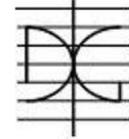




UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



DEPARTAMENTO  
DE INGENIERÍA DE  
LA CONSTRUCCIÓN  
Y DE PROYECTOS DE  
INGENIERÍA CIVIL

# MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DEL HORMIGÓN

## TRABAJO FIN DE MÁSTER CURSO ACADÉMICO 2020/2021

**Diseño óptimo del refuerzo estructural, mediante  
disipadores CRP, para la adecuación del desempeño  
sísmico de estructuras aporricadas de hormigón  
armado.**

**Autor/a: Luis Ivan Velasco Enriquez**

**Tutor/a: Antonio Hospitaler Pérez**

**Valencia, junio de 2021**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA  
CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL  
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**



**MUIH**

# CONTENIDO

<b>Agradecimientos</b>	<b>i</b>
<b>Resumen</b>	<b>ii</b>
<b>Motivación</b>	<b>iv</b>
<b>Objetivos</b>	<b>v</b>
<b>Capítulo 1</b>	
<b>Revisión bibliográfica</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción	1
1.2. Contravientos restringidos al pandeo	1
1.2.1. Sistemas de protección sísmica	1
1.2.2. Disipadores de energía sísmica	3
1.2.3. Contravientos restringidos al pandeo (CRP)	5
1.2.4. Respuesta de los disipadores de tipo CRP	7
1.2.5. Diseño de estructuras con CRP's	11
1.2.6. Método de diseño propuesto por Guerrero	13
1.2.7. Recomendaciones de diseño	17
1.3. Evaluación del desempeño sísmico de estructuras	18
1.3.1. Espectro de capacidad	18
1.3.2. Conversión de la curva de capacidad en el espectro de capacidad	20
1.3.3. Espectro de demanda	20
1.3.4. Espectro de demanda reducido	22
1.3.5. Punto de desempeño	29
1.3.6. Espectros de respuesta elástica según las NTCDS – CDMX	30
1.3.7. Construcción de los espectros de respuesta según las NTCDS	34
1.3.8. Construcción de los espectros de respuesta según la ATC – 40	35

1.3.9.	Comparación entre los espectros de demanda según las NTCDS y la ATC40	37
1.3.10.	Desempeños objetivo	38
1.3.11.	Respuestas límite	40
1.4.	Optimización por algoritmos metaheurísticos	41
1.4.1.	Resolución de problemas complejos	41
1.4.2.	Origen de las metaheurísticas	43
1.4.3.	Clasificación de las metaheurísticas	46
1.4.4.	Metaheurísticas basadas en poblaciones	47
1.4.5.	Metaheurísticas basadas en una única solución	49
1.4.6.	Sobre las metaheurísticas “innovadoras”	51
1.4.7.	Validez del uso de metáforas	52
1.4.8.	No Free Lunch	56
1.4.9.	Problemas de optimización	58
1.4.10.	<i>Simulated Annealing</i> (SA)	60
1.5.	Aplicación de la optimización en la ingeniería estructural	63
1.5.1.	Tipos de problemas de optimización en la ingeniería estructural	63
1.5.2.	Optimización convencional de estructuras	63
1.5.3.	Optimización sísmica de estructuras	69
1.5.4.	Observaciones sobre la optimización en estructuras	75

## **Capítulo 2**

<b>Estructura objetivo de estudio</b>	<b>77</b>	
2.1.	Introducción	77
2.2.	Diseño de la estructura	78
2.2.1.	Factores de carga	78
2.2.2.	Cargas gravitatorias	79
2.2.3.	Cargas horizontales de viento	80
2.2.4.	Solicitaciones de los elementos estructurales	82
2.2.5.	Diseño de los elementos estructurales	82

2.3.	Modelado de la estructura en OpenSees	84
2.3.1.	OpenSees	84
2.3.2.	Definición del material: hormigón	85
2.3.3.	Definición del material: Acero de refuerzo	88
2.3.4.	Elementos en OpenSees	90
2.3.5.	Nudos rígidos	93
2.4.	Modelado de la estructura en SAP2000	94
2.5.	Comparación de la respuesta de los modelos	96
2.5.1.	Análisis modal de la estructura	96
2.5.2.	Curva de capacidad de la estructura	97
2.6.	Evaluación del desempeño sísmico de la estructura	97
<b>Capítulo 3</b>		
<b>Diseño de la estructura de refuerzo</b>		<b>101</b>
3.1.	Introducción	101
3.1.1.	Selección y escalado de los registros sísmicos	101
3.1.2.	Respuesta del oscilador dual equivalente	104
3.2.	Modelado de los CRP's en OpenSees	106
3.3.	Modelado de los CRP's en SAP2000	108
3.4.	Comparación de la respuesta de los modelos con CRP's	110
3.4.1.	Análisis modal de la estructura con CRP's	110
3.4.2.	Curva de capacidad de la estructura con CRP's	111
3.5.	Evaluación del desempeño sísmico de la estructura con CRP's	112
3.6.	Coste de la subestructura disipadora	113
<b>Capítulo 4</b>		
<b>Optimización del sistema disipador</b>		<b>114</b>
4.1.	Introducción	114
4.1.1.	Objeto de optimización	115
4.1.2.	Variables de decisión y parámetros del problema	115
4.1.3.	Función objetivo	117

4.1.4.	Restricciones del problema	117
4.1.5.	Tamaño del espacio de soluciones	118
4.2.	Búsqueda aleatoria en el espacio de soluciones	119
4.2.1.	Descripción de BA	119
4.2.2.	Resultados obtenidos por BA	120
4.3.	Optimización por búsqueda local	123
4.3.1.	Descripción de BL	123
4.3.2.	Calibración de BL	125
4.3.3.	Resultados obtenidos con BL	127
4.4.	Simulated Annealing	137
4.4.1.	Descripción de SA	137
4.4.2.	Calibración de SA	138
4.4.3.	Resultados obtenidos con SA	144
4.5.	Simulated Annealing tomando a M0 como solución inicial (SAM)	149
4.5.1.	Descripción de SAM	149
4.5.2.	Calibración de SAM	149
4.5.3.	Resultados obtenidos con SAM	150

## Capítulo 5

<b>Análisis y discusión de resultados</b>	<b>156</b>	
5.1.	Introducción	156
5.2.	Desempeño de los algoritmos de optimización	156
5.2.1.	Valores de $Wsd$ obtenidos	157
5.2.2.	Tiempos de ejecución	157
5.3.	Características de los CRP's empleados en las soluciones óptimas	158
5.3.1.	Sobre los valores de $\eta$	158
5.3.2.	Sobre los valores de $\gamma$	158
5.4.	Características de las estructuras disipadoras de las soluciones óptimas	160
5.4.1.	Número y distribución de los CRP's de las soluciones óptimas	160

5.4.2.	Rigideces laterales de las soluciones óptimas	161
5.4.3.	Periodos fundamentales de las soluciones óptimas ( <i>T</i> )	162
5.4.4.	Periodos fundamentales al alcanzar el punto de desempeño ( <i>TPD</i> )	162
5.4.5.	Axiles de plastificación de los CRP's de los soluciones óptimas	163
5.4.6.	Orden de plastificación de los CRP's	164
5.4.7.	Curvas fuerza – deformación de los CRP's	165
5.5.	Fuerzas sísmicas y cortante sísmico	169
5.6.	Registro de distorsiones de entrepiso durante los análisis	172
5.7.	¿Cómo utilizar esta información?	174
<b>Capítulo 6</b>		
<b>Conclusiones y futuras líneas de investigación</b>		<b>177</b>
6.1.	Conclusiones	177
6.2.	Futuras líneas de investigación	178
<b>Referencias</b>		<b>180</b>

# Lista de Figuras

Figura 1. Oscilador de un grado de libertad sometido a excitación sísmica.	2
Figura 2. Respuesta típica de un amortiguador viscoso no lineal. Tomada de <sup>[7]</sup> .	4
Figura 3. Respuesta típica de un contraviento convencional. Tomada de <sup>[7]</sup> .	5
Figura 4. Esquema de un disipador de tipo CRP.	6
Figura 5. Respuesta típica de un CRP. Tomada de <sup>[7]</sup> .	7
Figura 6. Rigidez lateral brindada por el CRP a un marco.	8
Figura 7. Valores de factor de forma $fk$ para distintos valores de $\gamma$ y $\eta$ .	9
Figura 8. Resultados de ensayos realizados a CRP's. Tomada de <sup>[27]</sup> .	9
Figura 9. Valores según Tremblay et al. <sup>[23]</sup> de $\epsilon c$ para distintos valores de $\gamma$ y $\eta$ .	10
Figura 10. Oscilador dual equivalente (ODE). Adaptada de <sup>[22]</sup> .	13
Figura 11. Curva de capacidad del ODE. Adaptada de <sup>[22]</sup> .	14
Figura 12. Sistema estructural conformado por la estructura principal y el disipador. Adaptada de <sup>[22]</sup> .	14
Figura 13. Ejemplo de curva de capacidad. Tomada de <sup>[39]</sup> .	19
Figura 14. Intersección entre los espectros de capacidad y demanda.	20
Figura 15. Ejemplo de un espectro de respuesta elástica.	21
Figura 16. Espectro de capacidad y representación bilineal. Tomada de <sup>[39]</sup> .	22
Figura 17. Derivación del amortiguamiento para la reducción espectral. Tomada de <sup>[39]</sup> .	23
Figura 18. Derivación de la energía disipada por $ED$ . Tomada de <sup>[39]</sup> .	24
Figura 19. Valores de $\kappa$ en función de $\beta o$ .	27
Figura 20. Valores de $SRA$ en función de $\beta o$ .	28
Figura 21. Valores de $SRV$ en función de $\beta o$ .	28
Figura 22. Valores de $\kappa$ en función de $\kappa\beta o$ .	29
Figura 23. Espectro de respuesta reducido. Tomado de <sup>[39]</sup> .	29
Figura 24. Tolerancia del punto de desempeño. Tomado de <sup>[39]</sup> .	30
Figura 25. Zonificación geotécnica de la Ciudad de México. Tomado de <sup>[42]</sup> .	31
Figura 26. Espectros de respuesta, zona I o de lomas, coordenadas: (Latitud: 19.448, Longitud: - 99.214). Tomada de <sup>[46]</sup> .	32
Figura 27. Espectros de respuesta, zona II o de transición, coordenadas: (Latitud: 19.502, Longitud: - 99.187). Tomada de <sup>[46]</sup> .	32
Figura 28. Espectros de respuesta, zona II o de transición, coordenadas: (Latitud: 19.45, Longitud: -99.15). Tomada de <sup>[46]</sup> .	33
Figura 29. Espectros de respuesta, zona III o del lago, coordenadas: (Latitud: 19.43, Longitud: -99.13). Tomada de <sup>[46]</sup> .	33
Figura 30. Efectos del parámetro $k$ en las ordenadas del espectro de respuesta. Tomada de <sup>[42]</sup> .	34
Figura 31. Elaboración del espectro de respuesta elástica por medio de los coeficientes sísmicos $CA$ y $CV$ . Adaptada de <sup>[39]</sup> .	36
Figura 32. Espectro de demanda siguiendo la ATC40 considerando $CA = 0.44$ y $CV = 0.40$ .	37
Figura 33. Comparación entre los espectros de demanda; ATC – 40 considerando $CA = 0.44$ y $CV = 0.40$ , NTCDS considerando $k = 0.35$ y $k = 1.5$ .	38
Figura 34. Problema del Viajante de Comercio con $n = 3$ y $n = 15$ .	41

Figura 35. Esquema de la aplicación del primer algoritmo de Estrategias Evolutivas en la optimización de problemas.	45
Figura 36. Esquema de la aplicación de ACO en el PVA.	49
Figura 37. Numero de resultados obtenidos por Google Scholar sobre MH's presentadas en las secciones tal. Elaboración propia con datos obtenidos en febrero del 2021.	53
Figura 38. Numero de resultados obtenidos por Google Scholar sobre MH's "novedosas". Elaboración propia con datos obtenidos en febrero del 2021.	53
Figura 39. Diagrama del Imperialist Competitive Algorithm propuesto por Abdollahi et al. <sup>[81]</sup> . Tomada de <sup>[59]</sup> .	54
Figura 40. Sitio web de Harmony Search (HS), algoritmo propuesto por Geem et al. <sup>[72]</sup> . ( <a href="https://sites.google.com/a/hydroteq.com/www/">https://sites.google.com/a/hydroteq.com/www/</a> ).	55
Figura 41. Sitio web de Artificial Bee Colony (ABC), algoritmo propuesto por Karaboga et al. <sup>[74]</sup> . ( <a href="https://abc.erciyes.edu.tr/">https://abc.erciyes.edu.tr/</a> ).	56
Figura 42. Sitio web de Whale Optimization Algorithm (WOA), algoritmo propuesto por Mirjalili et al. <sup>[84]</sup> . ( <a href="https://seyedalimirjalili.com/woa">https://seyedalimirjalili.com/woa</a> ).	56
Figura 43. Comparación del desempeño de una búsqueda aleatoria y dos algoritmos de búsqueda cualesquiera A y B.	57
Figura 44. Ejemplo de la distribución de probabilidad utilizada en SA para aceptar soluciones peores.	61
Figura 45. Pseudo – código de SA.	62
Figura 46. Modelo de la estructura analizada. Optimización aleatoria.	78
Figura 47. Sección transversal de los elementos columna.	83
Figura 48. Sección transversal de los elementos viga en empotramiento.	83
Figura 49. Sección transversal de elementos losa.	83
Figura 50. Ambiente de OpenSees.	84
Figura 51. Interfaz de OpenSees.	85
Figura 52. Esquema esfuerzo – deformación del hormigón a compresión. Tomada de <sup>[42]</sup> .	86
Figura 53. Curva esfuerzo – deformación teórica del hormigón para la sección Columna 60x60.	87
Figura 54. Curva esfuerzo – deformación teórica del hormigón para la sección Columna 50x50.	87
Figura 55. Curva esfuerzo – deformación teórica del hormigón para la sección Viga 40x50.	87
Figura 56. Modelo esfuerzo deformación material Concrete02. Tomada de <sup>[180]</sup> .	88
Figura 57. Modelo esfuerzo deformación material Steel02. Tomada de <sup>[180]</sup> .	88
Figura 58. Curva esfuerzo deformación del material Steel02 bajo cargas cíclicas a compresión y tensión. Tomada de <sup>[180]</sup> .	89
Figura 59. Localización de las secciones de integración al usar el método de integración modificado Gauss – Radau. Tomada de <sup>[189]</sup> .	91
Figura 60. Diagrama momento – rotación producido por la integración modificada Gauss – Radau. Tomada de <sup>[189]</sup> .	92
Figura 61. Radio de endurecimiento del diagrama momento – rotación en función de $\beta$ . Tomada de <sup>[189]</sup> .	93
Figura 62. Esquema de nudos rígidos, tomada de <sup>[191]</sup> .	93
Figura 63. Parámetros de las curvas momento – rotación para elementos de hormigón. Tomada de <sup>[5]</sup> .	94
Figura 64. Diagrama de relación momento – rotación para elementos de hormigón. Tomada de <sup>[5]</sup> .	95
Figura 65. Parámetros de la rótula plástica de los elementos viga.	95
Figura 66. Parámetros de la rótula plástica de los elementos columna.	96
Figura 67. Comparación de las curvas de capacidad obtenidas con SAP2000 y OpenSees.	97
Figura 68. Espectro de respuesta elástica empleado para la evaluación de desempeño.	98

