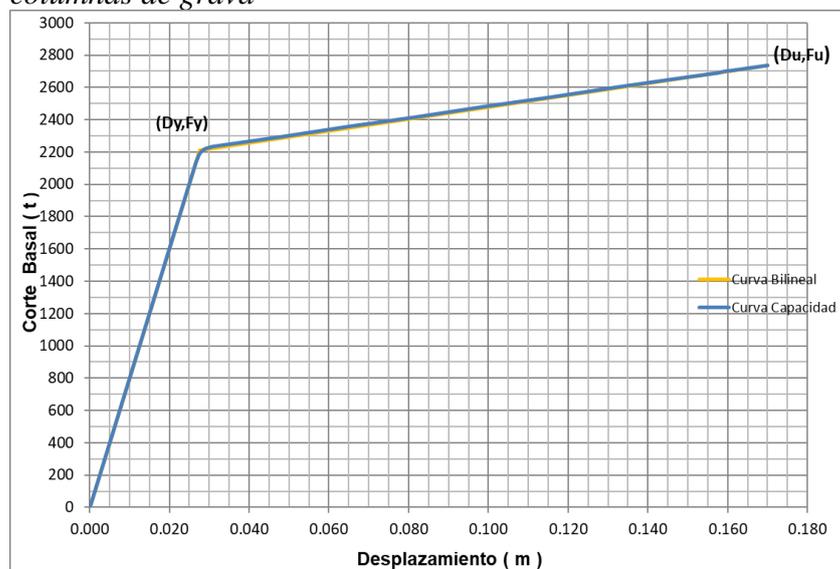
A partir de las curvas capacidades para el suelo flexible, se calcula la ductilidad de la estructura en sentido transversal ( $\mu_{str\_trans}$ ) donde el valor del desplazamiento en fluencia es  $d_{py\_trans} = 0.029m$  mientras el valor del desplazamiento último es  $d_{pu\_trans} = 0.182m$ , resultando  $\mu_{str\_trans} = \frac{d_{py}}{d_{pu}} = 6.27$ . En cambio, en el sentido longitudinal, se calcula la ductilidad de la estructura ( $\mu_{str\_long}$ ) donde el valor del desplazamiento en fluencia es  $d_{py\_long} = 0.071m$  mientras el valor del desplazamiento

último es  $d_{pu\_long} = 0.215m$ , resultando  $\mu_{str\_long} = \frac{d_{py}}{d_{pu}} = 3.02$ . Estos valores se han calculado considerando el punto de control presentado.

### Puente con suelo flexible con columnas de grava

**Figura 98**

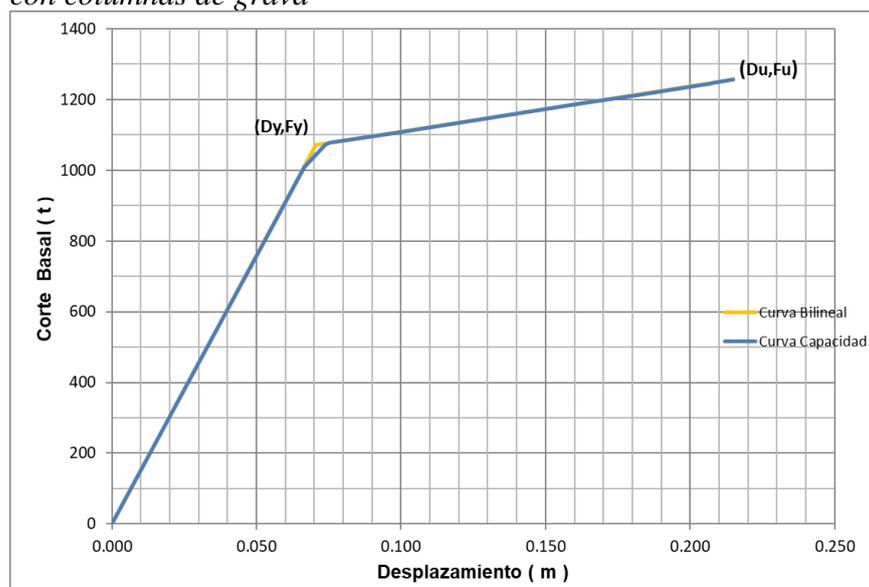
*Curvas de capacidad para desplazamiento transversales en puente con suelo flexible con columnas de grava*



*Nota:* Curvas de capacidad y curva bilineal representativa de modelo en puente con suelo flexible con columnas de grava.

**Figura 99**

*Curvas de capacidad para desplazamiento longitudinales en puente con suelo flexible con columnas de grava*



*Nota:* Curvas de capacidad y curva bilineal representativa de cada modelo en puente con suelo flexible con columnas de grava.

En las figuras 98 y 99, se presentan las curvas capacidad del modelo y las curvas de capacidad idealizadas de manera bilineal para un sistema de suelo flexible con columnas de grava. En la figura 98, se observa la curva capacidad transversal con un desplazamiento de fluencia de 0.048 m y un desplazamiento de rotura de 0.170 m, mientras en el caso de la cortante basal se obtiene 2213 t en fluencia, 2736 t en rotura. En la figura 99, se observa la curva capacidad longitudinal con un desplazamiento de fluencia de 0.037 m y un desplazamiento de rotura de 0.267 m, mientras en el caso de la cortante basal se obtiene 1013 t en fluencia, 887 t en rotura. En este modelo estructural se observa un aumento de respuestas frente al modelo con base empotrada y una similitud al sistema con suelo flexible.

A partir de las curvas capacidades para el suelo flexible, se calcula la ductilidad de la estructura en sentido transversal ( $\mu_{str\_trans}$ ) donde el valor del desplazamiento en fluencia es  $d_{py\_trans} = 0.028m$  mientras el valor del desplazamiento último es  $d_{pu\_trans} = 0.170m$ , resultando  $\mu_{str\_trans} = \frac{d_{py}}{d_{pu}} = 6.07$ . En cambio, en el sentido longitudinal, se calcula la ductilidad de la estructura ( $\mu_{str\_long}$ ) donde el valor del desplazamiento en fluencia es  $d_{py\_long} = 0.071m$  mientras el valor del desplazamiento último es  $d_{pu\_long} = 0.215m$ , resultando  $\mu_{str\_long} = \frac{d_{py}}{d_{pu}} = 3.02$ .

#### 4.1.4.2.7 Espectro de capacidad

##### Puente con base empotrada

**Figura 100**

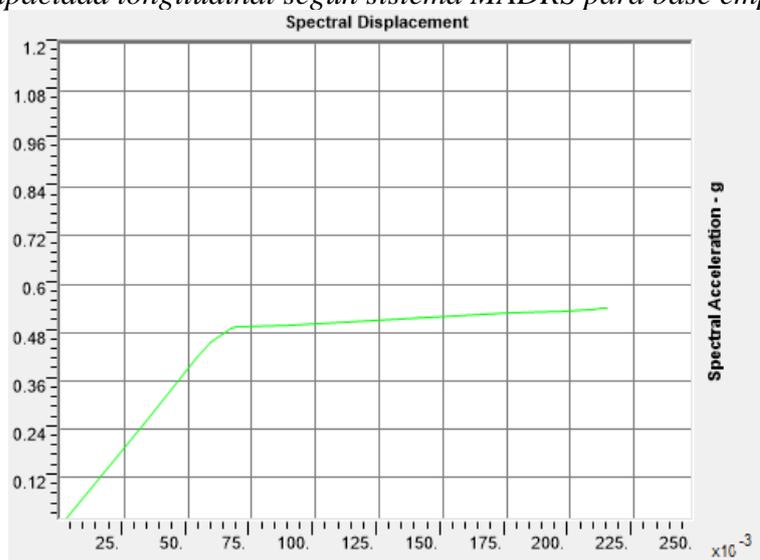
*Espectro de capacidad transversal según sistema MADRS para base empotrada.*



*Nota:* Valores de curva capacidad convertida a un sistema espectral con base empotrada, donde el eje vertical representa la aceleración espectral (Sa) en g, mientras el eje horizontal representa el desplazamiento espectral (Sd) en m.

**Figura 101**

*Espectro de capacidad longitudinal según sistema MADRS para base empotrada*

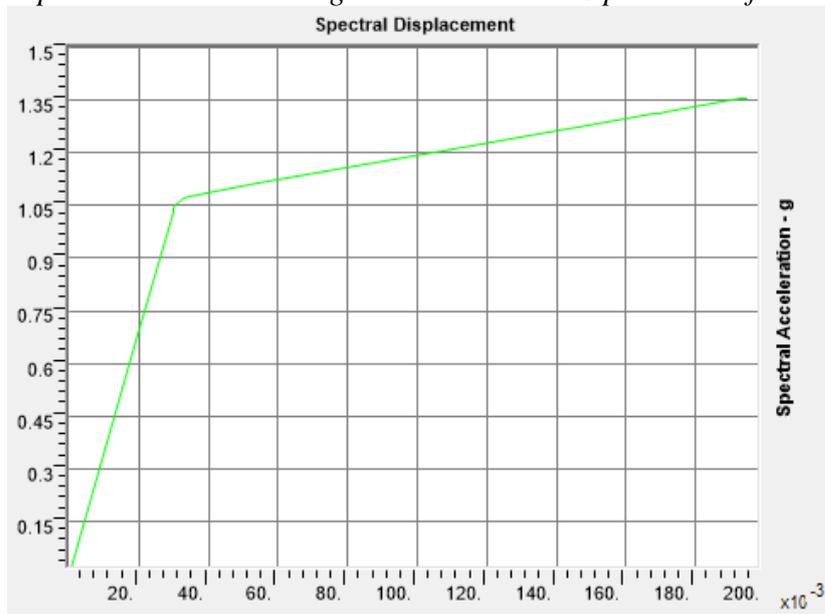


*Nota:* Valores de curva capacidad convertida a un sistema espectral con base empotrada, donde el eje vertical representa la aceleración espectral (Sa) en g, mientras el eje horizontal representa el desplazamiento espectral (Sd) en m.

## Puente con suelo flexible

**Figura 102**

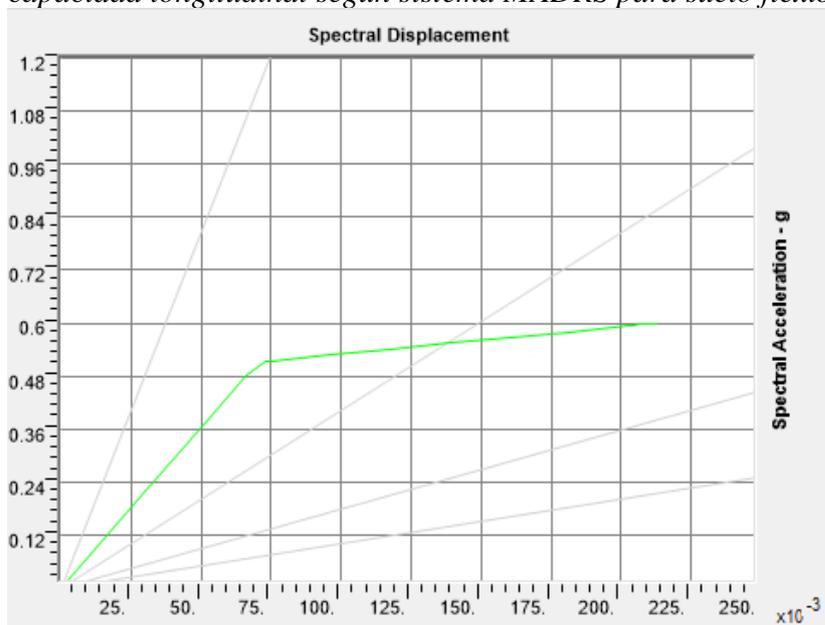
*Espectro de capacidad transversal según sistema MADRS para suelo flexible*



*Nota:* Valores de curva capacidad convertida a un sistema espectral con suelo flexible, donde el eje vertical representa la aceleración espectral (Sa) en g, mientras el eje horizontal representa el desplazamiento espectral (Sd) en m.

**Figura 103**

*Espectro de capacidad longitudinal según sistema MADRS para suelo flexible*



*Nota:* Valores de curva capacidad convertida a un sistema espectral con suelo flexible, donde el eje vertical representa la aceleración espectral (Sa) en g, mientras el eje horizontal representa el desplazamiento espectral (Sd) en m.

## Puente con suelo flexible con columnas de grava

**Figura 104**

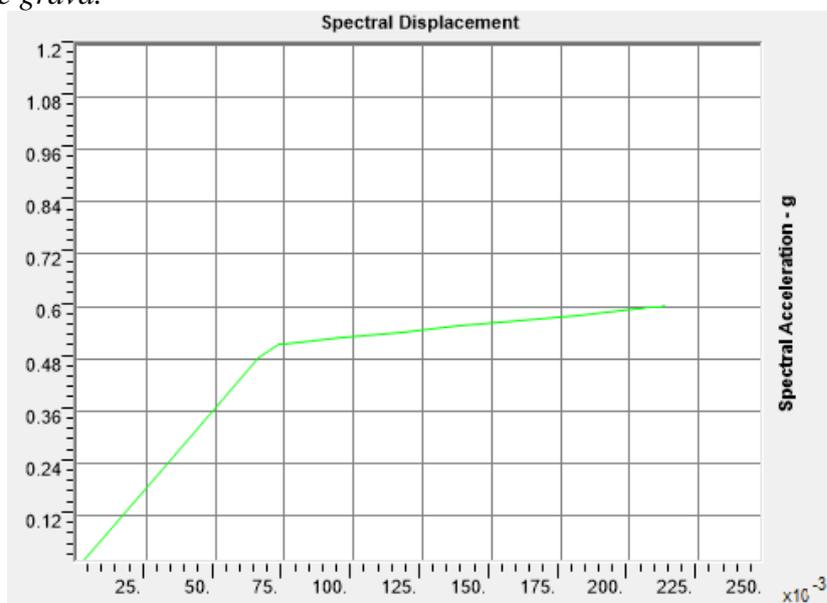
*Espectro de capacidad transversal según sistema MADRS para suelo flexible con columnas de grava.*



*Nota:* Valores de curva capacidad convertida a un sistema espectral con suelo flexible con columnas de grava, donde el eje vertical representa la aceleración espectral ( $S_a$ ) en g, mientras el eje horizontal representa el desplazamiento espectral ( $S_d$ ) en m.

**Figura 105**

*Espectro de capacidad longitudinal según sistema MADRS para suelo flexible con columnas de grava.*



*Nota:* Valores de curva capacidad convertida a un sistema espectral con suelo flexible con columnas de grava, donde el eje vertical representa la aceleración espectral ( $S_a$ ) en g, mientras el eje horizontal representa el desplazamiento espectral ( $S_d$ ) en m.

#### 4.1.4.2.8 Ratios de desplazamiento

**Tabla 24**

*Ratios de desplazamiento transversal con base empotrada.*

	<b>Demanda</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Ratio de desplazamiento</b>
Pilar 1	16.44	112	0.15
Pilar 2	13.56	112	0.12

*Nota:* Ratios de desplazamiento obtenidos considerando la tolerancia máxima <1

**Tabla 25**

*Ratios de desplazamiento longitudinal con base empotrada.*

	<b>Demanda</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Ratio de desplazamiento</b>
Pilar 1	55.07	218	0.25
Pilar 2	51.94	218	0.24

*Nota:* Ratios de desplazamiento obtenidos considerando la tolerancia máxima <1

**Tabla 26**

*Ratios de desplazamiento transversal con suelo flexible.*

	<b>Demanda</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Ratio de desplazamiento</b>
Pilar 1	22.28	182	0.12
Pilar 2	18.45	182	0.10

*Nota:* Ratios de desplazamiento obtenidos considerando la tolerancia máxima <1

**Tabla 27**

*Ratios de desplazamiento longitudinal con suelo flexible.*

	<b>Demanda</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Ratio de desplazamiento</b>
Pilar 1	61.64	215	0.29
Pilar 2	58.50	215	0.27

*Nota:* Ratios de desplazamiento obtenidos considerando la tolerancia máxima <1

**Tabla 28**

*Ratios de desplazamiento transversal con suelo flexible con columnas de grava.*

	<b>Demanda</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Ratio de desplazamiento</b>
Pilar 1	21.30	170	0.13
Pilar 2	17.30	170	0.10

*Nota:* Ratios de desplazamiento obtenidos considerando la tolerancia máxima <1

**Tabla 29**

*Ratios de desplazamiento longitudinal con suelo flexible con columnas de grava.*

	<b>Demanda</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Ratio de desplazamiento</b>
Pilar 1	61.70	215	0.29
Pilar 2	58.60	215	0.27

*Nota:* Ratios de desplazamiento obtenidos considerando la tolerancia máxima <1

En las tablas 24 y 25, se presenta los ratios de desplazamiento transversal y longitudinal con base empotrada, mientras en las tablas 26 y 27 se presenta los ratios de desplazamiento transversal y longitudinal con suelo flexible, y en las tablas 28 y 29 se presenta los ratios de desplazamiento de desplazamiento transversal y longitudinal con suelo flexible con columnas de grava. En los casos de suelo flexible con y sin columnas

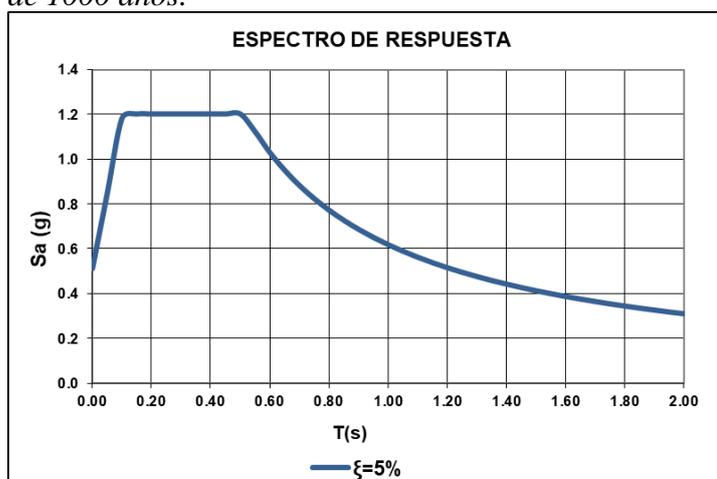
de grava si se compara con el apoyo empotrado, se observa que la demanda aumenta similar a la capacidad, por tanto, el ratio de desplazamiento aumenta, también.

#### 4.1.4.2.9 Espectro de demanda

El espectro de demanda queda definido a lo indicado por el informe técnico del puente de la avenida Sánchez Cerro.

#### Figura 106

Espectro de demandas para un modelo de base empotrada para un periodo de retorno de 1000 años.



Nota: Curvas de espectro demanda considerando un periodo de retorno de 1000 años con un amortiguamiento de 5%.

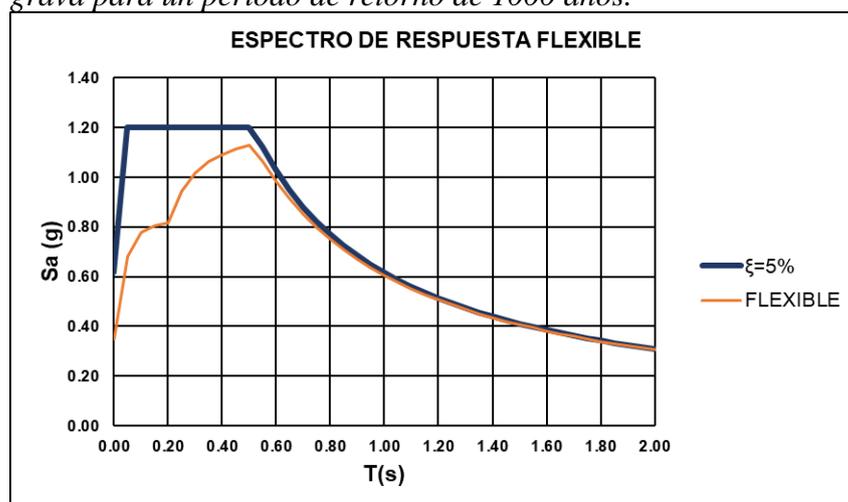
Para la interacción suelo estructura se procede a calcular el amortiguamiento equivalente según FEMA 440, ver sección 8.3, considerando el factor de escalamiento por el factor cinemático, donde se observa la reducción de las demandas sísmicas, mediante las siguientes fórmulas:

$$RRS_{bsa} = 1 - \frac{1}{14,100} \left( \frac{b_e}{T} \right)^{1.2} \geq \text{the value for } T = 0.2 \text{ s} \quad (8-1)$$

Adicionalmente, se debe multiplicar por un factor de reducción dependiendo del valor del amortiguamiento efectivo del suelo ( $\beta_{eff}$ ), cuyo valor es 5.08% y un factor de escalamiento (B) de 1, ver anexo G. El espectro de demanda con interacción suelo-estructura queda modificado de la siguiente manera:

#### Figura 107

*Espectro de demandas para un modelo de suelo flexible y suelo flexible con columnas de grava para un periodo de retorno de 1000 años.*



*Nota:* Curvas de espectro demanda considerando un periodo de retorno de 1000 años con un amortiguamiento de 5.28%.

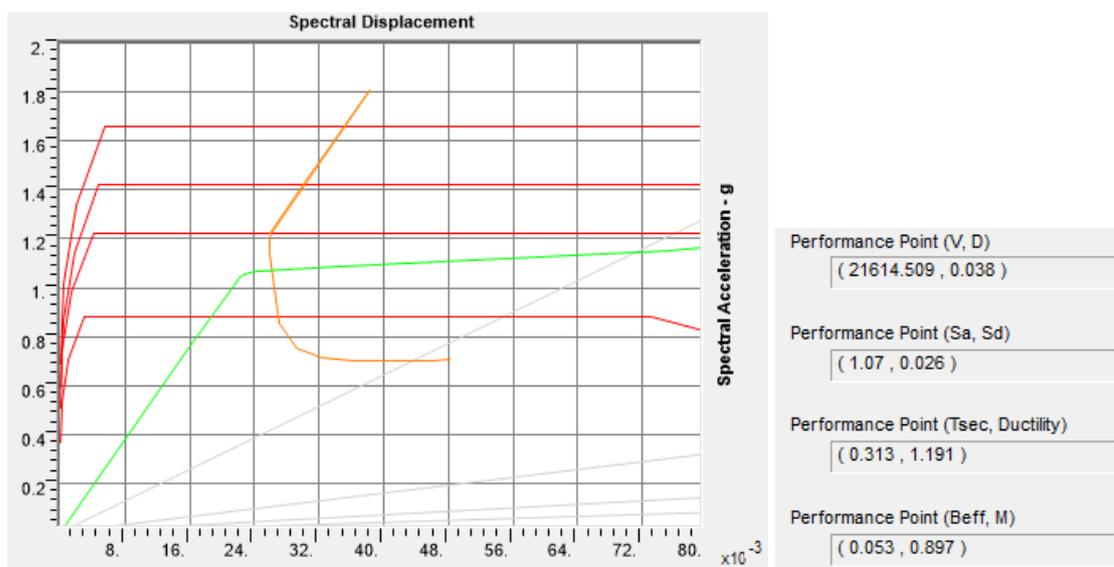
#### **4.1.4.2.10 Punto de desempeño**

El punto de desempeño se calcula mediante la superposición de las curvas de espectro capacidad y el espectro de demanda. Para dicho proceso, se presenta una primera iteración con un amortiguamiento efectivo de 5%, procediendo a aumentar el amortiguamiento efectivo hasta que llega a una intersección con el espectro de demanda y el espectro de capacidad, considerando el periodo efectivo. En las siguientes gráficas se observa el amortiguamiento inicial de 5%, frente al amortiguamiento calculado para llegar a la intersección.

#### **Puente con base empotrada**

#### **Figura 108**

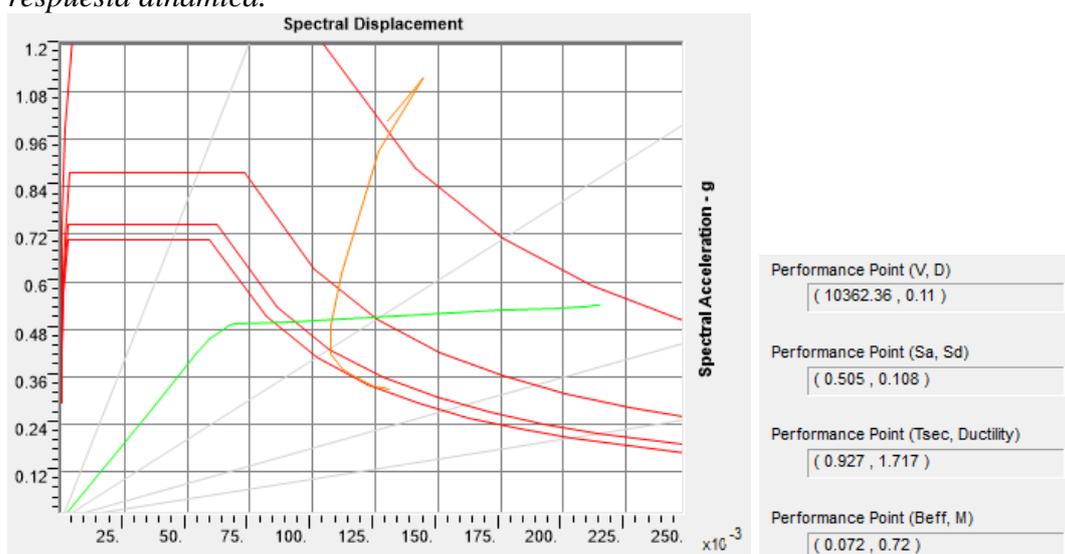
*Gráfico para el cálculo del punto de desempeño transversalmente según espectro de respuesta dinámica.*



*Nota:* Punto de desempeño calculado en el programa CSI Bridge v22 para el puente con base empotrada de manera longitudinal, según metodología ATC-40 con curvas de espectro de demanda para valores de 5%, 10%, 15% y 20% en amortiguamiento.