Figura 69. Comparación entre los diferentes espectros de demanda reducido y el espectro de capacidad.	99
Figura 70. Ubicación del inmueble y de las estaciones donde se registraron los sismos empleados. Imagen tomada de Google Earth.	102
Figura 71. a) Registro sin procesar, b) registro procesado.	103
Figura 72. Valor medio de los espectros de respuesta escalados.	104
Figura 73. Respuesta del ODE con respecto al desplazamiento máximo.	105
Figura 74. Configuración de los CRP's en la estructura.	106
Figura 75. CRP empleado en la primera planta de la estructura.	107
Figura 76. Propiedades del modelo plástico propuesto por Wen. Tomada de <sup>[191]</sup> .	108
Figura 77. M0 modelada en SAP2000.	110
Figura 78. Comparación de las curvas de capacidad obtenidas con SAP2000 y OpenSees del diseño M0.	111
Figura 79. Curvas de capacidad de los modelos con y sin CRP's.	111
Figura 80. Punto de desempeño del diseño M0.	112
Figura 81. Configuración de la matriz de diseño.	116
Figura 82. Configuraciones posibles en el proceso de optimización: a) CRP de izquierda a derecha; b) CRP de derecha a izquierda; y c) que no hay CRP en el marco.	116
Figura 83. Esquema del modelo paramétrico de los CRP's empleado.	117
Figura 84. Pseudo código utilizado en el paseo aleatorio.	119
Figura 85. Resultados del paseo aleatorio.	120
Figura 86. Frontera de Pareto de los datos obtenidos.	121
Figura 87. Valores de $Wsd$ ordenados de menor a mayor.	121
Figura 88. Valores del número de disipadores empleados, ordenados de menor a mayor.	122
Figura 89. Valores de $Wsd$ en función del periodo fundamental $T$ .	122
Figura 90. Valores de $\beta_{eff}$ en función del periodo fundamental $T$ .	123
Figura 91. Pseudo – código empleado para BL.	124
Figura 92. Pseudo – código empleado para generar la matriz de diseño de $\mathbf{x}'$ .	125
Figura 93. Valores de $Wsd$ obtenidos por BL con los diferentes factores considerados.	126
Figura 94. Tiempos obtenidos por BL con los diferentes factores considerados.	126
Figura 95. Trayectoria seguida por BL en la primera corrida del algoritmo.	127
Figura 96. Solución BL1 obtenida por BL, a) estructura optimizada; b) punto de desempeño, el cual es la intersección entre el espectro de capacidad y el espectro de demanda reducido.	129
Figura 97. Solución BL2 obtenida por BL. a) estructura optimizada; b) punto de desempeño, el cual es la intersección entre el espectro de capacidad y el espectro de demanda reducido.	130
Figura 98. Solución BL3 obtenida por BL. a) estructura optimizada; b) punto de desempeño, el cual es la intersección entre el espectro de capacidad y el espectro de demanda reducido.	131
Figura 99. Solución BL4 obtenida por BL. a) estructura optimizada; b) punto de desempeño, el cual es la intersección entre el espectro de capacidad y el espectro de demanda reducido.	132
Figura 100. Solución BL5 obtenida por BL. a) estructura optimizada; b) punto de desempeño, el cual es la intersección entre el espectro de capacidad y el espectro de demanda reducido.	133
Figura 101. Frecuencias absolutas de los valores de la relación $\gamma$ , datos obtenidos por BL.	134
Figura 102. Frecuencias absolutas de los valores de la relación $\eta$ , datos obtenidos por BL.	134
Figura 103. Rigideces laterales aportadas por el sistema disipador en M0 y las soluciones obtenidas por BL.	134
Figura 104. Espectros de capacidad de M0 y de las soluciones obtenidas con BL.	135
Figura 105. Distorsiones de entrepiso máximas de M0 y de las soluciones obtenidas con BL.	136

Figura 106. Rotaciones plásticas máximas en elementos viga de M0 y de las soluciones obtenidas con BL.	136
Figura 107. Rotaciones plásticas máximas en elementos columna de M0 y de las soluciones obtenidas con BL.	137
Figura 108. Pseudo – código empleado en SA.	138
Figura 109. Porcentaje acumulado de los valores de $\Delta f x$ para diferentes intervalos.	141
Figura 110. Valores de $Wsd$ obtenidos por SA con los diferentes factores considerados.	143
Figura 111. Tiempos obtenidos por SA con los diferentes factores considerados.	143
Figura 112. Trayectoria seguida por SA en la primera corrida del algoritmo.	144
Figura 113. Soluciones obtenidas por medio de SA.	145
Figura 114. Frecuencias absolutas de los valores de la relación $\gamma$ , datos obtenidos por SA.	146
Figura 115. Frecuencias absolutas de los valores de la relación $\eta$ , datos obtenidos por SA.	146
Figura 116. Rigideces laterales aportadas por el sistema disipador en M0 y las soluciones obtenidas por SA.	147
Figura 117. Espectros de capacidad de M0 y de las soluciones obtenidas con SA.	147
Figura 118. Distorsiones de entrepiso máximas de M0 y de las soluciones obtenidas con SA.	148
Figura 119. Rotaciones plásticas máximas en elementos viga de M0 y de las soluciones obtenidas con SA.	148
Figura 120. Rotaciones plásticas máximas en elementos columna de M0 y de las soluciones obtenidas con SA.	149
Figura 121. Trayectoria seguida por SAM en la primera corrida del algoritmo.	150
Figura 122. Soluciones obtenidas por medio de SAM.	151
Figura 123. Frecuencias absolutas de los valores de la relación $\gamma$ , datos obtenidos por SAM.	152
Figura 124. Frecuencias absolutas de los valores de la relación $\eta$ , datos obtenidos por SAM.	153
Figura 125. Rigideces laterales aportadas por el sistema disipador en M0 y las soluciones obtenidas por SAM.	153
Figura 126. Espectros de capacidad de M0 y de las soluciones obtenidas con SAM.	154
Figura 127. Distorsiones de entrepiso máximas de M0 y de las soluciones obtenidas con SAM.	154
Figura 128. Rotaciones plásticas máximas en elementos viga de M0 y de las soluciones obtenidas con SAM.	155
Figura 129. Rotaciones plásticas máximas en elementos columna de M0 y de las soluciones obtenidas con SAM.	155
Figura 130. Frecuencias absolutas de los valores de la relación $\eta$ , datos obtenidos por SA y SAM.	158
Figura 131. Frecuencias absolutas de los valores de la relación $\gamma$ , datos obtenidos por SA y SAM.	159
Figura 132. Diseños de la estructura disipadora más relevantes obtenidos en este trabajo.	160
Figura 133. Rigideces laterales aportadas por el sistema disipador en M0 y las mejores soluciones obtenidas de cada algoritmo.	161
Figura 134. Distribución de cargas de plastificación en altura.	163
Figura 135. Orden de plastificación del modelo M0.	164
Figura 136. Orden de plastificación del modelo BL5.	164
Figura 137. Orden de plastificación del modelo SA2.	165
Figura 138. Orden de plastificación del modelo SAM2.	165
Figura 139. Respuesta axil - deformación de los CRP's del modelo M0.	166
Figura 140. Respuesta axil - deformación de los CRP's del modelo BL5.	167
Figura 141. Respuesta axil - deformación de los CRP's del modelo SA2.	168
Figura 142. Respuesta axil - deformación de los CRP's del modelo SAM2.	169
Figura 143. Fuerzas y cortante sísmico del modelo sin CRP's.	171

Figura 144. Fuerzas y cortante sísmico del modelo M0.	171
Figura 145. Fuerzas y cortante sísmico del modelo BL5.	171
Figura 146. Fuerzas y cortante sísmico del modelo SA2.	172
Figura 147. Fuerzas y cortante sísmico del modelo SAM2.	172
Figura 148. Distorsiones de entrepiso registradas. Modelo sin CRP's.	173
Figura 149. Distorsiones de entrepiso registradas. Modelo M0.	173
Figura 150. Distorsiones de entrepiso registradas. Modelo BL5.	173
Figura 151. Distorsiones de entrepiso registradas. Modelo SA2.	174
Figura 152. Distorsiones de entrepiso registradas. Modelo SAM2.	174
Figura 153. Paso 1. Estructura sin reforzar.	175
Figura 154. Paso 2. Estimación de demanda sísmica.	175
Figura 155. Paso 3. Definir configuración y áreas transversales de los CRP's.	176

# Lista de Tablas

Tabla 1. Factores de amplificación para considerar la no uniformidad en altura de las distorsiones de entepiso, valores tomados de <sup>[24]</sup> .	16
Tabla 2. Tipos de comportamientos estructurales. Adaptada de <sup>[39]</sup> .	25
Tabla 3. Valores del factor de modificación del amortiguamiento, $\kappa$ . Adaptada de <sup>[39]</sup> .	26
Tabla 4. Valores mínimos para $SRA$ y $SRV$ . Adaptada de <sup>[39]</sup> .	27
Tabla 5. Valores de $\lambda$ , $\varepsilon$ y $\tau$ en función de $Ts$ . Tomada de <sup>[42]</sup> .	35
Tabla 6. Construcción del espectro de demanda en función de los coeficientes sísmicos ( $CA$ , $CV$ ). Adaptada de <sup>[39]</sup> .	36
Tabla 7. Parámetros de los espectros de demanda comparados, NTC. Datos obtenidos del SASID <sup>[46]</sup> .	37
Tabla 8. Factores de carga.	79
Tabla 9. Pesos específicos de materiales considerados para carga muerta.	79
Tabla 10. Cargas distribuidas consideradas en el modelo.	80
Tabla 11. Fuerzas producidas por el viento en la estructura.	81
Tabla 12. Resumen de las cargas aplicadas.	81
Tabla 13. Cargas de área consideradas para el diseño de losas macizas.	82
Tabla 14. Solicitaciones de diseño de los elementos columna y viga.	82
Tabla 15. Valores de $f_{cc'}$ obtenidos por las NTC y el Código Modelo.	86
Tabla 16. Parámetros de los diagramas momento – rotación según el ASCE 41 – 17.	95
Tabla 17. Resultados del análisis modal de la estructura sin CRP's.	96
Tabla 18. Valores límite de las respuestas consideradas.	99
Tabla 19. Resultado de las evaluaciones del desempeño sísmico realizadas.	100
Tabla 20. Registros con sus respectivos factores de escalado.	104
Tabla 21. Desplazamiento máximo presentado por el ODE para cada registro.	105
Tabla 22. Áreas de los CRP's para cada nivel de la estructura	106
Tabla 23. Resultados del análisis modal de los modelos con y sin CRP's.	110
Tabla 24. Resultado de las evaluaciones del desempeño sísmico realizadas.	112
Tabla 25. Datos de interés de las estructuras optimizadas por BL.	128
Tabla 26. Cadenas de Márkov generadas por diferentes valores del coeficiente $K$ .	139
Tabla 27. Valores de $\Delta$ para diferentes tasas de aceptación de soluciones degradadas.	141
Tabla 28. Valores de $\Delta$ para diferentes tasas de aceptación de soluciones degradadas.	141
Tabla 29. Comparación entre las tasas de aceptación estimadas y reales obtenidas.	142
Tabla 30. Datos de interés de las estructuras optimizadas por SA.	144
Tabla 31. Datos de interés de las estructuras optimizadas por SAM.	151
Tabla 32. Datos del desempeño de los algoritmos en función de los valores de $Wsd$ obtenidos.	157
Tabla 33. Datos del desempeño de los algoritmos en función del tiempo de ejecución.	157
Tabla 34. Periodos fundamentales de las soluciones óptimas encontradas.	162
Tabla 35. Periodos fundamentales al alcanzar el punto de desempeño.	162
Tabla 36. Pesos considerados en el análisis modal espectral	170
Tabla 37. Modos fundamentales de vibración.	170

## AGRADECIMIENTOS

En primera instancia quiero agradecer a todas las personas que le dedican algún tiempo a leer este trabajo, espero que encuentren algo útil entre todas las páginas que terminé escribiendo.

Quiero agradecer a mi madre Vero, a mi hermano Omar y a mi padre Benito por el apoyo que me brindaron para que yo llegara hasta aquí. Adicionalmente le doy mi gratitud a Diana, por ser tan buena conmigo en los momentos que yo más lo necesitaba. También quiero agradecer a las personas que fueron una segunda familia para mí durante mi estancia fuera de casa: Andrés, Ariel, Javier, Santiago, Cata, Pipe, Ginita, Les, Joha, Luderth y Iara.

Le doy las gracias a mi tutor, Tony, por darme consejo y prestarme su experiencia y conocimientos durante la elaboración de este trabajo. También agradezco a Héctor por permitirme usar sus modelos de OpenSees y sus hojas de cálculo, herramientas que posibilitaron en gran medida la obtención de resultados en tiempos razonables.