### Figura 109

Gráfico para el cálculo del punto de desempeño longitudinalmente según espectro de respuesta dinámica.



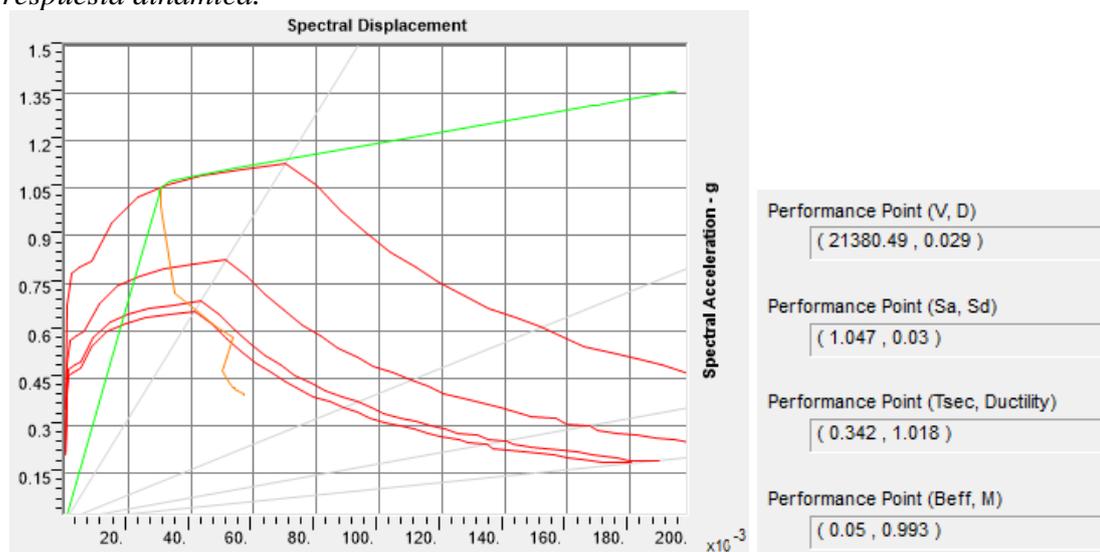
*Nota:* Punto de desempeño calculado en el programa CSI Bridge v22 para el puente con base empotrada de manera longitudinal, según metodología ATC-40 para valores de 5%, 10%, 15% y 20% en amortiguamiento.

### Puente con suelo flexible

Para el cálculo del punto de desempeño considerando el efecto de interacción estructura se superpone con el espectro de demanda según FEMA 440, considerando los efectos cinemáticos.

**Figura 110**

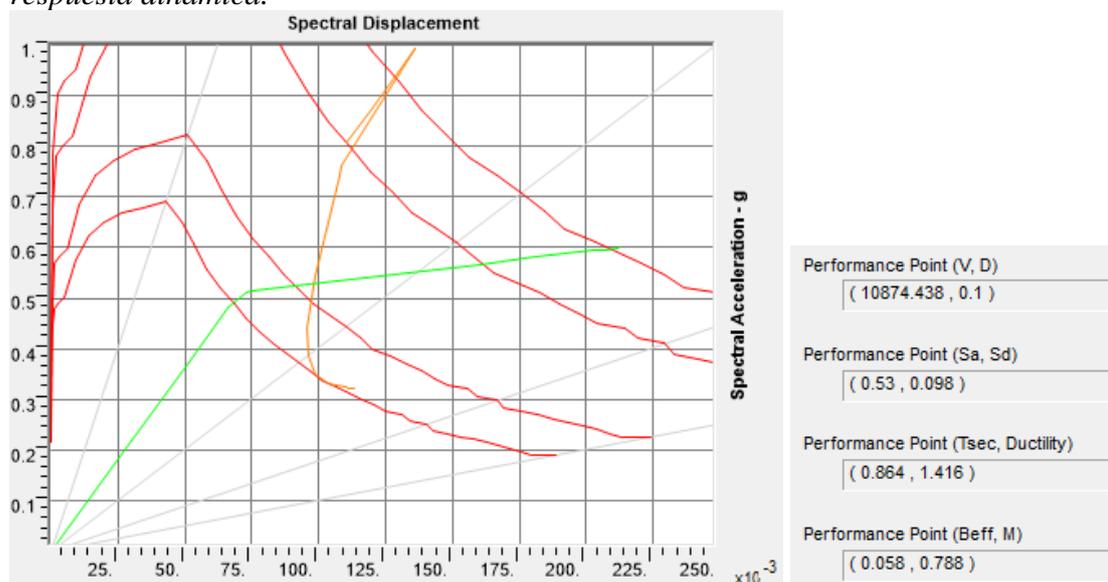
Gráfico para el cálculo del punto de desempeño transversalmente según espectro de respuesta dinámica.



Nota: Punto de desempeño calculado en el programa CSI Bridge v22 para el puente con suelo flexible de manera longitudinal, según metodología FEMA 440.

**Figura 111**

Gráfico para el cálculo del punto de desempeño longitudinalmente según espectro de respuesta dinámica.

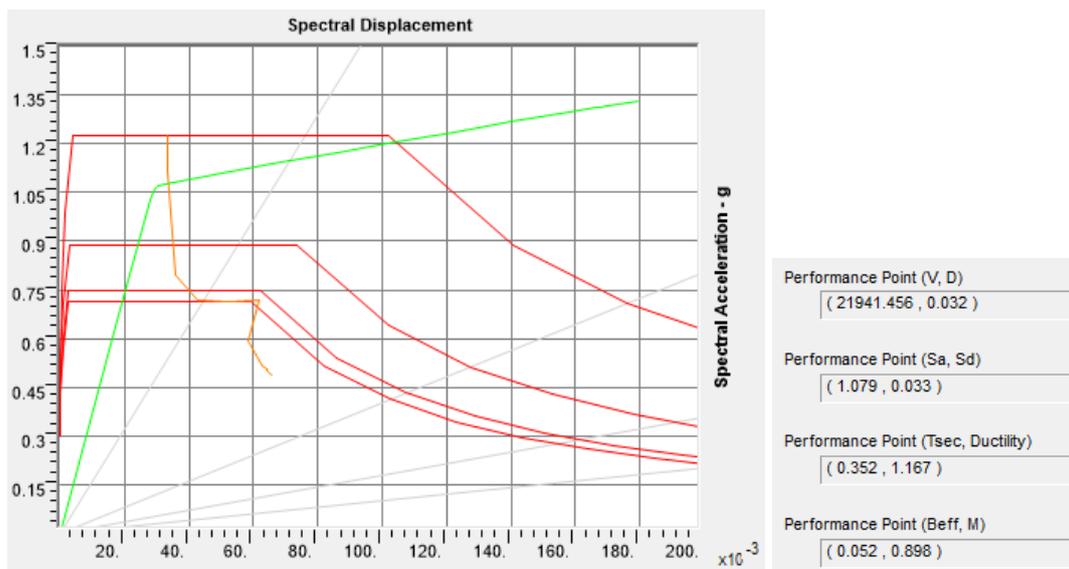


Nota: Punto de desempeño calculado en el programa CSI Bridge v22 para el puente con suelo flexible de manera longitudinal, según metodología FEMA 440.

### Puente con suelo flexible con columnas de grava

**Figura 112**

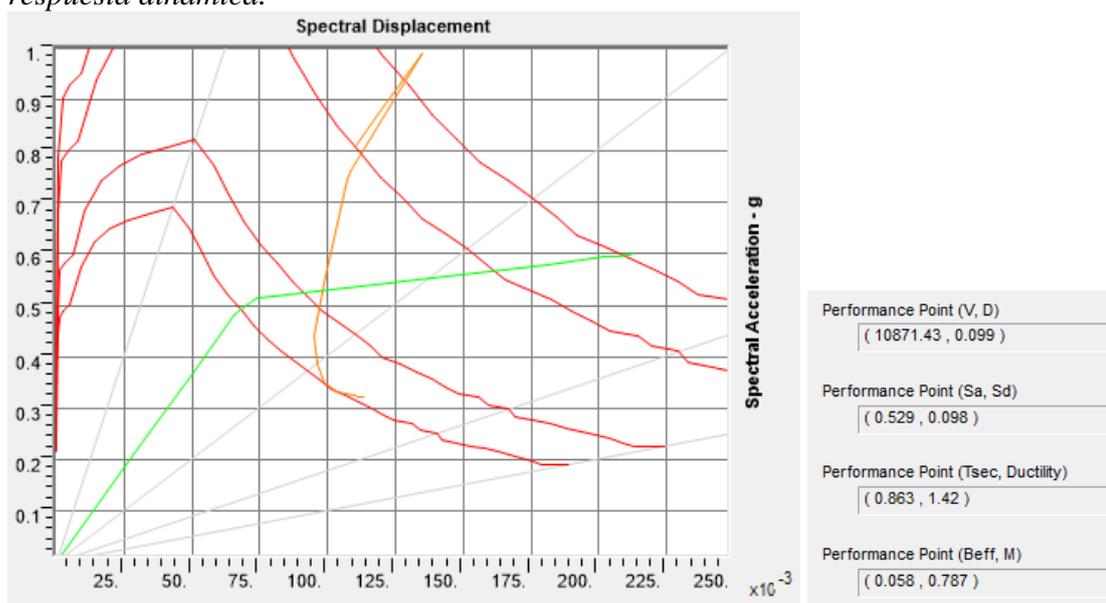
Gráfico para el cálculo del punto de desempeño transversalmente según espectro de respuesta dinámica.



*Nota:* Punto de desempeño calculado en el programa CSI Bridge v22 para el puente con columnas de grava de manera longitudinal, según metodología FEMA 440.

**Figura 113**

*Gráfico para el cálculo del punto de desempeño longitudinalmente según espectro de respuesta dinámica.*



*Nota:* Punto de desempeño calculado en el programa CSI Bridge v22 para el puente con columnas de grava de manera longitudinal, según metodología FEMA 440.

#### 4.1.4.2.11 Desplazamiento objetivo

**Tabla 30**

*Desplazamientos objetivos calculados según FEMA 440*

Base empotrada		Suelo flexible		Suelo flexible con columnas de grava	
Sa (g)	Sd (m)	Sa (g)	Sd (m)	Sa (g)	Sd (m)

Desplazamiento objetivo transversal	1.07	0.026	1.047	0.030	1.079	0.033
Desplazamiento objetivo longitudinal	0.505	0.108	0.53	0.098	0.529	0.098

*Nota:* Desplazamientos objetivos transversales y longitudinales.

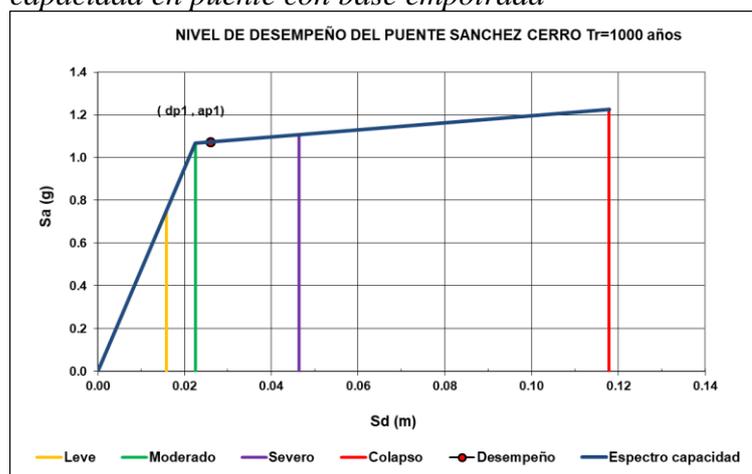
El punto de desempeño transversal, considerando la base empotrada, resulta en valores para  $S_a$  es 1.07 g, mientras  $S_d$  es 0.026m, mientras para valores con suelo flexible con y sin columnas de grava, resulta en  $S_a$  es 1.047 g a 1.079 g, mientras  $S_d$  es 0.030 a 0.033m. De igual manera, el punto de desempeño longitudinal, considerando la base empotrada, resulta en valores para  $S_a$  es 0.505 g, mientras  $S_d$  es 0.108m, mientras para valores con suelo flexible con y sin columnas de grava, resulta en  $S_a$  es 0.53 g, mientras  $S_d$  es 0.098 m. En ambos casos, el desplazamiento espectral disminuye y la aceleración espectral aumenta debido al efecto de interacción suelo-estructura.

#### 4.1.4.2.12 Nivel de vulnerabilidad

##### Puente con base empotrada

#### Figura 114

Representación de los niveles de desempeño transversalmente en el espectro de capacidad en puente con base empotrada

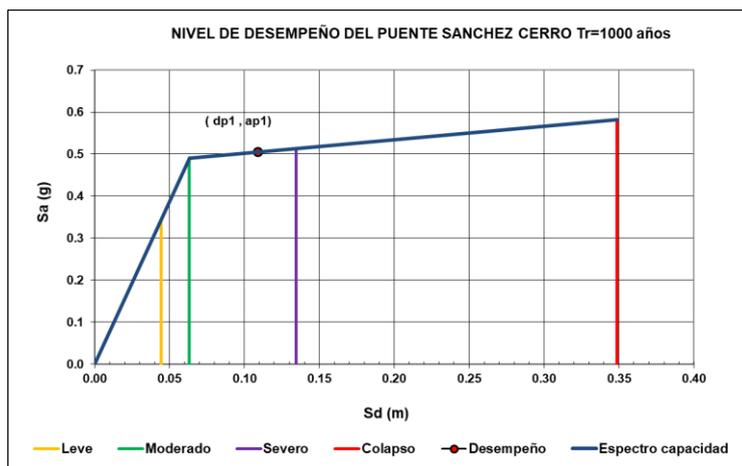


*Nota:* Valores obtenidos de acuerdo a la metodología risk-UE (2003) en puente con base empotrada.

Se observa que el nivel de desempeño se encuentra en un nivel moderado a severo.

#### Figura 115

Representación de los niveles de desempeño longitudinalmente en el espectro de capacidad en puente con base empotrada



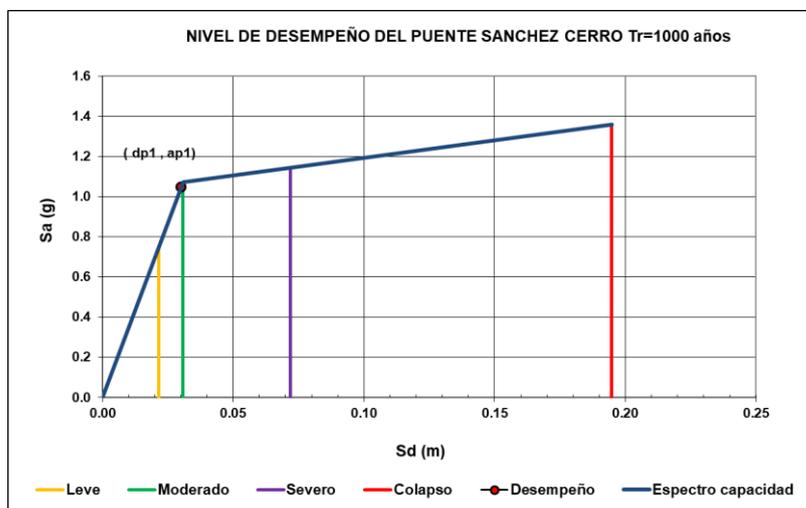
*Nota:* Nivel de desempeño para un periodo de retorno de 1000 años según risk-UE (2003) en puente con base empotrada.

Se observa que el nivel de desempeño se encuentra en un nivel daño moderado a severo.

### Puente con suelo flexible

#### Figura 116

*Representación de los niveles de desempeño transversalmente en el espectro de capacidad en puente con suelo flexible*

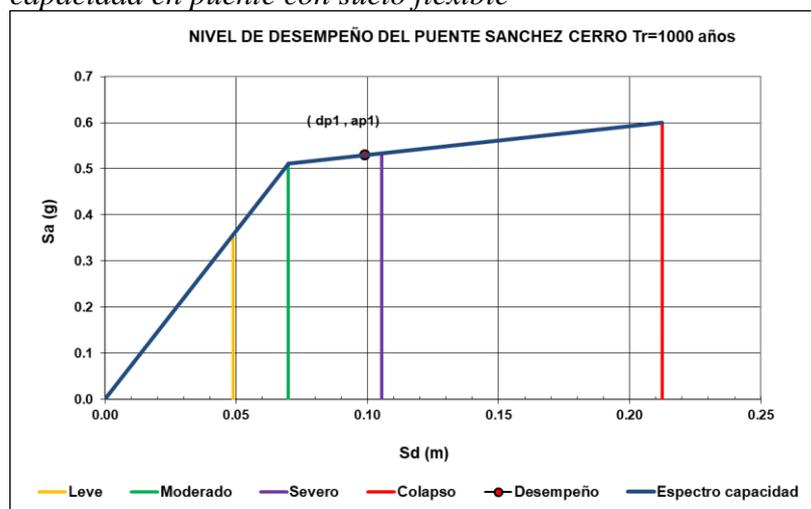


*Nota:* Valores obtenidos de acuerdo a la metodología risk-UE (2003) en puente con suelo flexible.

Se observa que el nivel de desempeño se encuentra en un nivel leve a moderado.

**Figura 117**

Representación de los niveles de desempeño longitudinalmente en el espectro de capacidad en puente con suelo flexible



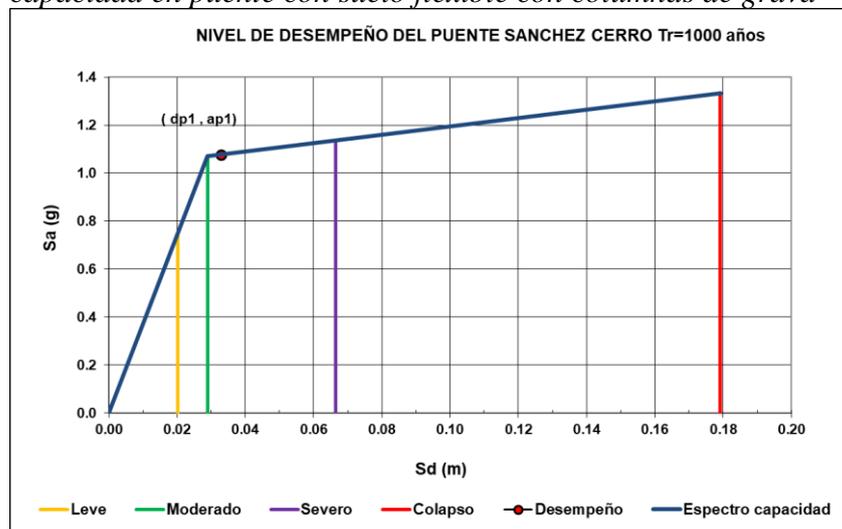
Nota: Valores obtenidos de acuerdo a la metodología risk-UE (2003) en puente con suelo flexible.

Se observa que el nivel de desempeño se encuentra en un nivel moderado a severo.

### Puente con suelo flexible con columnas de grava

**Figura 118**

Representación de los niveles de desempeño transversalmente en el espectro de capacidad en puente con suelo flexible con columnas de grava

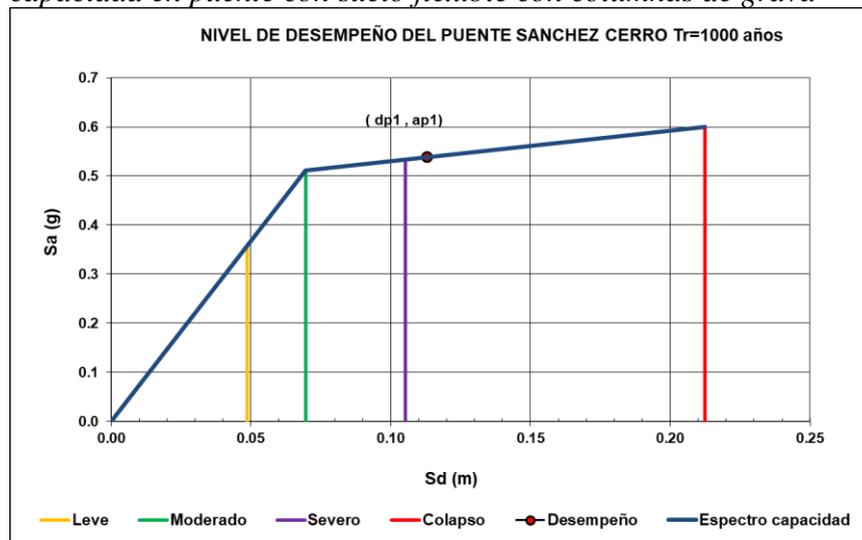


Nota: Valores obtenidos de acuerdo a la metodología risk-UE (2003) en puente con suelo flexible con columnas de grava.

Se observa que el nivel de desempeño se encuentra en un nivel moderado a severo.

**Figura 119**

*Representación de los niveles de desempeño longitudinalmente en el espectro de capacidad en puente con suelo flexible con columnas de grava*



*Nota:* Valores obtenidos de acuerdo a la metodología risk-UE (2003) en puente con suelo flexible con columnas de grava.

Se observa que el nivel de desempeño se encuentra en un nivel daño severo a colapso.

## 4.2 Discusión de resultados

En la presente sección, se procede a analizar los resultados obtenidos a partir de la contrastación con otras investigaciones y teorías referentes con la hipótesis general y las hipótesis específicas de la investigación. Los resultados obtenidos (sección 4.1.4), mediante modelos estructurales y geotécnicos (sección 4.1.1) se han desarrollado bajo los lineamientos de teorías actuales y normativas, considerando el estado actual de la estructura y el suelo.

### 4.2.1 Efectos de la interacción suelo-estructura para la obtención de la respuesta sísmica en la subestructura

El efecto de la interacción suelo-estructura se observa en la obtención de la respuesta sísmica en la subestructura, ver sección 4.1.4, donde se presentan las dimensiones de la variable interacción suelo estructura tanto en desplazamientos, giros, fuerzas cortantes, momentos flectores y periodo fundamental (respuestas estructurales).

En los modelos donde se aplica la interacción suelo-estructura (suelo flexible y suelo flexible con columnas de grava), los valores aumentan o disminuyendo respecto al modelo de control referido al modelo con base empotrada como indica Marín (2019) en su estudio desarrollado para puentes con interacción suelo-estructura.

Similar caso, el desempeño estructural se comparó con un modelo conservativo (base empotrada) y dos modelos con suelo flexible y columnas de grava, donde se presenta variación en las curvas de capacidad, ver sección 4.1.4.2.7, espectro de capacidad, ver sección 4.1.4.2.7. Resultando en ratios de desplazamientos diferentes para los modelos planteados tanto longitudinalmente como transversalmente con base empotrado y suelo flexible. No obstante, en el cálculo de los puntos de desempeño para las coordenadas MADRS, sección 4.1.4.2.11, se observa una leve variación tanto en las variables  $S_a$  y  $S_d$  comparadas para los modelos con base empotrada y modelos con suelo flexible, resultando en niveles de vulnerabilidad similares, ver sección 4.1.4.2.12, con pequeñas variaciones por los puntos de desempeño. Finalmente, la hipótesis general planteada se afirma debido a los valores calculados en la presente investigación afecta en la respuesta sísmica.