El autor de este trabajo agradece al CONACYT y a la alianza fiidem por haber brindado los recursos económicos que le permitieron realizar los estudios de posgrado. Adicionalmente se agradece a la Red Acelerográfica del II – UNAM, ya que los registros acelerográficos proporcionados han sido producto de las labores de instrumentación y procesamiento de la Unidad de Instrumentación Sísmica del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Por último pero no menos importante, quiero agradecerme a mi mismo. Desconozco la utilidad de los resultados que se encontraron, pero al final de cuentas, fue una investigación realizada en el campo que me interesa y que me sirvió para aclararme algunas dudas que tenía sobre estos temas.

## RESUMEN

Se plantea el problema de determinar el diseño óptimo de la estructura de refuerzo conformada por disipadores de energía sísmica de tipo Contraviento Restringido al Pandeo (CRP), que permita el reajuste del desempeño sísmico de marcos de hormigón armado.

Los CRP's son elementos conformados por un núcleo metálico confinado, capaz de plastificar tanto a tracción como a compresión, característica que les permite disipar energía sísmica por medio de ciclos histeréticos. Debido a su comportamiento estable frente a acciones cíclicas, los disipadores de tipo CRP han sido utilizados tanto en el diseño como en el reajuste de estructuras ubicadas en zonas de elevado riesgo sísmico, como Japón, EU y América Latina.

Debido al comportamiento no lineal que presenta la respuesta de estructuras equipadas con disipadores de tipo CRP, los diseños candidatos a solución han sido analizados por medio de OpenSees, que es un programa de elementos finitos enfocado a la ingeniería sísmica. El desempeño sísmico de todos los diseños ha sido evaluado por medio del método del espectro de capacidad (*Capacity Spectrum Method*), el cual utiliza la información de análisis estáticos no lineales (*Pushover*) para estimar el desplazamiento máximo que presentará la estructura bajo una demanda sísmica dada.

El proceso de optimización ha sido realizado por medio del algoritmo metaheurístico conocido como *Simulated Annealing* (SA), teniéndose como objetivo determinar el número, disposición y características de los disipadores. Las características geométricas del núcleo de los CRP's y su distribución en el marco fueron consideradas como variables, mientras que los elementos estructurales del marco se mantuvieron inalterados durante el proceso. El algoritmo de SA se corrió en el programa Matlab, creándose un vínculo entre este último y OpenSees para permitir la transferencia de información durante el proceso de optimización. El uso conjunto de ambos programas se mostró eficiente en la optimización de estructuras complejas por medio de algoritmos metaheurísticos.

Los resultados obtenidos indican que existen múltiples diseños de la estructura disipadora que permiten cumplir con los criterios límite de desempeño sísmico establecidos. De manera adicional, se observa que el perfil de rigidez lateral, aportada por el sistema disipador, no sigue una distribución lineal en altura, siendo una característica común la supresión del CRP en el último nivel. Los diseños óptimos obtenidos por medio de los algoritmos metaheurísticos presentan una reducción de material usado en el sistema disipador de hasta el 67% en comparación con el valor típico de empleo de este tipo de sistemas.

# MOTIVACIÓN

Debido a que gran parte de América Latina se encuentra en una zona clasificada como de sismicidad elevada, es necesario investigar sobre el funcionamiento e implementación de los sistemas de protección sísmica. Estos sistemas, además de brindar mayor seguridad a las personas que ocupan las edificaciones donde se instalan, permiten reducir las pérdidas económicas y de funcionalidad de manera posterior a un evento sísmico.

Los disipadores de tipo Contraviento Restringido al Pandeo (CRP) son sistemas de protección sísmica sencillos y de fácil implementación. Estos disipadores han sido utilizados tanto en edificios nuevos como para trabajos de rehabilitación y refuerzo estructural. De manera general, los disipadores de tipo CRP son elementos rectos conformados por un núcleo metálico y una carcasa que impide su pandeo al ser comprimidos. Esta característica les permite disipar parte de la energía aplicada por el sismo a la estructura por medio de la deformación plástica de su núcleo.

Actualmente existen diferentes versiones de disipadores de tipo CRP, sin embargo, su desempeño depende en gran medida de la rigidez que aportan y de la cantidad de energía que pueden disipar, que es función de la deformación última de su núcleo. Los reportes técnicos indican que los disipadores de tipo CRP con núcleos cortos son capaces de disipar mayor energía, aunque, al ser más rígidos, es difícil definir si esta característica es suficiente como para preferirlos sobre los CRP's de núcleos largos.

A lo largo del presente trabajo se buscará determinar las características que debe de presentar el diseño óptimo de un sistema disipador al ser empleado en el refuerzo de una estructura de hormigón armado. El diseño óptimo será determinado por medio de algoritmos metaheurísticos que tendrán como objetivo el minimizar el coste del sistema de protección sísmica por disipación determinando el número, posición, disposición y configuración de los CRP's necesarios para verificar los requerimientos prestacionales planteados. Para encontrar las diferencias que se presentan al utilizar CRP's de núcleos largos y cortos en los sistemas disipadores, se consideraran núcleo de una amplia variedad de longitudes. Adicionalmente, se estudiará como se ve afectado el diseño de la estructura disipadora por la distribución de los CRP's tanto en altura como en las diferentes vanos de un mismo nivel.

## OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es identificar el diseño óptimo del sistema de protección sísmica por disipación requerida para reforzar una estructura de hormigón armado. Los objetivos específicos conseguidos durante el desarrollo de este trabajo se enuncian a continuación:

- Realizar la revisión bibliográfica relacionada con los disipadores de energía sísmica de tipo CRP, la evaluación del desempeño sísmico de estructuras y el uso de algoritmos metaheurísticos en la optimización de problemas.
- Diseñar el refuerzo estructural de una estructura de hormigón armado empleando disipadores de energía sísmica de tipo CRP, el cual servirá como modelo de control para comparar los diseños obtenidos por medio de los algoritmos metaheurísticos.
- Aplicar la metaheurística conocida como *Simulated Annealing* para optimizar el diseño de la estructura disipadora.
- Señalar las características que presentan los diseños obtenidos por medio de los algoritmos metaheurísticos e identificar los motivos por los cuales éstas se presentan.

# CAPÍTULO 1

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 1.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se muestran los aspectos teóricos que fundamentan al presente trabajo. Los temas revisados se relacionan con los disipadores de tipo Contraviento Restringido al Pandeo, la evaluación del desempeño sísmico de estructuras y la optimización de problemas por medio de algoritmos metaheurísticos. Adicionalmente, se revisarán trabajos publicados relacionados con la optimización de estructuras.

### 1.2. CONTRAVIENTOS RESTRINGIDOS AL PANDEO

#### 1.2.1. **Sistemas de protección sísmica**

Los sistemas de protección sísmica son el conjunto de elementos que modifican la respuesta dinámica de una estructura. Estos sistemas tienen como objetivo el reducir las demandas dinámicas aplicadas a la estructura durante un evento sísmico con la finalidad de evitar la aparición de daños estructurales. Estos sistemas pueden clasificarse en función del tipo de control que ejercen sobre la estructura, encontrándose tres tipos de sistemas de protección sísmica<sup>[1,2]</sup>:

- **Sistemas activos:** Este tipo de sistemas aplican fuerzas directamente sobre la estructura, ya sea a través de masas o tendones activos. Se denominan sistemas activos debido a que se realiza una monitorización de la respuesta estructural en

tiempo real, modificándose las fuerzas aplicadas en función de la información recibida.

- **Sistemas híbridos:** De manera similar a los activos, en estos sistemas también existe monitorización estructural, sin embargo, solo algunas propiedades mecánicas del sistema son modificadas para hacer frente a la demanda sísmica.
- **Sistemas pasivos:** En estos sistemas no se monitoriza la respuesta de la estructura y el control de ésta se ejerce por medio de dispositivos con propiedades mecánicas que permiten alterar las fuerzas sísmicas aplicadas o concentrar los daños en elementos fácilmente identificables.

De los tres tipos de sistemas antes mencionados, el de tipo pasivo es el más sencillo y utilizado actualmente. En general, se puede decir que el funcionamiento de los sistemas de protección sísmica es complejo, sin embargo, su explicación se puede simplificar al emplearse el concepto de energía.

Considérese un sistema estructural idealizado como un oscilador de un grado de libertad, el cual tiene como propiedades una masa  $m$ , una rigidez  $k$  y un coeficiente de amortiguamiento viscoso  $c$ . Cuando se aplica una acción sísmica al oscilador, aparece una fuerza sobre el sistema que es igual a la masa  $m$  del oscilador por la aceleración del terreno  $\ddot{u}_g$ , tal como se muestra en la Figura 1.

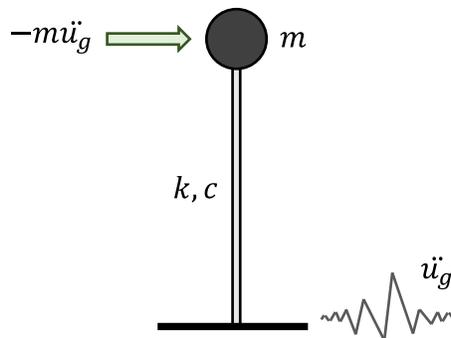


Figura 1. Oscilador de un grado de libertad sometido a excitación sísmica.

Bajo estas condiciones, la ecuación de equilibrio dinámico del sistema queda de la siguiente manera:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

Donde  $\ddot{u}$ ,  $\dot{u}$  y  $u$  son la aceleración, velocidad y desplazamiento que experimenta el sistema en el instante  $t$ , respectivamente. Adicionalmente, se tiene que  $-m\ddot{u}_g(t)$  es la fuerza aplicada al sistema y que se conoce como fuerza efectiva del sismo<sup>[3]</sup>. Al estar todos los elementos de (1) en unidades de fuerza, y recordando que la energía es igual a fuerza por

desplazamiento, es posible ver la ecuación de equilibrio dinámico en términos de energía. Esto se consigue integrando la ecuación una vez se ha multiplicado cada termino por  $du$ .

$$\int m\ddot{u}(t)du + \int c\dot{u}(t)du + \int ku(t)du = - \int m\ddot{u}_g(t)du \quad (2)$$

$$E_K + E_D + E_S = E_I \quad (3)$$

Siendo  $E_K$  la energía cinética asociada a la masa,  $E_D$  la energía disipada por el amortiguamiento viscoso,  $E_S$  la energía de deformación y  $E_I$  la energía aplicada al sistema por la fuerza efectiva del sismo<sup>[3]</sup>. Al considerarse un dispositivo capaz de disipar energía, ya sea por medio de deformaciones o por amortiguamiento viscoso, es posible incluir un cuarto término en la parte izquierda de la ecuación, el cual se denomina aquí como  $E_{dip}$ .

$$E_K + E_D + E_S + E_{dip} = E_I \quad (4)$$

En este punto se observa que existen dos formas de reducir la participación de la estructura en el balance energético: a) incrementando el termino  $E_{dip}$  o b) reduciendo la energía suministrada al sistema  $E_I$ <sup>[4]</sup>. Los sistemas de protección sísmica funcionan siguiendo alguno de los enfoques antes mencionados. Mientras que algunos elementos, como los aisladores de base, permiten reducir la energía de entrada, el uso de disipadores de energía sísmica permite reducir la participación de la estructura en el balance energético y concentrar los daños en sí mismos.

### 1.2.2. Disipadores de energía sísmica

Los disipadores de energía sísmica son sistemas de protección de tipo pasivo. Estos dispositivos tienen como finalidad el tomar parte de la energía aplicada por el sismo, reduciendo así la participación de la estructura y mitigando el daño que ésta pueda sufrir. Una de las principales ventajas que tienen estos dispositivos es que se conciben para ser reemplazables, lo que permite reducir tiempos y costos de reparación tras eventos sísmicos.

Los disipadores se pueden clasificar en función del término de la ecuación de equilibrio dinámico que afectan, encontrándose tres tipos de disipadores de energía<sup>[5]</sup>:

- Dependientes del desplazamiento
- Dependientes de la velocidad
- Otros

Los disipadores dependientes del desplazamiento también se conocen como disipadores histeréticos, esto se debe a que su funcionamiento se basa en la deformación plástica del material que lo compone. Su comportamiento mecánico se caracteriza por medio de relaciones fuerza – desplazamiento, representadas por diagramas bi o trilineales<sup>[6]</sup>, siendo la energía disipada dependiente del desplazamiento relativo entre sus extremos y proporcional al área encerrada entre cada ciclo de carga. Los disipadores de fricción, ADAS (*Added Damping and Stiffness*), TADAS (*Triangular Added Damping and Stiffness*) o CRP (Contravientos Restringidos al Pandeo) entran en esta categoría.

Por otra parte, en los disipadores dependientes de la velocidad, la energía disipada es dependiente de la velocidad relativa entre sus extremos y se pueden clasificar como viscosos o viscoelásticos<sup>[6]</sup>. En el caso de los amortiguadores viscosos, su comportamiento mecánico se puede caracterizar por una relación fuerza – velocidad lineal o no lineal, de la siguiente manera:

Lineales	$F = \hat{C} V$
No lineales	$F = \hat{C} V^\alpha$

Donde  $\hat{C}$  es el coeficiente de amortiguamiento del disipador y  $\alpha$  es el exponente de amortiguamiento<sup>[6]</sup>. De manera esquemática, en la Figura 2, se presenta la respuesta del modelo numérico de un amortiguador viscosos no lineal sometido a cargas cíclicas dinámicas.

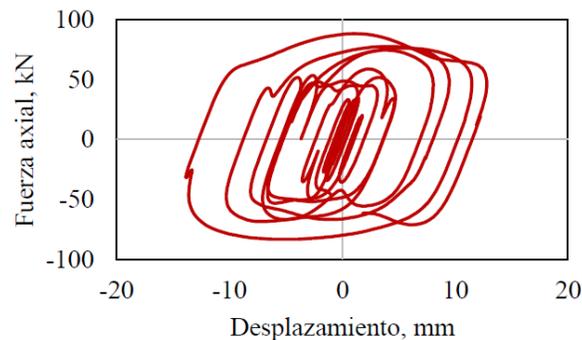


Figura 2. Respuesta típica de un amortiguador viscoso no lineal. Tomada de <sup>[7]</sup>.

Por otra parte, los disipadores de tipo viscoelásticos son mucho menos comunes y su comportamiento depende tanto de la frecuencia de excitación como de la temperatura a la que están expuestos<sup>[8,9]</sup>.

### 1.2.3. Contravientos restringidos al pandeo (CRP)

Como ya se mencionó antes, los CRP's (del inglés, *Buckling Restrained Braces*; *BRB's*) son disipadores de energía sísmica de tipo histerético, esto significa que se diseñan para disipar energía por medio de deformaciones inelásticas. Estos dispositivos comenzaron a desarrollarse a mediados de la década de 1970 y presentan un comportamiento mecánico más eficiente frente a solicitaciones sísmicas en comparación con los contravientos convencionales<sup>[10]</sup>.

En estructuras metálicas es usual utilizar contravientos como elementos rigidizadores. Estos elementos, conformados por perfiles metálicos esbeltos, tienen la desventaja de presentar pandeo frente a cargas de compresión. Lo anterior significa que, si una estructura rigidizada con contravientos convencionales es sometida a una excitación sísmica, las cargas laterales plastificarán a los contravientos al traccionarlos, pero provocarán su pandeo cuando estén a compresión. En la Figura 3 se muestra de manera esquemática la respuesta numérica de un contraviento convencional al ser sometido a cargas cíclicas dinámicas.

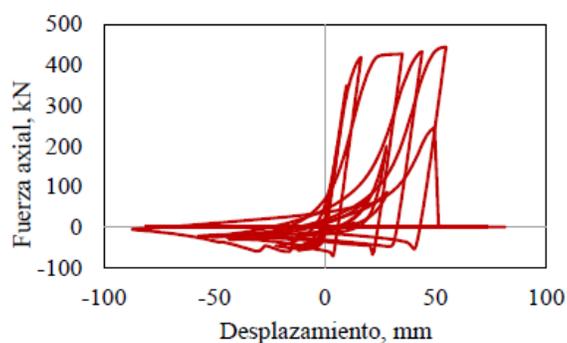


Figura 3. Respuesta típica de un contraviento convencional. Tomada de <sup>[7]</sup>.

Como se observa en la Figura 3, la resistencia a compresión de los contravientos es muy inferior a la de tracción, perdiendo estos elementos rigidez y resistencia al pandearse<sup>[11]</sup>. Adicionalmente, es importante señalar que la respuesta de los contravientos se caracteriza por tener un comportamiento histerético inestable, lo cual provoca que disipen energía de manera ineficiente.

Buscando subsanar las deficiencias antes mencionadas es que se comenzaron a desarrollar los disipadores de tipo CRP<sup>[12]</sup>. Los primeros trabajos de investigación sobre esta clase de disipadores se realizaron en Japón con el trabajo de Kimura et al.<sup>[13]</sup>, quienes estudiaron la respuesta de contravientos convencionales confinados por una carcasa metálica con mortero en su interior. La idea detrás el experimento era evitar el pandeo por medio del

confinamiento del contraviento, sin embargo, el elemento propuesto solo consiguió mantener unos pocos ciclos histeréticos estables<sup>[10]</sup>. Años después, a finales de la década de 1980, Watanabe et al.<sup>[14]</sup> propusieron un elemento similar, pero añadieron materiales antiadherentes en la interfase mortero – núcleo metálico.

Hoy en día, los CRP's son dispositivos que conservan las ideas presentadas por Kimura y Watanabe, siendo, en general, conformados por cuatro componentes básicos:

- Un núcleo metálico que concentra las deformaciones inelásticas.
- Las conexiones del elemento, que poseen un área transversal mayor a la del núcleo para asegurar un comportamiento elástico.
- Una carcasa metálica rellena de mortero que confina al núcleo y le permite fluir tanto a compresión como a tensión.
- Una película de material antiadherente alrededor del núcleo que evita la participación del mortero en la toma de esfuerzos axiales.

En la Figura 4 se presenta de manera esquemática un dissipador de tipo CRP, indicándose la ubicación de los componentes antes mencionados.

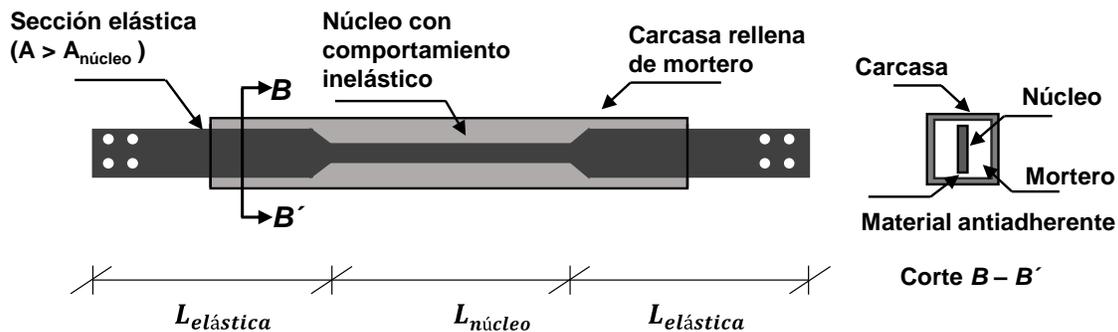


Figura 4. Esquema de un dissipador de tipo CRP.

De manera similar a los contravientos convencionales, los CRP's se instalan en estructuras por medio de conexiones articuladas<sup>[12]</sup>, pudiéndose éstos disponerse en forma de diagonales o en una configuración en Chevrón<sup>[15]</sup>. Las pruebas de laboratorio realizadas a esta clase de dissipadores han mostrado un comportamiento histerético estable y casi simétrico a compresión y tracción, siendo ligeramente mayor la resistencia a compresión debido al efecto Poisson<sup>[16]</sup>. En la Figura 5 se muestra la respuesta numérica de un dissipador de tipo CRP al ser sometido a cargas cíclicas dinámicas.

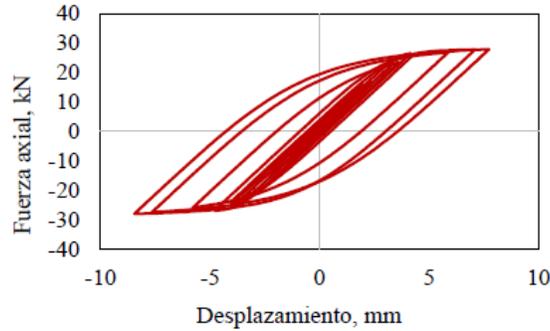


Figura 5. Respuesta típica de un CRP. Tomada de [7].

Múltiples trabajos de investigación se han publicado sobre el desempeño de estructuras con disipadores de tipo CRP. En general, se ha reportado que este es un sistema de protección económico y eficiente para controlar las distorsiones de entrepiso que se presentan durante un sismo<sup>[17]</sup>, sin embargo, algunos estudios indican que su uso también puede provocar un incremento de las distorsiones residuales<sup>[16]</sup>. Se considera que este problema se debe a la baja rigidez post – fluencia que presentan los disipadores, y se ha tratado de resolver de diferentes maneras como acortando la longitud del núcleo<sup>[16,18]</sup> o empleando materiales con memoria de forma<sup>[19]</sup>. En las subsecuentes secciones se abordará el tema de la rigidez y amortiguamiento que brindan estos dispositivos.

#### 1.2.4. Respuesta de los disipadores de tipo CRP

Los disipadores de tipo CRP proporcionan rigidez y amortiguamiento a las estructuras<sup>[20,21]</sup>, estas propiedades son principalmente dependientes de las características geométricas y mecánicas del núcleo. Considerando un disipador, como el mostrado en la Figura 4, la rigidez del elemento ( $K_{CRP}$ ), se determina por medio de la siguiente expresión<sup>[22]</sup>:

$$K_{CRP} = f_k \frac{A_c E}{L_w} \quad (5)$$

Donde  $L_w$  es la longitud total del CRP,  $E$  es el módulo de elasticidad del material del núcleo,  $A_c$  es el área transversal del núcleo y  $f_k$  es un factor de forma que puede ser estimado como<sup>[23]</sup>:

$$f_k = \frac{1}{\gamma + \eta(1 - \gamma)} \quad (6)$$

Donde  $\gamma$  es la relación entre la longitud del núcleo y la longitud total del CRP, y  $\eta$  es la relación entre el área transversal del núcleo y el área de las conexiones. Obsérvese que en el cálculo de  $R_{CRP}$  se desprecia la deformación a flexión del dissipador<sup>[24]</sup>. Considerando lo anterior, la rigidez lateral ( $K_L$ ) que el CRP proporcionaría a un nivel sería igual a<sup>[24]</sup>:

$$K_L = f_k \frac{A_c E}{L_w} \cos^2 \theta \quad (7)$$

Donde  $\theta$  es el ángulo de inclinación, tal como se muestra en la Figura 6.

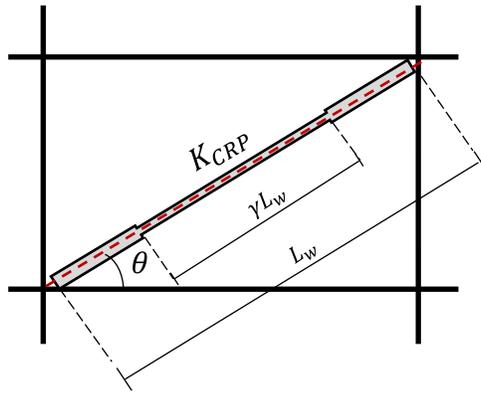


Figura 6. Rigidez lateral brindada por el CRP a un marco.

Aguaguña et al.<sup>[25]</sup> recopilaron los valores de diferentes parámetros de los CRP's reportados en diversas investigaciones, encontrando que el valor típico de  $\gamma$  se encuentra entre 0.5 – 0.7. Sin embargo, se han realizado investigaciones en una clase de dissipadores llamados CRP's de núcleo corto<sup>[16,18,26]</sup>, los cuales tienen una relación  $\gamma$  aún menores.

En los trabajos publicados no es típico reportar los valores empleados de la relación  $\eta$ , sin embargo, en los estudios numéricos realizados por Tremblay et al.<sup>[23]</sup> y Hoveidae et al.<sup>[18]</sup> se usaron valores entre 0.3 – 0.7.

En la Figura 7 se muestran graficados los valores del factor de forma  $f_k$  para valores de  $\gamma$  entre 0.15 a 0.85 y de  $\eta$  entre 0.3 a 0.7. Se observa que, para valores  $\gamma < 0.80$ , existe una mínima variación de  $f_k$  para los valores de  $\eta$  considerados. Adicionalmente, para valores bajos de  $\gamma$ , el CRP se vuelve más rígido lo cual también implica que estará sometido a mayores demandas<sup>[10,18]</sup>.

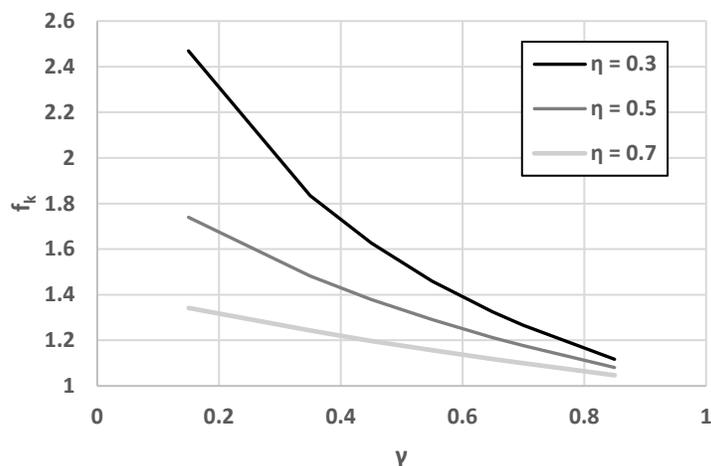


Figura 7. Valores de factor de forma  $f_k$  para distintos valores de  $\gamma$  y  $\eta$ .

En lo que respecta al amortiguamiento estructural, se ha demostrado que la capacidad de disipación de energía es inversamente proporcional a la relación  $\gamma$  [18,26]. Esto se debe a que los CRP's con núcleos cortos son menos susceptibles a desarrollar pandeo, por lo tanto, pueden desarrollar deformaciones mayores antes de presentarse la falla. Takeuchi et al. [27] presentan una recopilación de valores de deformación última reportados en ensayos de CRP's con diferentes características y patrones de carga, los cuales se muestran en la Figura 8. De los datos presentados, se observa que la capacidad de deformación última del núcleo de los CRP's varía en el rango de 0.1% a 7%, siendo además dependiente del historial de cargas.

Test	Specimen	Steel	Core plate	Thickness (mm)	Width (mm)	Length (mm)	Input $\varepsilon$ (%)	$\varepsilon_{max}$ (%)		$\overline{\Delta\varepsilon}_{ph}$ (%)
								Tens.	Comp.	
Constant amplitude fatigue test	100-150	LY100	-	25	100	960	1.5	0.76	-0.79	0.68
	100-016	LY100	-	25	100	960	0.16	0.10	-0.08	0.02
	100-040	LY100	-	25	100	960	0.4	0.21	-0.21	0.13
	100+150	LY100	+	25	100	1,180	1.5	0.73	-0.79	0.69
	400-200	SN400B	-	25	100	960	2	1.01	-0.99	0.82
	400-150	SN400B	-	25	100	960	1.5	0.78	-0.79	0.56
	235+150	LY225	+	16	100	470	4.3	2.11	-2.26	1.86
Shaking table test of component	235+150	LY225	-	28	100	470	4.5	2.21	-2.38	2.01
	El Centro	SS400	-	22	130	1,291	E.C. <sup>a</sup>	6.93	-3.10	0.33
Shaking table test	SS400-	SS400	-	16	60	1,200	kb,hc <sup>b</sup>	6.55	-5.99	0.51
BRB frame	LYP100	LY100	-	16	75	1,200	kb,hc <sup>b</sup>	5.16	-5.47	0.30
	LYP235	LY225	-	16	75	600	kb,hc <sup>b</sup>	6.98	-5.96	0.59
Component test under random amplitude record	M SS400-	SS400	-	16	60	1,200	kb,hc <sup>b</sup>	5.14	-5.46	0.49
	M LYP100	LY100	-	16	75	1,200	kb,hc <sup>b</sup>	2.51	-5.30	0.28
	M LYP235	LY225	-	16	75	600	kb,hc <sup>b</sup>	7.04	-5.94	0.71
Test with gradually increasing amplitude	TB-1	LY225	-	16	92	1,370	Normal	4.40	-3.64	1.94
	TAS-1	LY225	-	16	92	1,370	Normal	3.94	-3.93	2.04
	TAS-1'	LY225	-	16	92	1,370	Near field	3.60	-5.16	1.89
	TAS-2	LY225	-	16	58	1,610	Normal	3.15	-3.31	1.69
	TAS-2'	LY225	-	16	58	1,610	Near field	4.01	-4.12	1.61

<sup>a</sup>El Centro NS.