#### ***4.2.2 Efectos de parámetros geotécnicos del suelo para la obtención de las respuestas estructurales en la subestructura***

El efecto de los parámetros geotécnicos en la subestructura se observa en el incremento o disminución de las respuestas estructurales frente a un modelamiento convencional (empotramiento perfecto), tal como se presenta en la sección 4.1.4.1, de acuerdo a las dimensiones presentadas en la matriz de consistencia. En el caso de los desplazamientos, ver sección 4.1.4.1.1, se observa un aumento tanto longitudinalmente y transversalmente, desde 13.56 mm hasta 22.28 mm, representando un 64%; esto ocurre considerando la cimentación de suelo flexible solo y con columnas de grava. Similar caso,

los giros, ver sección 4.1.4.1.2, aparecen en las cimentaciones con suelo flexible solo y con columna de grava, con valores de 3.64 mm hasta 4.97 mm. Adicionalmente, respecto a las fuerzas estructurales, ver sección 4.1.4.1.3, en fuerzas cortantes en la base de la cimentación, se presenta valores desde 1343.89 kN (empotrado) hasta 1329.02 kN (suelo flexible), en una disminución de 1%; similar caso, para la dirección longitudinal, el aumento se observa entre 4%, esta disminución de fuerza cortante se observa como variación en Huamán (2018), en el caso de dicha investigación el valor de la cortante aumenta en un 10%. Asimismo, los momentos flectores, ver sección 4.1.4.1.4, en el caso del pilar 1 en dirección X, varía desde 6159.76 kN\*m (empotrado) hasta 5911.92 kN\*m (suelo flexible), con una disminución de 4%; mientras en la dirección Y, en el pilar 1, varía desde 3660.68 kN\*m (empotrado) hasta 3676.1 kN\*m (suelo flexible), sin variación presente, considerándose una disminución de demandas por la disipación de energía en el suelo flexible en sentido X. Similar caso, el aumento de momento flector en Huamán (2018) se presenta un aumento de valor, aunque la estructura analizada es una edificación.

Finalmente, en el cálculo del periodo fundamental transversal de la estructura, ver sección 4.1.4.1.5, en un análisis modal espectral, se observa una variación de 0.94 s (empotrado) a 0.95 s (suelo flexible), un aumento de 1%, similar caso, 0.85 s a 0.86 s en sentido longitudinal; es decir, esto se debe por la influencia de la cimentación porque permite la disipación de cierto porcentaje del sismo de diseño presente en la estructura tal como se presenta en Marín (2019) donde se presenta un aumento de periodos fundamentales cuando se considera el aporte del suelo, desde un valor de 0.260 s hasta 0.363 s, mientras la aceleración calculada permanece constante.

### ***4.2.3 Efectos de parámetros geotécnicos del suelo para la obtención del desempeño estructural en la subestructura***

El efecto de los parámetros geotécnicos del suelo en la obtención del desempeño estructural se representa en las curvas de capacidad para los máximo desplazamientos de los pilares antes de colapsar, ver sección 4.1.4.2.6. La máxima capacidad transversalmente obtenida en el modelo de puente con base empotrada es 112 mm, mientras que para el sistema flexible es decir con suelo con rigideces, se obtiene 185mm, esto representa un aumento de 65% respecto a la base empotrada, mientras para la máxima capacidad longitudinalmente con base empotrada es 218 mm. Asimismo, para el sistema de suelo flexible se obtiene 215 mm, representado una disminución de 1%. Estas curvas de capacidad dependen directamente de la las propiedades no lineales de los materiales, cargas aplicadas (gravitacionales), propiedades geométricas de las secciones, el momento curvatura y las rigideces del suelo. Adicionalmente, se observa un aumento de ductilidad en el sentido transversal de 2.57 de una base empotrada al suelo flexible, ocasionado por uso de resortes que representan las rigideces del suelo. A su vez, se calcula las curvas de capacidad para luego se bilinealizadas para la determinación de los niveles de vulnerabilidad de la estructura, ver sección 4.1.4.2.11.

Respecto a los desplazamientos transversales en capacidad se observa para la cimentación empotrada, se obtiene valores de 112 mm en los pilares 1 y 2, mientras que para la cimentación flexible se obtiene valores de 182 mm en los pilares 1 y 2, donde se observa un aumento de la capacidad de 63 % entre base empotrada y suelo flexible para los pilares 1 y 2. De igual manera, las demandas transversales aumentaron tal como se observa en las tablas 24, 26 y 28, para los pilares 1 y 2, ver sección 4.1.4.2.7. Los ratios de desplazamiento transversal oscilan en promedio de 0.15 para la base empotrada,

mientras para la cimentación con base flexible es 0.12, esto representa una disminución de ratios por la disipación de la energía en el suelo.

Respecto a los desplazamientos longitudinales para la curva capacidad se observa que para la cimentación empotrada, se obtiene valores de 218 mm en los pilares 1 y 2, mientras que para la cimentación flexible se obtiene valores de 215 mm en los pilares 1 y 2, donde se observa una disminución de la capacidad de 1.4 % entre base empotrada y suelo flexible para los pilares 1 y 2. De igual manera, las demandas longitudinales aumentaron tal como se observa en las tabla 25, 27 y 29, para los pilares 1 y 2. Los ratios de desplazamiento longitudinal oscilan en promedio de 0.25 para la base empotrada, mientras para la cimentación con base flexible es 0.28, esto representa un aumento de ratios por la disipación de la energía en el suelo, ver sección 4.1.4.2.9.

Similar caso, se procede a calcular el desempeño estructural según la metodología ATC-40, los puntos de desempeño para un amortiguamiento efectivo de 5% en la estructura con base empotrada, mientras en la interacción suelo-estructura se aplica la metodología FEMA-440 (2005), ver sección 4.1.4.2.9 y 4.1.4.2.10. Además de los gráficos característicos de las curvas del espectro de demanda, ver sección 4.1.4.2.9, con las curvas de espectro capacidad, ver sección 4.1.4.2.7. Donde se presenta una leve variación de tanto a nivel longitudinal y transversal en la gráfica debido a la influencia del suelo.

El nivel de vulnerabilidad, ver sección 4.1.4.2.12, de la base empotrada transversalmente es de tipo “moderado a severo”, mientras para el nivel de vulnerabilidad longitudinal es “daño moderado a severo”. Mientras para el suelo flexible se observa de “leve a moderado” en el sentido transversal y “moderado a severo” en el sentido longitudinal. Se observa que el efecto de interacción suelo-estructura varía el nivel de daño presente en la estructura. En consecuencia, de acuerdo a los indicadores presentados

en la operacionalización, el efecto de los parámetros geotécnicos en el desempeño estructural influye en el cálculo de las dimensiones dadas para la variable de las respuestas sísmicas de la subestructura.

#### ***4.2.4 Efectos de las columnas de grava para la obtención de las respuestas estructurales en la subestructura***

El efecto de las columnas de grava en la subestructura se observa en el incremento o disminución de las respuestas estructurales frente a un modelamiento convencional (empotramiento perfecto), tal como se presenta en la sección 4.1.4.1, de acuerdo a las dimensiones presentadas en la matriz de consistencia. En el caso de los desplazamientos, ver sección 4.1.4.1.1, se observa un aumento tanto longitudinalmente y transversalmente, desde 16.44 mm hasta 21.30 mm, representando un 30%; esto ocurre considerando la cimentación de suelo con columnas de grava. Similar caso, los giros en la cimentación con columnas de grava, ver sección 4.1.4.1.2, aparecen en las cimentaciones con suelo flexible solo y con columna de grava, con valores de 2.31 mm hasta 3.35 mm. Este comportamiento se observa en el aumento de desplazamiento tanto transversal como longitudinal en la edificación desarrollada por Jines (2017), en un valor aproximado de 40%.

Adicionalmente, respecto a las fuerzas estructurales, ver sección 4.4.1.3, en fuerzas cortantes en la base de la cimentación, se presenta valores desde 1343.89 kN (empotrado) hasta 1357.97 kN (suelo flexible con columnas de grava), en un incremento de 1%; similar caso, para la dirección longitudinal, el aumento se observa entre 1%, se observa que el incremento es similar a lo indicado Urteaga (2016), donde el suelo no absorbe completamente la fuerza cortante. Asimismo, los momentos flectores, ver sección 4.1.4.1.4, en el caso del pilar 1 en dirección X, varía desde 6159.76 kN\*m (empotrado) hasta 5921.31 kN\*m (suelo flexible con columnas de grava), con una

disminución de 4%; mientras en la dirección Y, en el pilar 1, varía desde 3660.68 kN\*m (empotrado) hasta 3671.21 kN\*m (suelo flexible con columnas de grava), con un aumento de 1%, considerándose una variación de demandas por la disipación de energía en el suelo flexible. Este efecto, también, se observa en la investigación de Jines (2017), donde la reducción de momento flectores en un 78% aproximadamente.

Finalmente, en el cálculo del periodo longitudinal del primer modo, ver sección 4.1.4.1.5, de la estructura en un análisis modal espectral, se observa una variación de 0.94 s (empotrado) a 0.95 s (suelo flexible con columnas de grava), un aumento de 1%, es decir, esto se debe por la influencia de la cimentación con columnas de grava porque permite la disipación de cierto porcentaje del sismo de diseño presente en la estructura, generando un sistema de mayor flexibilidad tal como lo presentado por Jines (2017), donde se observa un aumento aproximado de 36% en el periodo fundamental.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

### Conclusiones

La interacción suelo-estructura afecta en la obtención de la respuesta sísmica en la subestructura columnas de grava a través del modelamiento numérico del puente en la avenida Sánchez Cerro, esto se observa en el aumento y disminución de las respuestas sísmicas tanto respuestas estructurales como desempeño estructural. Esto conlleva a la optimización de elementos estructurales y la verificación de la estructura frente a eventos sísmicos de acuerdo a las demandas obtenidas por la presencia del suelo mejorado.

Los parámetros geotécnicos del suelo (propiedades constitutivas y rigideces del suelo) afectan en la obtención de las respuestas estructurales en la subestructura a través del modelamiento numérico del puente en la avenida Sánchez Cerro. Así, por ejemplo, se observa aumento de los desplazamientos transversales y longitudinales, una disminución de la fuerza cortante en la base, aumento de momentos flectores y aumento de periodos fundamentales en la estructura.

Los parámetros geotécnicos del suelo afectan (propiedades constitutivas y rigideces del suelo) en la obtención del desempeño estructural en la subestructura a través del modelamiento numérico del puente en la avenida Sánchez Cerro. De igual manera, se observa un aumento de desplazamiento último por Pushover en la subestructura, variación de los puntos de desempeño frente a un sistema sin interacción suelo-estructura y la variación de los niveles de desempeño.

Los parámetros de las columnas de grava (propiedades constitutivas y geometría) afectan en la obtención de las respuestas estructurales en la subestructura a través del modelamiento numérico del puente en la avenida Sánchez Cerro. Esto se presenta en el aumento de desplazamiento longitudinal y transversal, variación de la fuerza cortante, variación de los momentos flectores y aumento de los periodos fundamentales.

## **Recomendaciones**

Se recomienda futuras investigaciones respecto a la interacción suelo-estructura en puentes de diferentes tipos, así, por ejemplo, puentes integrales, puentes atirantados, puentes en arcos y otros, con diferentes tipos de cimentaciones entre superficiales, profundas y especiales. El efecto de la interacción debe ser estudiado de manera conjunta, aplicando modelos matemáticos geotécnicos y estructurales en 2D y 3D, que consideran las propiedades y geometrías reales de la cimentación y el suelo. Adicionalmente, se debe estudiar mediante análisis no lineal para simular un comportamiento real de la estructura.

Se recomienda realizar ensayos in-situ después de la ejecución, si se aplica mejoramiento de suelos no convencionales tales como columnas de grava, jet grouting, inclusiones rígidas y otros. Estos ensayos permitirán la caracterización del suelo y la cimentación, permitiendo una mejor calibración de los modelos geotécnicos.

Se recomienda la difusión y uso de la interacción suelo estructuras en otros tipos de suelos, debido a que la consideración de apoyos empotrados perfectamente puede afectar el diseño de los elementos estructurales frente a eventos sísmicos. Por tanto, se debe tener normativas y reglamentos que indiquen lineamientos al menos por el tipo de estructura y el tipo de suelo para predecir un comportamiento más realista.

La investigación realizada tomó como muestra el puente de la avenida Sánchez Cerro, no obstante, el desarrollo puede ser tomado como referencia para la verificación de otros tipos de estructuras como edificaciones, obras civiles, porque al ser elementos apoyados en suelo, existe la interacción suelo-estructura. A su vez, se sugiere realizar ensayos a escala real o por prototipos para calibrar el comportamiento del suelo y de los elementos estructurales.