<sup>b</sup>JM A Kobe NS, Hachinohe NS.

Figura 8. Resultados de ensayos realizados a CRP's. Tomada de [27].

Tremblay et al.<sup>[23]</sup> presentan la siguiente ecuación para estimar la deformación última del núcleo, la cuál es dependiente de la geometría del núcleo y del material que lo compone:

$$\varepsilon_{cu} = \left[ \frac{R_d R_o}{I_E} \delta_{bf} - \eta (1 - \gamma) R_{sh} R_{yield} L_w \left( \frac{F_y}{E} \right) \right] \frac{1}{\gamma L_w} \quad (8)$$

Donde  $R_d$ ,  $R_o$  y  $I_E$  son los factores de ductilidad, de sobre resistencia y de importancia de la estructura, respectivamente, los cuales dependen de la normativa de cada país.  $R_{sh}$  es el factor de sobre resistencia debido al endurecimiento por deformación,  $R_{yield}$  es la relación entre el esfuerzo de fluencia real y el nominal del material ( $F_y$ ). Adicionalmente, el producto  $\gamma L_w$  es la longitud del núcleo y  $\delta_{bf}$  es la deformación axial bajo acciones sísmica, que se obtiene como<sup>[23]</sup>:

$$\delta_{bf} = \frac{\phi F_y}{E} L_w [\gamma + \eta (1 - \gamma)] \quad (9)$$

Donde  $\phi$  es el factor de resistencia ( $\phi = 0.9$ ). En la Figura 9 se presentan graficados los valores de  $\varepsilon_c$  para diferentes valores de  $\gamma$  y  $\eta$ . Para construir las curvas de consideró  $R_d = 4$ ,  $R_o = 1.2$ ,  $I_E = 1.0$ ,  $R_{sh} = 1.1$ ,  $R_{yield} = 1.1$ ,  $F_y = 350 \text{ MPa}$  y  $E = 200 \text{ GPa}$ .

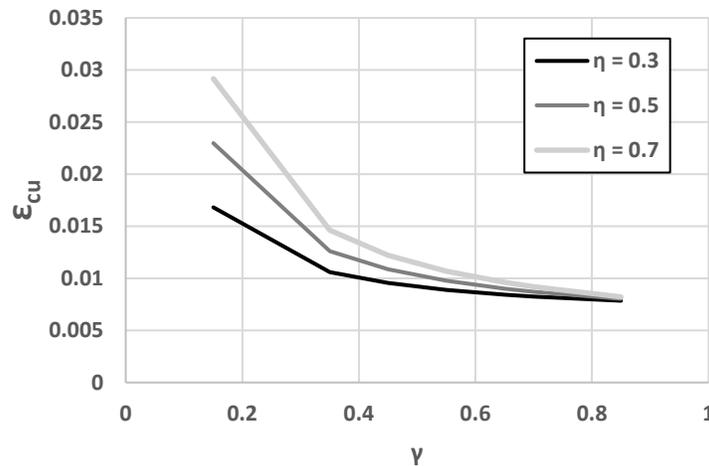


Figura 9. Valores según Tremblay et al.<sup>[23]</sup> de  $\varepsilon_c$  para distintos valores de  $\gamma$  y  $\eta$ .

Como se puede observar de la Figura 9, los valores estimados de  $\varepsilon_c$  varían de 0.8% a 3%, alcanzándose mayores deformaciones para relaciones bajas de  $\gamma$ . Lo anterior concuerda con la mayor capacidad de disipación de energía reportada para CRP's de núcleos cortos. Sin embargo, parecen ser valores muy conservadores al compararlos con los datos recopilados por Takeuchi et al.<sup>[27]</sup> (Obsérvese Figura 8).

De manera adicional a la falla del núcleo, los CRP's pueden presentar problemas de pandeo, tal como lo reportaron Takeuchi et al.<sup>[28]</sup> al ensayar especímenes en laboratorio. De los datos obtenidos en sus pruebas, se observó que los problemas de pandeo local se relacionan con la esbeltez de la carcasa y el espesor de la capa de mortero de relleno, aumentando la susceptibilidad al pandeo al disminuir el espesor de la capa de mortero. Esta relación fue verificada por AlHamaydeh et al.<sup>[10]</sup> al estudiar la respuesta de los CRP's por medio de modelos de elementos finitos. Adicionalmente, se ha demostrado que es posible evitar el pandeo del núcleo confinándolo parcialmente<sup>[29]</sup> o inclusive prescindiendo totalmente de la capa de mortero<sup>[30]</sup>, lo cual indica que es posible obtener un correcto confinamiento por medios muy diversos.

### **1.2.5. Diseño de estructuras con CRP's**

Como se explicó en (4), una parte de la energía inducida por el sismo en la estructura es tomada por los CRP's, esta característica permite considerar a los disipadores como “fusibles estructurales”, es decir, como elementos reemplazables diseñados para dañarse durante un sismo. Al reducir el daño recibido por la estructura y concentrarlo en los CRP's, las operaciones de rehabilitación se enfocan en el reemplazo de los disipadores, reduciendo tanto la pérdida de funcionalidad del edificio<sup>[20]</sup> como los costos generados a lo largo de su vida útil<sup>[31]</sup>.

Ventajas como las antes mencionadas, y a pesar de problemas como el incremento de las distorsiones residuales, han permitido no solo que se proyecten múltiples edificios con estos dispositivos, sino que también se utilicen como medida de rehabilitación o de refuerzo estructural, tanto en estructura metálica como de hormigón armado<sup>[17,20,24,32,33]</sup>.

Hoy en día se han propuestos múltiples métodos para diseñar edificios con CRP's. Como señala Urrego<sup>[33]</sup> y Barbagallo et al.<sup>[12]</sup>, es posible ver a las estructuras equipadas con CRP's como el ensamble de dos subsistemas: el conformado por los disipadores, el cual resiste las acciones sísmicas, y el conformado por las vigas y columnas, cuya función es tomar las acciones gravitatorias. Esta consideración permite dos enfoques de diseño distintos: mientras algunos métodos se limitan a considerar únicamente la participación de los disipadores en la toma de fuerzas sísmicas<sup>[34-36]</sup>, hay otros que toman en cuenta también la capacidad resistente de la estructura principal<sup>[24,33]</sup>.

Sin importar la forma en que se distribuyen las fuerzas sísmicas, los métodos de diseño abarcan diversas consideraciones y procedimientos. A continuación, se presenta un resumen de las características de los métodos consultados:

- Balling et al.<sup>[11]</sup> indican que es común utilizar el procedimiento de la Fuerza Lateral Equivalente, presentado en el FEMA 450<sup>[37]</sup> y el ASCE – 7<sup>[38]</sup>, para diseñar marcos con CRP's.
- Suctu et al.<sup>[17]</sup> plantean un método para estimar la curva de capacidad de una estructura equipada con CRP's, por medio a un oscilador equivalente de un grado de libertad.
- Kim et al.<sup>[34]</sup> proponen un método que solo toma en cuenta la participación de los CRP's. En este caso se utilizan el método del espectro de capacidad o del desplazamiento directo, propuesto en la ATC40<sup>[39]</sup>, para definir la fuerza actuante en los CRP's a un desplazamiento objetivo dado, posteriormente diseñan el sistema disipador en concordancia.
- Sahoo et al.<sup>[35]</sup> utilizan balances energéticos para proyectar estructuras con CRP's que cumplan con los objetivos de un diseño basado en desempeño.
- Terán et al.<sup>[24]</sup> presentan un método de diseño basado en desempeño y obtienen como resultado un periodo fundamental máximo que debe de presentar la estructura con CRP's para cumplir con los objetivos de diseño. Este método considera la participación del sistema de disipación y de la estructura principal.
- Guerrero et al.<sup>[22]</sup> propone estimar la respuesta de la estructura con CRP's por medio de un oscilador dual equivalente sometido a una serie de registros sísmicos. Este método se basa en el de Terán et al.<sup>[24]</sup> y también establece un periodo fundamental máximo para el cual se cumplen los objetivos de diseño.

Como se observa, muchos métodos propuestos tienen un enfoque basado en desempeño. Prestley et al.<sup>[40]</sup> indican que los diseños basados en desempeño son una alternativa a los métodos de diseño actuales basados en fuerza, donde los primeros le brindan una mayor relevancia a la capacidad de deformación que a la resistencia. Adicionalmente, estos métodos pueden tener alcances y objetivos muy variados, que van desde diseñar estructuras seguras bajo diferentes niveles de intensidad sísmica hasta combinar pérdidas económicas con riesgos aceptables.

Debido al enfoque que siguen los diseños basados en desempeño, se ha producido una reevaluación de diferentes aspectos del diseño sísmico, entre los que se encuentran<sup>[40]</sup>:

- Evaluación de la rigidez inicial de estructuras que responderán inelásticamente.
- Revisión de la información sísmica para dar demandas más apropiadas al diseño.
- Modelado del amortiguamiento elástico y desarrollo de ecuaciones del amortiguamiento viscoso equivalente.
- Desarrollo de metodologías para determinar momentos de diseño en elementos sometidos a fuerzas laterales.

Debido a que el método propuesto por Guerrero et al.<sup>[22]</sup> es un método basado en desempeño que además considera la participación tanto de la estructura principal como del sistema disipador, es utilizado posteriormente para diseñar un marco con CRP's que sirva de referencia para comparar los resultados obtenidos del proceso de optimización. Por tal motivo, a continuación se presenta una explicación detallada del mismo.

### 1.2.6. Método de diseño propuesto por Guerrero

El método desarrollado por Guerrero et al. se basa en el propuesto por Terán et al.<sup>[24]</sup> y emplea registros sísmicos procedentes del sitio donde se construirá el edificio para obtener una mejor estimación de la respuesta del sistema. Para estimar la respuesta estructural, se emplea un oscilador dual equivalente (ODE) que representa el ensamblaje de dos subsistemas: uno conformado por la estructura principal y el otro por los disipadores.

Es importante señalar que este método solo es válido para estructuras regulares y de baja altura, debido a que su respuesta se encuentra fuertemente influenciada por el modo fundamental de vibración. El ODE posee una masa  $m$ , una rigidez y coeficiente de amortiguamiento brindados por la estructura principal (denominados como  $k_1$  y  $c_1$ , respectivamente) y una rigidez y un amortiguamiento brindados por los disipadores (denominados como  $k_2$  y  $c_2$ , respectivamente). La Figura 10 muestra en esquema del ODE.

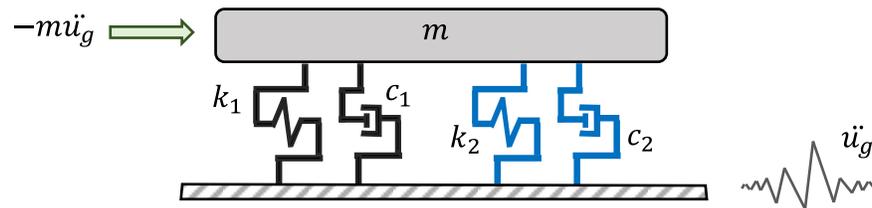


Figura 10. Oscilador dual equivalente (ODE). Adaptada de <sup>[22]</sup>.

Debido a que el ODE se compone de dos subsistemas, su curva de capacidad resulta de la combinación de las curvas de capacidad de ambos sistemas. En esta parte es importante indicar que un correcto diseño de un marco con CRP's implica que los disipadores plastifiquen antes que la estructura principal<sup>[22]</sup>, lográndose esto al proyectar un sistema disipador de mayor rigidez y menor resistencia que la estructura principal. En la Figura 11 se muestra de manera esquemática la curva de capacidad del ODE, donde  $V_{y1}$ ,  $V_{y2}$  y  $V_{yT}$  son el cortante de plastificación de la estructura principal, de los disipadores y del ODE, respectivamente;  $d_{y1}$  y  $d_{y2}$  son el desplazamiento de plastificación de la estructura principal y de los disipadores, respectivamente.

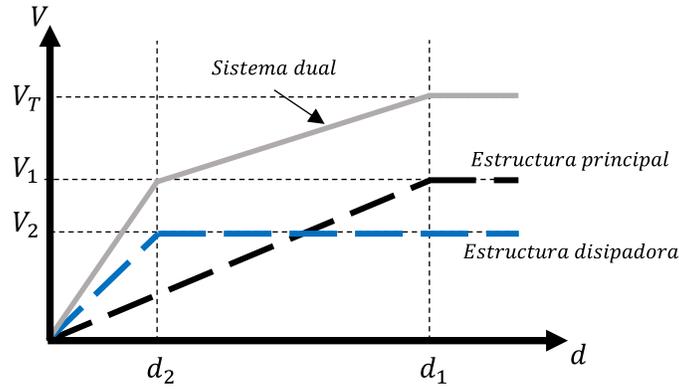


Figura 11. Curva de capacidad del ODE. Adaptada de [22].

Por simplificación, primero se expone el procedimiento para un sistema de un grado de libertad, extendiéndose posteriormente éste para sistemas de múltiples grados de libertad. Considerando un marco equipado con un CRP, como el mostrado en la Figura 12, el desplazamiento de plastificación del CRP ( $dy_2$ ) es igual a:

$$dy_2 = \frac{1}{f_k} \frac{f_y}{E} \frac{h}{\cos\theta \operatorname{Sen}\theta} \quad (10)$$

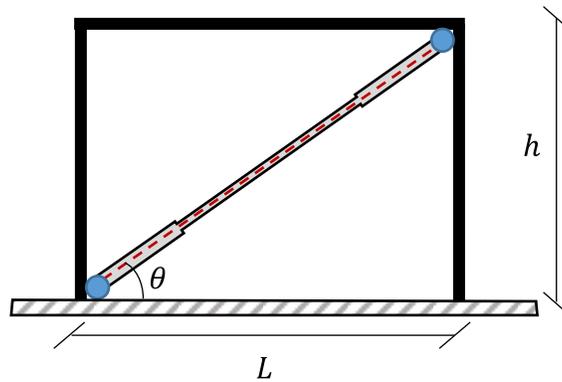


Figura 12. Sistema estructural conformado por la estructura principal y el disipador. Adaptada de [22].

Este método de diseño requiere que la estructura principal ya haya sido previamente definida, esto para conocer su cortante y desplazamiento de plastificación y su rigidez lateral ( $V_{y1}$ ,  $dy_1$  y  $k_1$  respectivamente). A las relaciones entre los cortantes de plastificación de cada subsistema y el cortante de plastificación del ODE se les denomina factores de capacidad de carga ( $b_1$ ,  $b_2$ ).

$$b_1 = \frac{Vy_1}{Vy_T} \qquad b_2 = \frac{Vy_2}{Vy_T} \qquad (11)$$

Los factores de capacidad de carga ( $b_i$ ) representan el grado de participación de cada subsistema en la toma de fuerzas sísmicas. Variando el valor de  $b_2$ , el proyectista puede definir el grado de participación de los CRP's que considere más conveniente. Debido a que  $b_1 + b_2 = 1$  y a que el resto de los valores son conocidos, es posible determinar la rigidez del sistema disipador  $k_2$  por medio de la relación de capacidad:

$$\frac{b_2}{b_1} = \frac{Vy_2}{Vy_1} = \frac{k_2 dy_2}{k_1 dy_1} \qquad (12)$$

Que también se puede reescribir de la siguiente forma:

$$\frac{dy_1}{dy_2} = \frac{k_2 b_1}{k_1 b_2} \qquad (13)$$

Al conocerse la rigidez lateral y el desplazamiento de fluencia de la estructura principal ( $k_1$  y  $dy_1$ , respectivamente) se procede a determinar  $k_2$  una vez que se ha definido la participación de los disipadores ( $b_2$ ).

$$k_2 = \frac{dy_1 k_1 b_2}{dy_2 b_1} \qquad (14)$$

Siendo conocida la rigidez del subsistema de los disipadores ( $k_2$ ), se procede a determinar su periodo ( $T_2$ ):

$$T_2^2 = \frac{k_1}{k_2} T_1^2 \qquad (15)$$

El periodo del oscilador dual equivalente ( $T$ ) se calcula como:

$$\frac{1}{T^2} = \frac{1}{T_1^2} + \frac{1}{T_2^2} \qquad (16)$$

Para considerar una respuesta no lineal del sistema, se estima la ductilidad de este cuando se presenta el máximo desplazamiento del oscilador ( $d_{max}$ ):

$$\mu_1 = \frac{d_{max}}{dy_1} \qquad \mu_2 = \frac{d_{max}}{dy_2} \qquad (17)$$

Con estos datos, se procede a resolver la ecuación de equilibrio dinámico del ODE al ser sometido a los registros de aceleraciones considerados, la cual se presenta a continuación<sup>[22]</sup>:

$$\ddot{u}(t) + 2(\xi_1 + \xi_2) \frac{2\pi}{T} \dot{u}(t) + \left[ \frac{f_{s1}(u, \dot{u})}{m} + \frac{f_{s2}(u, \dot{u})}{m} \right] = -\ddot{u}_g(t) \quad (18)$$

Para determinar las características del ODE de una estructura de múltiples grados de libertad se realiza un procedimiento similar. Como se considera que la estructura principal ha sido previamente diseñada, los parámetros de ésta se pueden determinar por medio de un análisis modal ( $T_1$ ) y un análisis estático no lineal ( $dy_1$ ). El desplazamiento máximo ( $d_{max}$ ) del ODE empleado para estimar la ductilidad del sistema se obtiene de Priestley<sup>[40]</sup>:

$$d_{max} = \frac{\sum_{i=1}^N m_i d_i^2}{\sum_{i=1}^N m_i d_i} \quad (19)$$

Donde  $N$  es el número de pisos,  $d_i$  y  $m_i$  son el desplazamiento lateral y la masa del  $i$ -ésimo nivel, respectivamente. Como existe un desplazamiento objetivo para cada nivel de desempeño considerado,  $d_i$  se determina por medio de los valores de distorsión máxima que le corresponden a cada nivel de desempeño. La aplicación de la ecuación (19) implica considerar una distribución uniforme en altura de las distorsiones de entrepiso, como es una simplificación poco realista, Terán et al.<sup>[24]</sup> indican que éstos deben de ser amplificados por los siguientes factores que dependen de la ductilidad del sistema:

Tabla 1. Factores de amplificación para considerar la no uniformidad en altura de las distorsiones de entrepiso, valores tomados de <sup>[24]</sup>.

Sistema	Ductilidad	Factor de amplificación
Con	$\mu < 2$	1.2
CRP's	$\mu > 2$	1.5
Sin	$\mu < 2$	1.5
CRP's	$\mu > 2$	2

Determinando la respuesta del ODE al ser sometido a diversos registros sísmicos, es que se puede obtener información estadística que permita una mejor estimación de la respuesta de la estructura con CRP's. Para comparar la respuesta estimada con los desplazamientos objetivo de cada nivel de desempeño, Guerrero et al.<sup>[22]</sup> indica que es posible

usar el valor medio de las respuestas más una desviación estándar, aunque cualquier otro criterio puede ser usado arbitrariamente.

Para asegurar el concepto de fusible estructural se debe de cumplir la condición  $\mu_2 > \mu_1$ <sup>[22]</sup>. Adicionalmente, no se recomienda usar valores demasiado altos de  $\mu_2$ , ya que de lo contrario se podrían presentar fallas en el elemento. Siguiendo lo reportado por Fahnestock et al.<sup>[41]</sup>, es posible tomar el criterio de  $\mu_2 < 10$ .

Al determinar el periodo que permite obtener una respuesta dentro de los límites establecidos para cada nivel de desempeño, se procede a definir las características de los CRP's que permiten alcanzar dicha rigidización. Para este proceso, se considera un marco de la estructura principal con elementos tipo barra que representan a los disipadores, el proyectista es libre de escoger la configuración que considere más conveniente. Posteriormente se analiza la estructura bajo la acción de cargas laterales proporcionales a las masas en cada nivel, las áreas de los núcleos de los disipadores tendrán la misma variación en altura que aquella presentada por las cargas axiales actuantes en los elementos tipo barra.

### **1.2.7. Recomendaciones de diseño**

Ruiz<sup>[6]</sup> brinda una serie de recomendaciones para el diseño de estructuras equipadas con disipadores de energía sísmica, donde indica que el proyectista debe de garantizar un comportamiento elástico de las conexiones, recomendándose que éstas resistan por lo menos un 20% más de fuerza que aquellas que reciben los disipadores. Por su parte, el ASCE 41 – 17<sup>[5]</sup> pide que las conexiones empleadas sean articuladas, esto para permitir desplazamientos longitudinales laterales y verticales simultáneamente.

La distribución de los CRP's en las estructuras es un tema de gran importancia ya que arreglos inadecuados pueden generar la aparición de fuerzas cortantes indeseables o efectos de torsión en la estructura<sup>[6]</sup>. Por su parte, Terán et al.<sup>[24]</sup> indican que concentrar los disipadores en un solo vano proporciona un diseño poco seguro debido a una falta de redundancia. Sobre este tema, el ASCE 41 – 17<sup>[5]</sup> indica que en cada nivel de la estructura debe haber, por lo menos, 4 disipadores en cada dirección principal, colocando como mínimo 2 a cada lado del centro de rigidez de la planta. Adicionalmente, el ASCE 41 – 17 también permite la posibilidad de instalar una cantidad menor de dispositivos, pero éstos deben de cumplir con requerimientos de resistencia más estrictos para brindar un mayor margen de seguridad contra su fallo.

Cuando se utilicen análisis dinámicos no lineales para evaluar los diseños propuestos, el ASCE 41 – 17 indica no utilizar un amortiguamiento mayor al 3% y, como mínimo, 7 pares de registros sísmicos deben ser empleados. Sobre este tema, las NTC<sup>[42]</sup> solicitan usar un número de registros sísmicos que depende del periodo de vibración del suelo. Ambas normativas señalan que los registros empleados deben escalarse de tal manera que la media de sus espectros de respuesta cubra al espectro elástico correspondiente al sitio, en un intervalo que es función del periodo fundamental de la estructura ( $T$ ). Mientras que el ASCE 41 – 17 presenta el intervalo  $0.2T - 1.5T$ , las NTC piden esta condición para  $0.2T$  y  $1.3T$ . La razón de este intervalo es considerar el alargamiento del periodo por procesos no lineales y la participación de modos superiores en la respuesta de la estructura<sup>[42]</sup>.

Adicionalmente, Ruiz<sup>[6]</sup> indica que la masa de los disipadores es despreciable en la mayoría de los casos. Por último, Sarno et al.<sup>[21]</sup> indican que las demandas en la cimentación se ven incrementadas al instalarse disipadores de tipo CRP. Por lo tanto, es importante tener en cuenta este efecto al momento de plantear la rehabilitación de un edificio.

### 1.3. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS

En el diseño y refuerzo de estructuras, utilizando métodos basados en desempeño, existen dos elementos esenciales: capacidad y demanda. La capacidad representa la cualidad de la estructura para resistir acciones sísmicas mientras que la demanda es la acción sísmica a resistir<sup>[39]</sup>.

Existen diversas maneras de evaluar el comportamiento de estructuras frente acciones sísmicas (p. ej. el método del coeficiente de desplazamiento (FEMA – 273)<sup>[43]</sup> o el método secante (COLA 1995)<sup>[44]</sup>), sin embargo, el presente trabajo se enfocó en la metodología conocida como método del espectro de capacidad (MEC) mejor conocido como *Capacity Spectrum Method* (CSM) (ATC – 40)<sup>[39]</sup>. EL MEC evalúa el desempeño sísmico de una estructura por medio de su espectro de capacidad (EC) el cual, al interceptar el espectro de demanda reducido (EDR), brinda un estimado del desplazamiento máximo de la estructura bajo la acción sísmica. A la intersección entre ambos espectro se conoce como punto de desempeño (PD).

#### 1.3.1. Espectro de capacidad

La capacidad de una estructura depende de la resistencia y deformabilidad de los diferentes elementos que la componen<sup>[39]</sup>. En el MEC, se representa la capacidad de una

estructura por medio de su espectro de capacidad (EC), el cual se deriva de la curva de capacidad (CC), o *Pushover*, de la estructura analizada. La curva de capacidad brinda un estimado de la respuesta de la estructura frente acciones horizontales una vez que ésta ha sobrepasado su límite elástico, existiendo diferentes métodos para obtenerla.

Para elaborar la curva de capacidad de una estructura es necesario aplicar pequeños incrementos de fuerzas laterales en cada uno de sus niveles hasta que la estructura presente problemas de inestabilidad o se alcance un límite preestablecido. Existen diferentes criterios para definir la ley de variación en altura de los incrementos de las fuerzas horizontales aplicadas (p. ej. proporcionales a la altura del nivel; proporcionales al modo fundamental de vibrar de la estructura, etc.). Es importante indicar que las cargas gravitatorias deben ser tomadas en cuenta durante todo el análisis. En cada paso del análisis se deben de registrar los desplazamientos laterales de la azotea y el cortante basal de la estructura. La curva *Pushover* se obtiene graficando los desplazamientos registrados en el eje de las abscisas y el cortante basal en el eje de las ordenadas. Una forma alternativa de presentar la curva de capacidad es normalizando el cortante basal ( $V$ ) con respecto al peso total de la estructura ( $W$ ). En la Figura 13 se muestra una representación de una curva de capacidad.

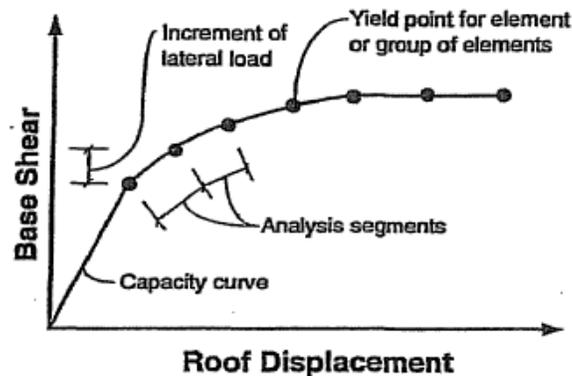


Figura 13. Ejemplo de curva de capacidad. Tomada de <sup>[39]</sup>.

La finalidad de obtener el espectro de capacidad es mostrar la información de la curva de capacidad en coordenadas espectrales aceleración – desplazamiento ( $S_a - S_d$ ). La ventaja de esta presentación es que los espectros de respuesta pueden ser graficados en el mismo sistema de coordenadas, conociéndose, en dicho formato, como espectros de demanda. La representación gráfica conjunta de los espectros de capacidad y demanda permite una comparación directa entre la capacidad de la estructura y la demanda sísmica. En la Figura 14 se muestran de manera esquemática un espectro de capacidad y el espectro de demanda, graficados de manera conjunta.