## 6. Referencias bibliográficas

- AASHTO (2011). *AASHTO Guide Specifications for LRFD Seismic Bridge Design*.
- ATC. (1996). *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*. Applied Technology Council. ATC 40.
- ATC. (2005). *Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures*. Applied Technology Council. FEMA 440.
- Avilés, J., & Pérez Rocha, L. (2004). *Bases para las nuevas disposiciones reglamentarias sobre interacción dinámica suelo-estructura*. Revista de Ingeniería Sísmica, (71), 1-36.
- Aziz Hussein, Y. & Jianlin Ma (2012), *Experimental and Therotical Static Anlysis of High-Speed Railway Bridge Settlement for Deep Soft Soil*, The Open and Building Technology Journal, 6, 17-31.
- Carrillo, J. (2008). *Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de estructuras utilizando un diseño por desempeño*. Dyna, 75(155), 91-102.
- Carvajal Diaz, E., & Mora-Rey, C. (2014). *Columnas de grava mediante vibro-sustitución: evolución tecnológica, diseño y casos prácticos*.
- Castro González, J. (2008), *Análisis teórico de la consolidación y deformación alrededor de columnas de grava*, Tesis Doctoral.
- Castro González, J. (2014), *Numerical Modelling of Stone columns beneath a rigid footing*, Group of Geotechnical Engineering, Department of Ground Engineering and Materials Scienca, University of Cantabria.
- Castro, J., Sagaseta, C., Cañizal, J., & Da Costa, A. (2016, October). *Modelización de columnas de grava*. In Proceedings of the 10º Simposio Nacional de Ingeniería Geotécnica, La Coruña, Spain (pp. 19-21).
- Cervera Ruíz, M. & Blanco Díaz, E. (2015). *Resistencia de Materiales*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería.
- Céspedes Reynaga, H. (2019). *Respuesta sísmica no lineal de puentes de concreto armado para la obtención y control de desplazamientos*. Universidad Ricardo Palma.
- Chen, W. F., & Duan, L. (Eds.). (2014). *Bridge engineering handbook: seismic design*. CRC press.
- Chopra, A. K. (1995). *Dynamics of structures theory. Theory and applications to earthquake engineering*, vol 4.
- Condori, B. (2016). *El contenido de humedad en la simulación del comportamiento elastoplástico de los suelos, Huancayo en el año 2016*. Tesis doctoral.

- Das, B., (2013). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Cengage Learning.
- Dobry, R., & Gazetas, G. (1986). *Dynamic response of arbitrarily shaped foundations*. *Journal of geotechnical engineering*, 112(2), 109-135.
- Felippa, C. A. (2004). *Introduction to finite element methods*. University of Colorado, 885.
- FEMA (4 de enero de 2021). *History of FEMA*. <https://www.fema.gov/about/history>
- FEMA. (2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. FEMA 356
- Fernández Diéguez, L. (2015). *Licuefacción de los suelos generada por sismos de gran magnitud: Caso de estudio Caimanera y Santiago de Cuba* (Doctoral dissertation, Tesis presentada en opción al título académico de Máster en Geología. Mención geotecnia e hidrogeología).
- Fernández, M. V., & Pérez, E. L. (2001). *El método de los elementos finitos aplicado al análisis estructural*. Noela.
- Ghobarah, A. (2001). *Performance-based design in earthquake engineering: state of development*. *Engineering structures*, 23(8), 878-884.
- Gómez Soberón, M. C., Barbat Barbat, H. A., & Oller Martínez, S. H. (2000). *Vulnerabilidad de puentes de autopista: un estado del arte*. Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE).
- Gueguin, M., Hassen, G., de Buhan, P. (2015). *Stability analysis of homogenized stone column reinforced foundations using a numerical yield design approach*. *Computers and Geotechnics* 64, 10-19.
- Huamán Mendoza, G. C. (2018). *Respuesta Dinámica Por Los Modelos De Cálculo De Interacción Suelo Estructura Del Fema Y Norma E030-2016 Del Edificio De Comando De Control Ribereño-Iquitos*.
- Hernandez Sampieri, R. (2016), *Metodología de la Investigación*, México D.F., México: McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES S. A. DE C. V.
- Instituto Geofísico del Perú (s.f.). *Glosario*. Recuperado el 30 de setiembre del 2021 de <https://ultimosismo.igp.gob.pe/glosario>
- Jines Cabezas, R. M. (2017). *Interacción Sísmica Suelo-Estructura en Edificaciones de Sistema Dual en la Ciudad de Moquegua*.
- Kausel, E. (2010). *Early history of soil–structure interaction*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(9), 822-832. Research Center, 7.

- Kuroiwa, J. (2012), *Reducción de desastres, Vivienda en armonía con la naturaleza*, Lima, Perú: Bruño.
- Marín Guillén, F. (2019). *Influencia de la interacción suelo-estructura en el desempeño estructural de puentes continuos de concreto armado sometidos a la acción de cargas sísmicas en suelos arenosos*. Tesis de maestría.
- Marsh, M. L., Buckle, I. G., & Kavazanjian Jr, E. (2014). *LRFD seismic analysis and design of bridges reference manual: NHI course No. 130093 and 130093A (No. FHWA-NHI-15-004)*.
- Marte Jiménez, C. J. (2014). *Calibración de umbrales de daño sísmico para el análisis de fragilidad sísmica de estructuras de hormigón armado mediante análisis estático no lineal (" Push-Over")* (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Milutinovic, Z. y Trendafiloski (2003). *WP4 Vulnerability of current buildings*.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2018). *Norma técnica E.050 suelos y cimentaciones*.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2019). *Norma técnica E.030 Diseño sismorresistente*.
- Mylonakis, G., Nikolaou, S., & Gazetas, G. (2006). *Footings under seismic loading: Analysis and design issues with emphasis on bridge foundations*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 26(9), 824–853. doi:10.1016/j.soildyn.2005.12.005
- Noura, N., & Kadhija B., & Latifa Q., & Lahcen B. (2016), *Three-dimensional modeling of a group of Stone columns in "Bouregreg Valley" soft ground*, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 11, 24, 14537-14544.
- Plaxis vb (2019). *PLAXIS 2D Tutorial Manual CONNECT Edition V20*. Bentley.
- Priebe, H. (1995). *Design of vibro replacement*. Ground Engineering 28(10), 31-37.
- Priestley, M. N., Seible, F., & Calvi, G. M. (1996). *Seismic design and retrofit of bridges*. John Wiley & Sons.
- Región Piura (2017). *Proyecto "Mejoramiento de la avenida Sánchez Cerro, tramo avenida Gullman - avenida Chulucanas, Piura-Piura"*.
- Sansiya, M. T. S. N., & Dashore, S. (2021). *Structural Behavior of Concrete Bridge with Soil-Structure Interaction*.
- SEAOC. Vision 2000 (1995), *Performance based seismic engineering of buildings, vols. I and II: Conceptual framework*. Sacramento
- SEMINAR, C. (1997). *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 273)*.

Urteaga Loayza, W. M. (2019). *Nivel de desempeño sísmico del edificio N° 01 de la institución educativa San Ramón (anexo Chontapaccha) considerando la interacción suelo estructura.*

Vargas Bejarano, C. I. (2017). *Evaluación del desempeño sísmico de puentes continuos.*

Yauri, S. (2017). *Escenario sísmico para Lima Metropolitana y Callao: Sismo 8.8 Mw. INDECI–DIPRE: Lima.*

## **7. Anexos**

## Anexo A

## FORMATO 4.3: Declaración de autenticidad y no plagio

	Universidad Ricardo Palma	Escuela de Posgrado
<b>DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y NO PLAGIO</b>		
DECLARACIÓN DEL GRADUANDO		
Por el presente, el graduando: (Apellidos y nombres)		
ROCIO MALDONADO, YORDAN ALBERTO		
en condición de egresado del Programa de Posgrado:		
MAESTRÍA EN INGENIERÍA VIAL CON MENCIÓN EN CARRETERAS, PUENTES Y TÚNELES		
deja constancia que ha elaborado la tesis intitulada:		
INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA PARA LA OBTENCIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE LA SUBESTRUCTURA CON COLUMNAS DE GRAVA DEL PUENTE SANCHEZ CERRO, PIURA		
Declara que el presente trabajo de tesis ha sido elaborado por el mismo y no existe plagio/copia de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por cualquier persona natural o jurídica ante cualquier institución académica, de investigación, profesional o similar.		
Deja constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no ha asumido como suyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o de la Internet.		
Asimismo, ratifica que es plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asume la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento y es consciente de las connotaciones éticas y legales involucradas.		
En caso de incumplimiento de esta declaración, el graduando se somete a lo dispuesto en las normas de la Universidad Ricardo Palma y los dispositivos legales vigentes.		
 Firma del graduando	19/09/2021 Fecha	

**Anexo B****DECLARACIÓN DE ACCESO A LA INFORMACIÓN****Por el presente motivo:**

Yo, Yordan Alberto Rocio Maldonado con DNI 47580499, egresado del programa de posgrado Maestría en Ingeniería Vial con mención en carreteras, puentes y túneles de la Universidad Ricardo Palma, doy fe que tengo acceso a la información requerida para el desarrollo de la tesis titulada: **Interacción suelo-estructura para la obtención de la respuesta sísmica de la subestructura con columnas de grava del puente Sánchez Cerro, Piura.**

Lima, 19 de setiembre del 2021



Yordan Alberto Rocio Maldonado  
DNI: 47580499

## Anexo C

### Matriz de consistencia interna de la investigación

**Interacción suelo-estructura para la obtención de la respuesta sísmica de la subestructura con columnas de grava del puente en la avenida Sánchez Cerro, Piura.**

<b>Problema principal</b>	<b>Objetivos generales</b>	<b>Hipótesis general</b>	<b>Variables independientes</b>	<b>Metodología</b>
¿En qué medida la interacción suelo-estructura afecta la obtención de la respuesta sísmica en la subestructura con columnas de grava a través del modelamiento numérico del puente en la avenida Sánchez Cerro?	Determinar los efectos de la interacción suelo-estructura para la obtención de la respuesta sísmica en la subestructura con columnas de grava a través del modelamiento numérico del puente en la avenida Sánchez Cerro.	La interacción suelo-estructura afecta en la obtención de la respuesta sísmica en la subestructura columnas de grava a través del modelamiento numérico del puente en la avenida Sánchez Cerro.	<p>Interacción suelo-estructura.</p> <p><b>Dimensiones:</b> Parámetros geotécnicos del suelo</p> <p>Parámetros geométricos y mecánicos del puente</p> <p>Parámetros de las columnas de grava</p>	<p><b>Método de la investigación</b> Analítico</p> <p><b>Enfoque</b> Cuantitativo</p> <p><b>Tipo</b> Aplicada</p> <p><b>Recolección de datos</b> Retrospectiva</p> <p><b>Nivel de Investigación</b> Descriptivo Correlacional</p> <p><b>Diseño de investigación</b> No experimental Transversal Prospectivo</p>
<b>Problemas específicos</b>	<b>Objetivos específicos</b>	<b>Hipótesis específicas</b>	<b>Variables dependientes</b>	
¿En qué medida los parámetros geotécnicos	Determinar los efectos de los parámetros	Los parámetros geotécnicos del suelo		

del suelo afectan en la obtención de las respuestas estructurales en la subestructura a través del modelamiento numérico del puente en la avenida Sánchez Cerro?	geotécnicos del suelo para la obtención de las respuestas estructurales en la subestructura a través del modelamiento numérico del puente en la avenida Sánchez Cerro.	afectan en la obtención de las respuestas estructurales en la subestructura a través del modelamiento numérico del puente en la avenida Sánchez Cerro.	
¿Se piensa que los parámetros geotécnicos del suelo afectan en la obtención del desempeño estructural en la subestructura a través del modelamiento numérico del puente en la avenida Sánchez Cerro?	Determinar los efectos de los parámetros geotécnicos del suelo para la obtención del desempeño estructural en la subestructura a través del modelamiento numérico del puente en la avenida Sánchez Cerro.	Los parámetros geotécnicos del suelo afectan en la obtención del desempeño estructural en la subestructura a través del modelamiento numérico del puente en la avenida Sánchez Cerro.	Respuestas sísmicas de la subestructura  <b>Dimensiones:</b>  Desempeño estructural  Respuestas estructurales
¿Se piensa que los parámetros de las columnas de grava afectan la obtención de las respuestas en la subestructura a través del modelamiento numérico del puente en la avenida Sánchez Cerro?	Determinar los efectos de los parámetros de las columnas de grava para la obtención de las respuestas estructurales en la subestructura a través del modelamiento numérico del puente en la avenida Sánchez Cerro.	Los parámetros de las columnas de grava afectan en la obtención de las respuestas estructurales en la subestructura a través del modelamiento numérico del puente en la avenida Sánchez Cerro.	