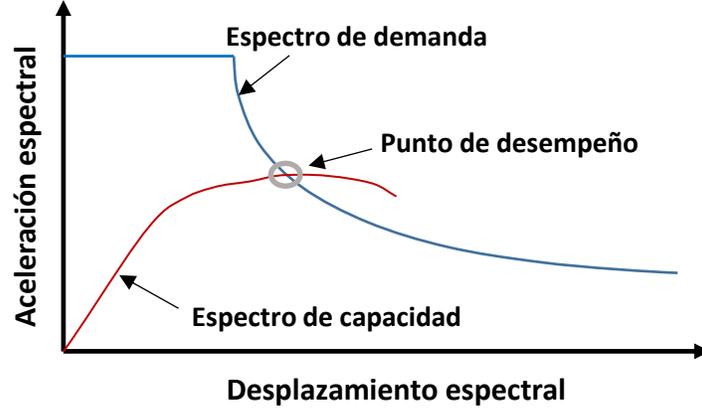


Figura 14. Intersección entre los espectros de capacidad y demanda.

### 1.3.2. Conversión de la curva de capacidad en el espectro de capacidad

Los puntos del espectro de capacidad se encuentran en el dominio aceleración ( $S_a$ ) – desplazamiento ( $S_d$ ). La relación entre el cortante basal normalizado ( $V/W$ ) y  $S_a$ , así como entre el desplazamiento de la azotea ( $\Delta_{roof}$ ) y  $S_d$  se muestra a continuación.

$$S_a = \frac{V/W}{\alpha_1} \quad (20)$$

$$S_d = \frac{\Delta_{roof}}{PF_1 \cdot \phi_{roof,1}} \quad (21)$$

Donde  $\phi_{roof,1}$  es la amplitud del modo fundamental de vibración en el nivel de la azotea,  $\alpha_1$  es el coeficiente de masa modal del modo fundamental y  $PF_1$  es el factor de participación modal del modo fundamental, siendo los últimos dos obtenidos de la siguiente manera:

$$PF_1 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1})}{\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1}^2)} \right] \quad (22)$$

$$\alpha_1 = \frac{[\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1})]^2}{[\sum_{i=1}^N (w_i)] [\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1}^2)]} \quad (23)$$

### 1.3.3. Espectro de demanda

Los espectros de demanda se derivan de los espectros de respuesta elástica. Los espectros de respuesta representan la envolvente de la respuesta máxima de osciladores

lineales, considerando un amortiguamiento igual al 5% con respecto al crítico, sometido a diversos registros sísmicos. Estos espectros están conformados por puntos que asocian aceleraciones máximas ( $S_a$ ) con periodos fundamentales ( $T$ ). En la Figura 15 se muestra un ejemplo de un espectro de respuesta.

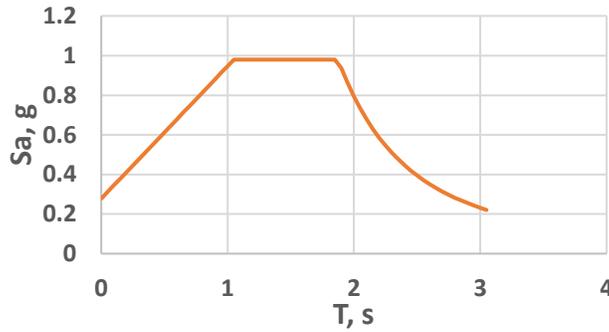


Figura 15. Ejemplo de un espectro de respuesta elástica.

Empleando las relaciones entre pseudo aceleración – pseudo velocidad – desplazamiento máximo se construye el espectro de demanda, en el cual está representada la demanda sísmica en el dominio aceleración – desplazamiento.

$$S_a \cdot g = \omega \cdot S_v = \omega^2 \cdot S_d \quad (24)$$

Donde  $S_a$  es aceleración espectral, como fracción de la gravedad ( $g$ ),  $S_v$  es la velocidad espectral,  $S_d$  es el desplazamiento espectral y  $\omega$  es la frecuencia fundamental de vibración de la estructura.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (25)$$

En base a lo anterior, la relación entre  $S_a$  y  $S_d$  queda establecida de la siguiente manera:

$$S_d = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 S_a \cdot g \quad (26)$$

En los espectros de demanda es posible representar los periodos asociados a las respuestas por medio de rectas cuyo origen es el centro de coordenadas. Para cada punto del espectro, el periodo fundamental  $T$  se obtiene por medio de la siguiente relación:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{S_d}{S_a \cdot g}} \quad (27)$$

### 1.3.4. Espectro de demanda reducido

Una estructura en vibración disipa la energía introducida por dos medios: el amortiguamiento viscoso y el amortiguamiento hysterético. El primero es inherente a la estructura misma y ocurre por diferentes causas, las cuales pueden ser la fricción interna de los elementos al ser deformados, fricción entre elementos estructurales y contenidos, la aparición de micro fisuras en el hormigón, entre otros<sup>[3]</sup>. Por otra parte, el amortiguamiento hysterético es la disipación de energía cuando los elementos estructurales se deforman más allá de su intervalo elástico. En una estructura sometida a un movimiento sísmico, el amortiguamiento hysterético se relaciona con el área encerrada, por lo ciclos formados, al graficar el cortante basal contra el desplazamiento de la estructura<sup>[39]</sup>. Debido a que los espectros de respuesta se construyen considerando un amortiguamiento viscoso del 5% con respecto al crítico, es necesario introducir el amortiguamiento hysterético, producido por las deformaciones inelásticas, que se pudieran presentar durante el evento sísmico. Para realizar esto, primero se debe construir una representación bilineal del espectro de capacidad.

Como su nombre lo indica, la representación bilineal es una simplificación del espectro de capacidad formada por dos rectas. Tres puntos son requeridos para elaborar dichas rectas: el origen de coordenadas (0,0), el punto de fluencia de la estructura ( $d_y, a_y$ ) y el punto de desempeño estimado ( $d_{pi}, a_{pi}$ ). En la Figura 16 se muestra de manera esquemática el espectro de capacidad con su respectiva representación bilineal.

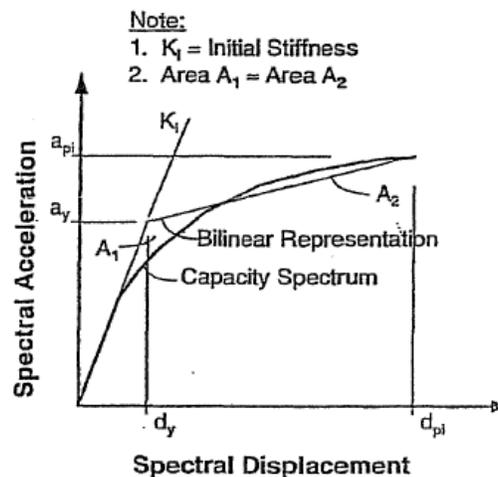


Figura 16. Espectro de capacidad y representación bilineal. Tomada de <sup>[39]</sup>.

La representación bilineal del espectro de capacidad debe de cumplir con dos condiciones para ser válida: la pendiente de la primera recta debe tener la rigidez inicial de la estructura y, las áreas  $A_1$  y  $A_2$  deben ser aproximadamente iguales. El objetivo de igualar

ambas áreas es asegurar que tanto el área por debajo como por arriba del espectro de capacidad sean también iguales, esto es, que la energía asociada al espectro de capacidad sea la misma a la asociada a su representación bilineal<sup>[39]</sup>.

El amortiguamiento histerético puede ser representado como amortiguamiento viscoso empleando las ecuaciones correspondientes. Conocida la energía disipada por el amortiguamiento histerético cuando la estructura se deforma hasta el punto de desempeño estimado, es posible calcular el amortiguamiento viscoso equivalente ( $\beta_{eq}$ ), el cual considera el amortiguamiento viscoso inherente a la estructura ( $\beta$ ) y el amortiguamiento histerético representado como amortiguamiento viscoso ( $\beta_o$ ). Recordando que los espectros de respuesta elásticos consideran un amortiguamiento viscoso inherente igual al 5% con respecto al crítico ( $\beta = 0.05$ ), se tiene:

$$\beta_{eq} = \beta_o + 0.05 \quad (28)$$

El amortiguamiento  $\beta_o$  puede ser calculado como<sup>[3]</sup>:

$$\beta_o = \frac{1}{4\pi} \frac{E_d}{E_{so}} \quad (29)$$

Donde  $E_D$  es la energía disipada por amortiguamiento y  $E_{so}$  es la máxima energía de deformación. Estos términos se expresan gráficamente en la Figura 17.

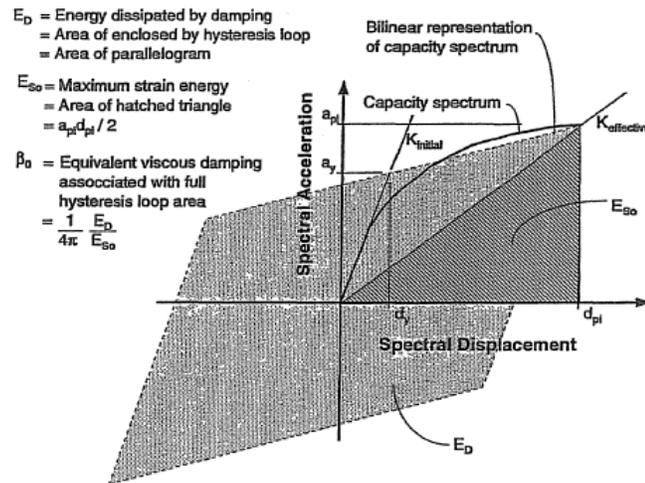


Figura 17. Derivación del amortiguamiento para la reducción espectral. Tomada de <sup>[39]</sup>.

El procedimiento mostrado a continuación para calcular el amortiguamiento  $\beta_o$  se tomado de la ATC - 40<sup>[39]</sup>. En las Figura 18 se pueden observar gráficamente los términos mostrados.

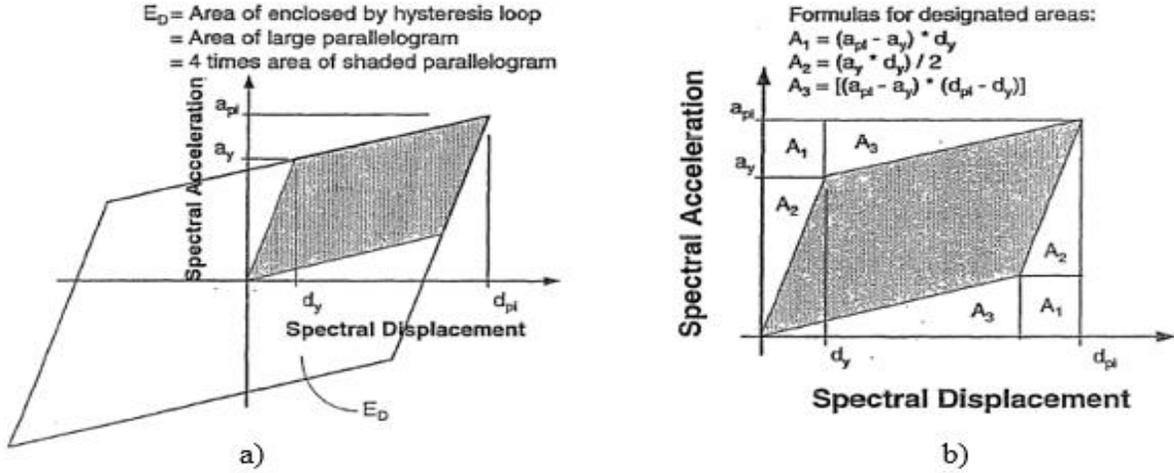


Figura 18. Derivación de la energía disipada por  $E_D$ . Tomada de [39].

$$E_D = 4 \cdot \text{área sombreada de la Figura 26 a)}$$

$$E_D = 4 (a_{pi}d_{pi} - 2A_1 - 2A_2 - 2A_3) \quad (30)$$

$$E_D = 4 \left[ a_{pi}d_{pi} - 2(a_{pi} - a_y) \cdot d_y - \frac{2(a_y d_y)}{2} - 2 \left( \frac{(a_{pi} - a_y)(d_{pi} - d_y)}{2} \right) \right] \quad (31)$$

$$E_D = 4 [a_{pi}d_{pi} - 2d_y(a_{pi} - a_y) - a_y d_y - (d_{pi} - d_y)(a_{pi} - a_y)] \quad (32)$$

$$E_D = 4(a_y d_{pi} - d_y a_{pi}) \quad (33)$$

De la Figura 18 b),  $E_{so}$  es igual a:

$$E_{so} = K_{effective} \cdot \frac{d_{pi}^2}{2} = \frac{a_{pi}d_{pi}}{2} \quad (34)$$

Por lo tanto, el amortiguamiento  $\beta_o$  es igual a:

$$\beta_o = \frac{1}{4\pi} \frac{4(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi}d_{pi}/2} = \frac{2}{\pi} \frac{a_y d_{pi} - d_y a_{pi}}{a_{pi}d_{pi}} = 0.637 \frac{a_y d_{pi} - d_y a_{pi}}{a_{pi}d_{pi}} \quad (35)$$

Escribiéndolo en términos de porcentaje con respecto al amortiguamiento crítico:

$$\beta_o = 63.7 \frac{a_y d_{pi} - d_y a_{pi}}{a_{pi}d_{pi}} \quad (36)$$

Por lo tanto, el amortiguamiento viscoso equivalente ( $\beta_{eq}$ ) es igual a:

$$\beta_{eq} = \beta_o + 5 = 63.7 \frac{a_y d_{pi} - d_y a_{pi}}{a_{pi} d_{pi}} + 5 \quad (37)$$

Conocido el amortiguamiento equivalente ( $\beta_{eq}$ ) para el punto de desempeño estimado, es posible reducir el espectro de respuesta elástico por medio de los factores de reducción espectral ( $SR_A, SR_V$ ). Las ecuaciones necesarias para determinar los factores de reducción espectral fueron desarrolladas por Newmark y Hall<sup>[45]</sup> y son consistentes con factores similares presentados en códigos de aislamiento sísmico y en guías del FEMA para amortiguamientos menores al 25% con respecto al crítico<sup>[39]</sup>. Los comités que elaboraron dichos documentos establecieron dos lineamientos basándose en su juicio profesional: cuando el amortiguamiento viscoso equivalente ( $\beta_{eq}$ ) es mayor al 50% con respecto al crítico deja de producir reducciones en los factores de reducción espectral ( $SR_A, SR_V$ ); y los factores de reducción espectral tiene un incremento cada vez menor cuando el amortiguamiento  $\beta_{eq}$  es mayor al 25% con respecto al crítico.