## Anexo C-2

## Matriz de operacionalización

<b>Variables Independientes</b>	<b>Definición conceptual</b>	<b>Definición operacional</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Instrumento</b>
<b>Interacción suelo-estructura</b>	"La interacción dinámica suelo estructura consiste en un conjunto de efectos cinemáticos e inerciales producidos en la estructura y el suelo como resultado de la deformabilidad de este ante excitación sísmica" (Avilés & Rocha, 2004)	Consiste en diseñar una estructura en función a una determinada rigidez de suelo, ésta puede infinitamente rígido o considerando el aporte del suelo de acuerdo a las propiedades constitutivas del suelo, tanto como rigideces verticales, horizontales y rotacionales para determinar las respuestas de las estructuras.	Parámetros geotécnicos del suelo  Parámetros geométricos y mecánicos del puente  Parámetros de las columnas de grava	Propiedades constitutivas Rigideces del suelo  Geometría Materiales  Propiedades constitutivas. Geometría.	Fichas descriptivas de datos  Guía de observación  Programas de software computacional: Plaxis v20 Mathcad v15
<b>Variable dependiente</b>	<b>Definición conceptual</b>	<b>Definición operacional</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Instrumento</b>
<b>Respuesta sísmica de la subestructura de un puente</b>	"Se define como el comportamiento que tiene una estructura durante un evento sísmico, depende de parámetros como: tipo de análisis, tipo de suelo, parámetros geométricos de la estructura y otros" (Céspedes, 2019)	Respuestas máximas estudiadas para el diseño sísmico de estructuras, estos registros son de acuerdo a un estudio previo de acuerdo a data real que presenta el proyecto.	Desempeño estructural  Respuestas estructurales	Diagrama de curva capacidad Periodo fundamental Desplazamiento objetivo Punto de desempeño Nivel de vulnerabilidad Desplazamientos Fuerzas cortantes Momentos Flectores Giros Periodo fundamental	Guía de observación  Programas de software computacional: C.S.I Bridge v20.02 Mathcad v15 SAP2000 v14 Excel 2016

## Anexo D

### INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

#### FICHA DE RECOPIACIÓN DE DATOS PARA PARÁMETROS

**Objetivo:** Identificar y medir los parámetros iniciales para determinar los efectos de la interacción suelo-estructura.

---

#### **PARÁMETROS DEL PUENTE**

---

##### **I.- IDENTIFICACION Y UBICACIÓN**

---

Nombre

Departamento Vial

Provincia

Distrito

---

##### **II.- DATOS GENERALES**

---

Puente sobre

Nombre

Longitud total

Ancho calzada

Ancho vereda

Altura libre superior

Altura libre inferior

Núm. vías de tránsito

Sobrecarga diseño

Alineamiento

---

##### **III.- TRAMOS**

---

Número de tramo

Tramos

Longitud Total

Longitud 1ª Tramo

Luz Principal

Longitud 2ª Tramo

Luz Principal

Longitud 3ª Tramo

Luz Principal

---

##### **III.A.- TRAMO 1**

##### **III.B.- TRAMO 2**

Categoría / Tipo

Categoría / Tipo

Características

Características

Secundarias

Secundarias

Condición de borde

Condición de  
borde

Material predominante

Material  
predominante

---

##### **III.C.- TRAMO 3**

---

Categoría / Tipo

Características

Secundarias

Condición de borde

Material predominante

---

**IV.- SUBESTRUCTURA**

---

***IV.A- ESTRIBO IZQUIERDO***

---

**ELEVACIÓN**

Tipo

Material

**CIMENTACIÓN**

Tipo

Material

---

***IV.B- ESTRIBO DERECHO***

---

**ELEVACIÓN**

Tipo

Material

**CIMENTACIÓN**

Tipo

Material

---

**V.- PILARES**

---

***V.A- PILAR 1***

---

**ELEVACIÓN**

Tipo

Material

**CIMENTACIÓN**

Tipo

Material

---

***V.B- PILAR 2***

---

**ELEVACIÓN**

Tipo

Material

**CIMENTACIÓN**

Tipo

Material

---

**VI.- APOYOS**

---

***APOYO 1***

---

Tipo

Material

Ubicación

Número

---

***APOYO 2***

---

Tipo

Material

Ubicación

Número

---

***APOYO 3***

---

Tipo

Material

Ubicación

Número

***APOYO 4***

---

Tipo

Material

Ubicación

Número

---

**I.- PARÁMETROS DEL SUELO**


---

***I.A- ESTRATO 1***

Tipo de Suelo  
 Profundidad estrato  
 Ángulo de fricción  
 interna  
 Cohesión  
 Peso específico  
 Coeficiente de  
 Poisson

***I.C- ESTRATO 3***

Tipo de Suelo  
 Profundidad estrato  
 Ángulo de fricción  
 interna  
 Cohesión  
 Peso específico  
 Coeficiente de Poisson

***I.B- ESTRATO 2***

Tipo de Suelo  
 Profundidad estrato  
 Ángulo de fricción  
 interna  
 Cohesión  
 Peso específico  
 Coeficiente de  
 Poisson

---

**II.- CAMPAÑA GEOTÉCNICA UBICACIÓN**


---

***II.A ESTRIBO 1***

Investigación  
 Investigaciones  
 realizadas  
 Licuefacción  
 Espesor licuable a  
 partir de terreno  
 natural

***II.B PILA 1***

Investigación  
 Investigaciones  
 realizadas  
 Licuefacción  
 Espesor licuable a  
 partir de terreno  
 natural

***II.C PILA 2***

Investigación  
 Investigaciones  
 realizadas  
 Licuefacción  
 Espesor licuable a  
 partir de terreno  
 natural

***II.D ESTRIBO 2***

Investigación  
 Investigaciones  
 realizadas  
 Licuefacción  
 Espesor licuable a  
 partir de terreno  
 natural

---

**III. CAMPAÑA GEOTÉCNICA ANDDES 2016 (INVESTIGACIONES DE CAMPO Y DE LABORATORIO)**


---

Sondaje SPT  
 Análisis  
 granulométrico por  
 tamizado  
 Límites de Atterberg  
 Gravedad Específica  
 de sólidos

Ensayo de compresión  
 triaxial  
 Ensayo de corte directo  
 Perfil MASW  
 Perfil MAM

Densidad mínima,  
máxima y relativa

---

**IV.- PARÁMETROS ELÁSTICOS EN APOYO (PILA 1, PILA 2 Y ESTRIBO 2)**

---

***IV.A- 2 a 5 m***

Módulo de  
deformación Estático

Módulo de  
deformación

Dinámico

***IV.C- 13 a 20 m***

Módulo de  
deformación Estático

Módulo de  
deformación Dinámico

---

***IV.B- 5 a 13 m***

Módulo de  
deformación Estático

Módulo de  
deformación

Dinámico

---

***IV.D- 20 a 30 m***

Módulo de  
deformación Estático

Módulo de  
deformación Dinámico

---

**V.- PARÁMETROS ELÁSTICOS EN APOYO (ESTRIBO 1)**

---

***V.A- 2 a 4 m***

Módulo de  
deformación Estático

Módulo de  
deformación

Dinámico

***V.C- 11 a 19 m***

Módulo de  
deformación Estático

Módulo de  
deformación Dinámico

---

***V.B- 4 a 11 m***

Módulo de  
deformación Estático

Módulo de  
deformación

Dinámico

---

***V.D- 19 a 30 m***

Módulo de  
deformación Estático

Módulo de  
deformación Dinámico

---

**I.- PARÁMETROS DE LA COLUMNA DE GRAVA**

---

***I.A- PILAR 1***

---

Diámetro

Espaciamiento

Longitud

Razón de sustitución

Peso específico

Ángulo de rozamiento

Cohesión

Factor de mejora

Módulo de deformación Estático

---

***I.B- PILAR 2***

---

Diámetro

Espaciamiento

Longitud

Razón de sustitución

Peso específico

Ángulo de rozamiento

Cohesión

Factor de mejora

Módulo de deformación Estático

---

***I.C- ESTRIBO 2***

---

Diámetro

Espaciamiento

Longitud

Razón de sustitución

Peso específico

Ángulo de rozamiento

Cohesión

Factor de mejora

Módulo de deformación Estático

## Anexo E

## INSTRUMENTOS DE RESULTADOS

## GUÍA DE OBSERVACIÓN PARA LOS RESULTADOS A TRAVÉS DEL SOFTWARE PLAXIS V20

**Objetivo:** Medir los resultados obtenidos de los parámetros geotécnicos de la interacción suelo estructura.

Dimensiones	Indicadores	Ítems	
		Cimentación flexible	Cimentación flexible con columnas de grava
<b>Parámetros geotécnicos del suelo</b>	1. Rigidez traslacional en dirección "z"		
	2. Rigidez traslacional en dirección "x"		
	3. Rigidez traslacional en dirección "y"		
	4. Rigidez rotacional en dirección "x"		
	5. Rigidez rotacional en dirección "y"		

## GUÍA DE OBSERVACIÓN PARA LOS RESULTADOS A TRAVÉS DEL SOFTWARE CSI BRIDGE V22.0.0

**Objetivo:** Medir los resultados obtenidos en las respuestas sísmicas de la subestructura considerando el efecto de la interacción suelo-estructura.

Dimensiones	Indicadores	Ítems		
		Base empotrada	Suelo flexible	Suelo flexible con columnas de grava
<b>Respuestas estructurales</b>	1. Desplazamiento transversal de la estructura por sismo			
	2. Desplazamiento longitudinal de la estructura por sismo			
	3. Desplazamiento vertical de la estructura			
	4. Giros transversales en base			
	5. Giros longitudinales en base			
	6. Fuerzas cortantes en la base			
	7. Momentos flectores en la base			
	8. Periodo fundamental			
<b>Desempeño estructural</b>	9. Diagrama de curva capacidad del puente transversal			
	10. Diagrama de curva capacidad del puente longitudinal			
	11. Desplazamiento objetivo transversal			
	12. Desplazamiento objetivo longitudinal			
	13. Punto de desempeño			
	14. Nivel de vulnerabilidad			

## Anexo F

## TABLAS DE CONFIABILIDAD Y VALIDEZ

Por lo expuesto, en función a la información del instrumento, se le solicita evaluar cada uno de los ítems bajo los siguientes criterios:

<sup>1</sup>**Pertinencia:** El ítem corresponde al concepto teórico formulado.

<sup>2</sup>**Relevancia:** El ítem es apropiado para representar al componente o dimensión específica del constructo

<sup>3</sup>**Claridad:** Se entiende sin dificultad alguna el enunciado del ítem, es conciso, exacto y directo

Para ello, asigne un puntaje de 1 a 5 a cada evaluación que realice de los ítems, donde 1 equivale a un mínimo del criterio y 5 a un máximo.

Dimensiones	Indicadores	Ítems		Pertinencia <sup>1</sup>	Relevancia <sup>2</sup>	Construcción gramatical <sup>3</sup>	Observaciones	Sugerencias
		Cimentación flexible	Cimentación flexible con columnas de grava					
Parámetros geotécnicos del suelo	1. Rigidez traslacional en dirección "z"			1-5	1-5	1-5		
	2. Rigidez traslacional en dirección "x"			5	5	5		
	3. Rigidez traslacional en dirección "y"			5	5	5		
	4. Rigidez rotacional en dirección "x"			5	5	5		
	5. Rigidez rotacional en dirección "y"			5	5	5		

Por lo expuesto, en función a la información del instrumento, se le solicita evaluar cada uno de los ítems bajo los siguientes criterios:

<sup>1</sup>**Pertinencia:** El ítem corresponde al concepto teórico formulado.

<sup>2</sup>**Relevancia:** El ítem es apropiado para representar al componente o dimensión específica del constructo

<sup>3</sup>**Claridad:** Se entiende sin dificultad alguna el enunciado del ítem, es conciso, exacto y directo

Para ello, asigne un puntaje de 1 a 5 a cada evaluación que realice de los ítems, donde 1 equivale a un mínimo del criterio y 5 a un máximo.

Dimensiones	Indicadores	Ítems			Pertinencia <sup>1</sup>	Relevancia <sup>2</sup>	Construcción gramatical <sup>3</sup>	Observaciones	Sugerencias
		Base empotrada	Suelo flexible	Suelo flexible con columnas de grava					
Respuestas estructurales	1. Desplazamiento transversal de la estructura por sismo				1-5	1-5	1-5		
	2. Desplazamiento longitudinal de la estructura por sismo				5	5	5		
	3. Desplazamiento vertical de la estructura				5	5	5		
	4. Giros transversales en base				5	5	5		

Desempeño estructural	5. Giros longitudinales en base							5	5	5		
	6. Fuerzas cortantes en la base							5	5	5		
	7. Momentos flectores en la base							5	5	5		
	8. Periodo fundamental							5	5	5		
	9. Diagrama de curva capacidad del puente transversal							5	5	5		
	10. Diagrama de curva capacidad del puente longitudinal							5	5	5		
	11. Desplazamiento o objetivo transversal							5	5	5		
	12. Desplazamiento o objetivo longitudinal							5	5	5		
	13. Punto de desempeño							5	5	5		
	14. Nivel de vulnerabilidad							5	5	5		

**OPINIÓN DE APLICABILIDAD DE LAS GUÍAS DE OBSERVACIÓN:**

Observaciones (precisar si hay suficiencia): ..... *SUFICIENTE* .....

Opinión de aplicabilidad:    Aplicable     No aplicable     Aplicable después de corregir     No aplicable

Nombres y Apellidos	<i>Aerts Juan De la Cruz Toro Rojas</i>	DNI N°	<i>28293292</i>
Dirección domiciliaria	<i>Au. 29 de Julio 1044 piso 5</i>	Teléfono / Celular	<i>996299960</i>
Título profesional / Especialidad	<i>Ingeniero Civil - Estructuras</i>	Firma	<i>[Firma]</i>
Grado Académico	<i>Magister en Ciencias - Maestría Estructuras</i>	Lugar y fecha	<i>Miraflores / 01-12-2011</i>
Metodólogo/ temático			

**Nota:** Suficiencia, se dice suficiencia cuando los ítems planteados son suficientes para medir la dimensión

Por lo expuesto, en función a la información del instrumento, se le solicita evaluar cada uno de los ítems bajo los siguientes criterios:

<sup>1</sup>**Pertinencia:** El ítem corresponde al concepto teórico formulado.

<sup>2</sup>**Relevancia:** El ítem es apropiado para representar al componente o dimensión específica del constructo

<sup>3</sup>**Claridad:** Se entiende sin dificultad alguna el enunciado del ítem, es conciso, exacto y directo

Para ello, asigne un puntaje de 1 a 5 a cada evaluación que realice de los ítems, donde 1 equivale a un mínimo del criterio y 5 a un máximo.

Dimensiones	Indicadores	Ítems		Pertinencia <sup>1</sup>	Relevancia <sup>2</sup>	Construcción gramatical <sup>3</sup>	Observaciones	Sugerencias
		Cimentación flexible	Cimentación flexible con columnas de grava					
<b>Parámetros geotécnicos del suelo</b>	1. Rigidez traslacional en dirección "z"			1-5 ✓	1-5 ✓	1-5 ✓		
	2. Rigidez traslacional en dirección "x"			✓	✓	✓		
	3. Rigidez traslacional en dirección "y"			✓	✓	✓		
	4. Rigidez rotacional en dirección "x"			✓	✓	✓		
	5. Rigidez rotacional en dirección "y"			✓	✓	✓		

Por lo expuesto, en función a la información del instrumento, se le solicita evaluar cada uno de los ítems bajo los siguientes criterios:

<sup>1</sup>**Pertinencia:** El ítem corresponde al concepto teórico formulado.

<sup>2</sup>**Relevancia:** El ítem es apropiado para representar al componente o dimensión específica del constructo

<sup>3</sup>**Claridad:** Se entiende sin dificultad alguna el enunciado del ítem, es conciso, exacto y directo

Para ello, asigne un puntaje de 1 a 5 a cada evaluación que realice de los ítems, donde 1 equivale a un mínimo del criterio y 5 a un máximo.

Dimensiones	Indicadores	Ítems			Pertinencia <sub>1</sub>	Relevancia <sub>2</sub>	Construcción gramatical <sup>3</sup>	Observaciones	Sugerencias
		Base empotrada	Suelo flexible	Suelo flexible con columnas de grava					
Respuestas estructurales	1. Desplazamiento o transversal de la estructura por sismo				1-5	1-5	1-5		
	2. Desplazamiento o longitudinal de la estructura por sismo				✓	✓	✓		
	3. Desplazamiento o vertical de la estructura				✓	✓	✓		
	4. Giros transversales en base				✓	✓	✓		



**OPINIÓN DE APLICABILIDAD DE LAS GUÍAS DE OBSERVACIÓN:**

Observaciones (precisar si hay suficiencia): ..... *SUFICIENCIA* .....

Opinión de aplicabilidad:      **Aplicable**       **Aplicable después de corregir**       **No aplicable**

Nombres y Apellidos	<i>ROQUE ALBERTO SÁNCHEZ HEZA</i>	DNI Nº	<i>09598939</i>
Dirección domiciliaria	<i>AV. 28 DE JULIO 1044 - MIRAFLORES</i>	Teléfono / Celular	<i>985538768</i>
Título profesional / Especialidad	<i>INGENIERO CIVIL ESTRUCTURAS</i>	Firma	<i>[Firma manuscrita]</i>
Grado Académico	<i>DOCTOR EN INGENIERÍA</i>	Lugar y fecha	<i>MIRAFLORES, 03/12/21</i>
Metodólogo/ temático			

**Nota:** Suficiencia, se dice suficiencia cuando los ítems planteados son suficientes para medir la dimensión

Por lo expuesto, en función a la información del instrumento, se le solicita evaluar cada uno de los ítems bajo los siguientes criterios:

<sup>1</sup>**Pertinencia:** El ítem corresponde al concepto teórico formulado.

<sup>2</sup>**Relevancia:** El ítem es apropiado para representar al componente o dimensión específica del constructo

<sup>3</sup>**Claridad:** Se entiende sin dificultad alguna el enunciado del ítem, es conciso, exacto y directo

Para ello, asigne un puntaje de 1 a 5 a cada evaluación que realice de los ítems, donde 1 equivale a un mínimo del criterio y 5 a un máximo.

Dimensiones	Indicadores	Ítems		Pertinencia <sup>1</sup>	Relevancia <sup>2</sup>	Construcción gramatical <sup>3</sup>	Observaciones	Sugerencias
		Cimentación flexible	Cimentación flexible con columnas de grava					
Parámetros geotécnicos del suelo	1. Rigidez traslacional en dirección "z"			1-5	1-5	1-5		
	2. Rigidez traslacional en dirección "x"			5	4	5	-	-
	3. Rigidez traslacional en dirección "y"			5	5	5	-	-
	4. Rigidez rotacional en dirección "x"			5	4	5	-	-
	5. Rigidez rotacional en dirección "y"			5	4	5	-	-

Por lo expuesto, en función a la información del instrumento, se le solicita evaluar cada uno de los ítems bajo los siguientes criterios:

<sup>1</sup>**Pertinencia:** El ítem corresponde al concepto teórico formulado.

<sup>2</sup>**Relevancia:** El ítem es apropiado para representar al componente o dimensión específica del constructo

<sup>3</sup>**Claridad:** Se entiende sin dificultad alguna el enunciado del ítem, es conciso, exacto y directo

Para ello, asigne un puntaje de 1 a 5 a cada evaluación que realice de los ítems, donde 1 equivale a un mínimo del criterio y 5 a un máximo.

Dimensiones	Indicadores	Ítems			Pertinencia <sup>1</sup>	Relevancia <sup>2</sup>	Construcción gramaticales	Observaciones	Sugerencias
		Base empotrada	Suelo flexible	Suelo flexible con columnas de grava					
Respuestas estructurales	1. Desplazamiento transversal de la estructura por sismo				5	5	4	-	Indicar dónde se va a medir el desplazamiento (super o subestructura).
	2. Desplazamiento longitudinal de la estructura por sismo				5	5	4	-	-
	3. Desplazamiento vertical de la estructura				5	5	4	-	-
	4. Giros transversales en base				5	5	5	-	-





**OPINIÓN DE APLICABILIDAD DE LAS GUÍAS DE OBSERVACIÓN:**

Observaciones (precisar si hay suficiencia): Suficiencia

Opinión de aplicabilidad:    **Aplicable** [ X ]    **Aplicable después de corregir** [ ]    **No aplicable** [ ]

Nombres y Apellidos	Luciano Jhair Yacila Alvarado	DNI N°	71774955
Dirección domiciliaria	Jr. Manuel Vargas 417	Teléfono / Celular	949230855
Título profesional / Especialidad	Ingeniero Civil / Especialista en Estructuras	Firma	
Grado Académico	Magíster en Ingeniería Civil	Lugar y fecha	Lima, 30 de Noviembre del 2021
Metodólogo/ temático	-		

**Nota:** Suficiencia, se dice suficiencia cuando los ítems planteados son suficientes para medir la dimensión

## Anexo G

### MÉTODO FEMA 440- INTERACCIÓN SUELO ESTRUCTURA

A continuación, se presenta el cálculo de los factores de reajuste por efectos cinemáticos y de amortiguamiento del suelo:

1. Se calcula la rigidez efectiva de la estructura para un modelo empotrado perfectamente.

$$T_{SSI} := 0.95s \quad \text{Periodo fundamental con interacción suelo-estructura (ISE)}$$

$$T_{RIG} := 0.94s \quad \text{Periodo fundamental sin ISE}$$

$$K_{RIG} := 0.90m_{\text{puente}} \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi}{T_{RIG}} \right)^2 = 5.999 \times 10^4 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \text{Rigidez de la estructura sin ISE}$$

2. Se calcula el radio equivalente de la cimentación

$$b_{\text{fun}} := 8\text{m} \quad \text{Ancho de la cimentación}$$

$$L_{\text{fun}} := 16\text{m} \quad \text{Largo de la cimentación}$$

$$h := 11.15\text{m} \quad \text{Altura de la estructura}$$

$$A_f := b_{\text{fun}} \cdot L_{\text{fun}} = 128 \text{m}^2 \quad \text{Área de la cimentación}$$

$$r_s := \left( \frac{A_f}{\pi} \right)^{0.5} = 6.383 \text{m} \quad \text{Radio equivalente de la cimentación}$$

3. Se calcula rigidez equivalente de la cimentación

$$E_1 := 40\text{MPa} \quad \text{Módulo de elasticidad equivalente del suelo}$$

$$\nu := 0.3 \quad \text{Coeficiente de poisson}$$

$$G_1 := \frac{E_1}{2 \cdot (1 + \nu)} = 15.385 \cdot \text{MPa} \quad \text{Módulo de corte estático del suelo}$$

$$K_{\text{fun.X}} := \frac{8}{2 - \nu} \cdot G_1 \cdot r_s = 4.621 \times 10^5 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \text{Rigidez equivalente de la cimentación}$$

4. Se calcula la rigidez rotacional de la cimentación.

$$K_{\text{rot}} := \frac{K_{RIG} \cdot (h)^2}{\left( \frac{T_{SSI}}{T_{RIG}} \right)^2 - 1} = 3.486 \times 10^8 \cdot \text{kN} \cdot \text{m} \quad \text{Rigidez rotacional de la cimentación}$$

## 5. Radio por rotación equivalente de la cimentación

$$r_{\text{rot}} := \left[ \frac{3 \cdot (1 - \nu) \cdot K_{\text{rot}}}{8 \cdot G_1} \right]^{\frac{1}{3}} = 18.119 \text{ m}$$

Radio de rotación equivalente de la cimentación

## 6. Relación Periodo Efectivo/Alargamiento

$$\mu_{\text{duct}} := 7.21$$

Ductilidad de la estructura

$$\text{rel}_T := \left[ 1 + \frac{1}{\mu_{\text{duct}}} \cdot \left[ \left( \frac{T_{\text{SSI}}}{T_{\text{RIG}}} \right)^2 - 1 \right] \right]^{0.5} = 1.001$$

$$d_f := 3.25 \text{ m}$$

Altura de desplante de la cimentación

## 7. Amortiguamiento en la cimentación

$$c_e := 1.5 \cdot \left( \frac{d_f}{r_s} \right) + 1 = 1.764$$

$$a_2 := c_e \cdot \left( 25 \cdot \ln \left( \frac{h}{r_{\text{rot}}} \right) - 16 \right) = -49.629$$

$$a_1 := c_e \cdot e^{\left( 4.7 - 1.6 \cdot \frac{h}{r_{\text{rot}}} \right)} = 72.447$$

## 8. Razón de amortiguamiento de la fundación flexible

$$\beta_f := a_1 \cdot (\text{rel}_T - 1) + a_2 \cdot (\text{rel}_T - 1)^2 = 0.107$$

Razón de amortiguamiento de la cimentación

$$\beta_i := 5$$

$$\beta_0 := \beta_f + \frac{\beta_i}{(\text{rel}_T)^3} = 5.085$$

Amortiguamiento resultante

## 9. Factor de escalamiento por amortiguamiento en la cimentación

$$B := \frac{4}{5.6 - \ln(\beta_0)} = 1.007$$