Buscando la concordancia con las conclusiones arriba presentadas, la ATC – 40 introduce el termino de amortiguamiento viscoso efectivo ( $\beta_{eff}$ ), el cual considera un factor de modificación del amortiguamiento ( $\kappa$ ) que limita el crecimiento del amortiguamiento  $\beta_o$ .

$$\beta_{eff} = \kappa \beta_o + 5 \quad (38)$$

El factor  $\kappa$  es una medición de la similitud entre el ciclo histerético real del edificio y el paralelogramo mostrado en la Figura 18<sup>[39]</sup>. En la ATC – 40, el factor  $\kappa$  se asigna en función del amortiguamiento histerético representado como viscoso ( $\beta_o$ ) y del tipo de comportamiento estructural esperado. Se definen tres tipos de comportamiento: Tipo A, Tipo B y Tipo C. El Tipo A indica una fuerte similitud con el ciclo histerético presentado en la Figura 18, el Tipo B representa una reducción moderada del área encerrada por los ciclos histerético, mientras que el Tipo C representa una reducción considerable del área encerrada.

La ATC – 40 indica que la selección del tipo de comportamiento estructural puede basarse, pero no exclusivamente, en dos factores: la duración del sismo y la calidad de los elementos estructurales que resistirán el sismo. Esto se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Tipos de comportamientos estructurales. Adaptada de <sup>[39]</sup>.

Duración del sismo	Edificio esencialmente nuevo	Edificio existente promedio	Edificio existente y deficiente
Corto	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Largo	Tipo B	Tipo C	Tipo C

La relevancia de los criterios mostrados se explica detalladamente en la referencia indicada<sup>[39]</sup> y se brinda de manera resumida a continuación. En la Tabla 2, los edificios esencialmente nuevos representan estructuras con elementos sin algún tipo de degradación, capaces de resistir a las cargas laterales aplicadas por el sismo; mientras que los edificios deficientes son aquellos cuyo comportamiento histerético es desconocido, inestable o se espera una degradación de algún nivel. Por otra parte, la duración de los sismos depende de la cercanía a la fuente sísmica, cuando ésta es cercana se esperan sismos de corta duración, mientras que, al ser lejana, la duración de los sismos se incrementa. La duración del evento sísmico es un factor de relevancia debido a que los sismos cortos producen una reducida cantidad de ciclos histeréticos y, por lo tanto, una ligera degradación de la ductilidad. En el caso contrario, los sismos de larga duración producen demandas menores, pero incrementan la posibilidad de degradación de los elementos estructurales.

Como se mencionó antes, el factor  $\kappa$  depende del tipo de comportamiento estructural y del amortiguamiento  $\beta_o$ . Los valores correspondientes de  $\kappa$  se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores del factor de modificación del amortiguamiento,  $\kappa$ . Adaptada de <sup>[39]</sup>.

<b>Tipo de comportamiento estructural</b>	<b>Amortiguamiento <math>\beta_o</math></b>	<b>Factor de modificación del amortiguamiento, <math>\kappa</math></b>
Tipo A	$\leq 16.25$	1.0
	$> 16.25$	$1.13 - \frac{0.51(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}}$
Tipo B	$\leq 25.0$	0.67
	$> 25.0$	$0.845 - \frac{0.446(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}}$
Tipo C	Cualquier valor	0.33

Los valores de  $\kappa$  se graficaron en la Figura 19 para tener una mejor comprensión de su variación en función del amortiguamiento  $\beta_o$ . Se observa que  $\kappa$  disminuye de manera lineal para los Tipos A y B, generándose dos rectas que nunca se intersecan.

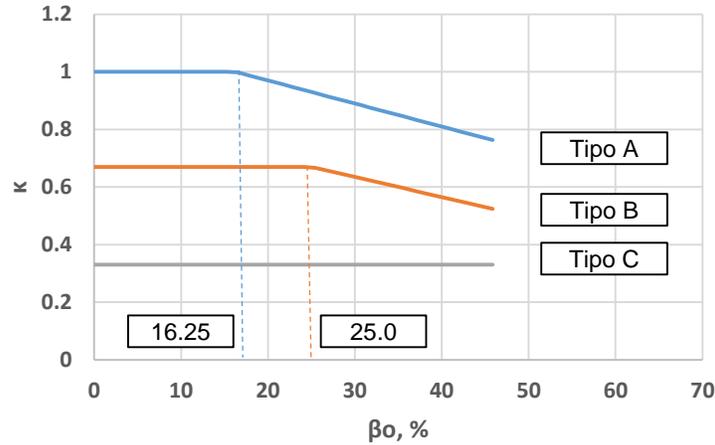


Figura 19. Valores de  $\kappa$  en función de  $\beta_o$ .

Los factores de reducción espectral son dados por las siguientes ecuaciones y sus valores no deben ser menor a aquellos mostrados por la Tabla 4.

$$SR_A = \frac{3.21 - 0.68 \ln(\beta_{eff})}{2.12} \quad (39)$$

$$SR_V = \frac{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{eff})}{1.65} \quad (40)$$

Tabla 4. Valores mínimos para  $SR_A$  y  $SR_V$ . Adaptada de <sup>[39]</sup>.

Tipo de comportamiento estructural	$SR_A$	$SR_V$
Tipo A	0.33	0.50
Tipo B	0.44	0.56
Tipo C	0.56	0.67

En la Figura 20 y 21 se muestran los valores de  $SR_A$  y  $SR_V$  graficados en función el amortiguamiento  $\beta_o$ , las gráficas se construyeron considerando los valores mínimos mostrados en la Tabla 4. Se observa que el amortiguamiento  $\beta_o$  tiene un valor máximo igual a 45% con respecto al crítico, esto para un comportamiento estructural de Tipo A.

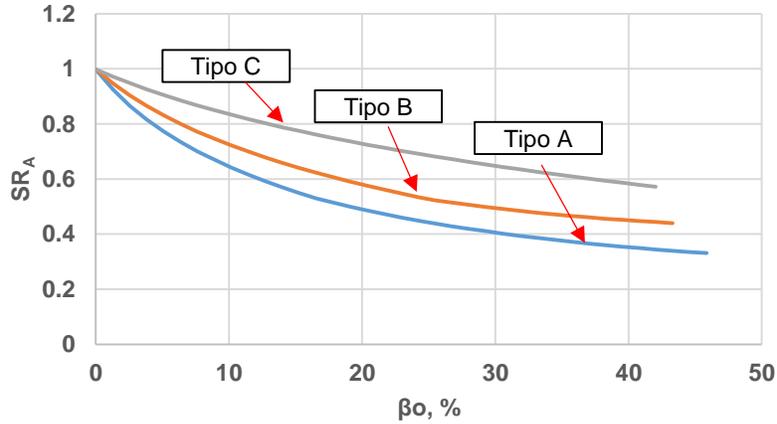


Figura 20. Valores de  $SR_A$  en función de  $\beta_o$ .

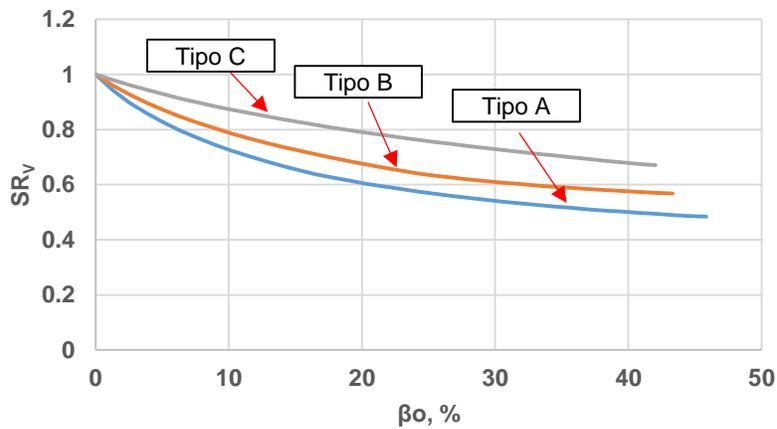


Figura 21. Valores de  $SR_V$  en función de  $\beta_o$ .

Adicionalmente, en la Figura 22 se graficaron los valores de  $\kappa$  en función del amortiguamiento viscoso efectivo ( $\beta_{eff}$ ). De esta figura se observa que, respetando los mínimos mostrados en la Tabla 4, el mayor valor posible para el amortiguamiento  $\beta_{eff}$  es igual al 40% con respecto al crítico. Esto es, un amortiguamiento  $\beta_{eff}$  igual al 40% con respecto al crítico, para una estructura con comportamiento Tipo A, produce factores de reducción espectral  $SR_A = 0.33$  y  $SR_V = 0.50$ . El valor máximo de  $\beta_{eff} = 40\%$  está en concordancia con el criterio de que amortiguamientos  $\beta_{eq} > 50\%$  dejan de producir reducciones en los espectros de respuesta.

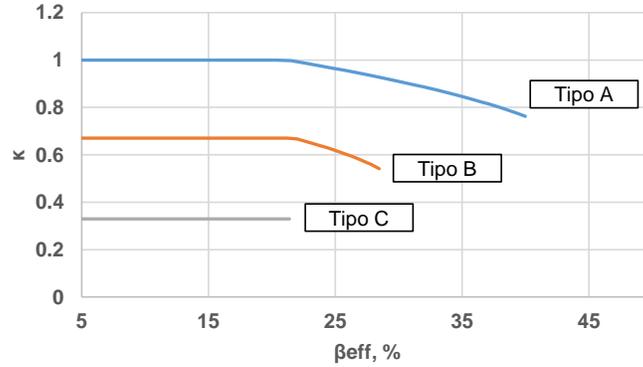


Figura 22. Valores de  $\kappa$  en función de  $\kappa\beta_0$ .

Multiplicando los factores de reducción espectral ( $SR_A, SR_V$ ) con los valores correspondientes de las coordenadas del espectro de respuesta ( $S_a, S_d$ ) es como se obtiene el espectro de respuesta reducido. Como se puede observar en la Figura 23, los factores de reducción espectral generan un espectro de respuesta que considera un amortiguamiento mayor al 5% con respecto al crítico.

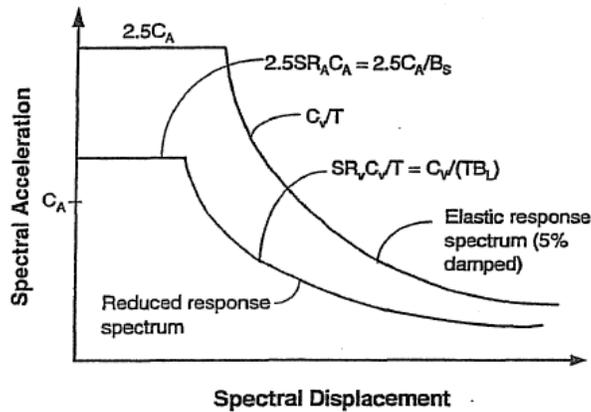


Figura 23. Espectro de respuesta reducido. Tomado de <sup>[39]</sup>.

### 1.3.5. Punto de desempeño

El punto de desempeño representa el máximo desplazamiento estructural esperado para la demanda sísmica, y gráficamente representa la intersección de los espectros de capacidad y de demanda reducido<sup>[39]</sup>. De aquí en adelante el punto de intersección de los espectros se identificará con las coordenadas  $(a_i, d_i)$ . Como se indicó anteriormente, para construir el espectro de demanda reducido es necesario obtener una representación bilineal del espectro de capacidad, en dicho proceso se estima un punto el punto de desempeño y se le denomina  $(a_{pi}, d_{pi})$ . Para que el punto de desempeño sea correctamente determinado, éste debe cumplir la siguiente condición:  $0.95d_{pi} \leq d_i \leq 1.05 d_{pi}$ . Una representación de esto se muestra en la Figura 24.

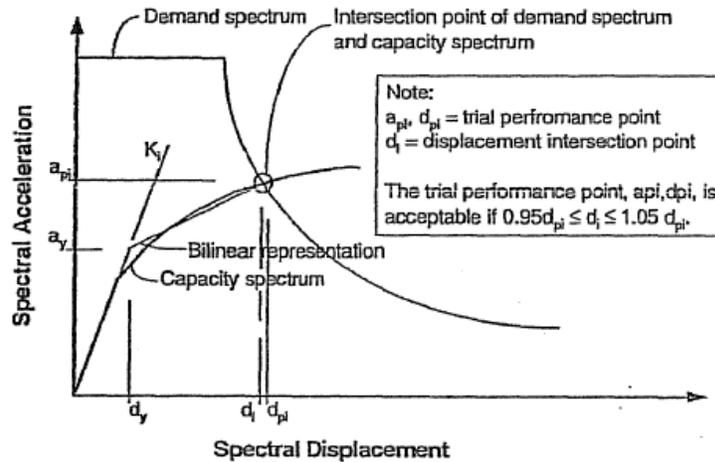


Figura 24. Tolerancia del punto de desempeño. Tomado de [39].

En el caso de que no se cumpla la tolerancia arriba especificada, será necesario proponer un nuevo punto estimado de desempeño ( $a_{pi}, d_{pi}$ ) y repetir el proceso para determinar el espectro de respuesta reducido, así hasta obtener un punto de intersección ( $a_i, d_i$ ) válido. Debido a lo anterior, el MEC resulta ser un proceso iterativo. Cuando el punto ( $a_{pi}, d_{pi}$ ) cumple con la tolerancia indicada, éste se vuelve el punto de desempeño.

El espectro de demanda es un elemento clave en la evaluación del desempeño sísmico de una estructura por medio del Método del Espectro de Capacidad, sin embargo, la construcción de éste puede variar en función de la normativa empleada. Debido a esto, a continuación se analizan los espectros de demanda originados por las metodologías propuestas en la ATC – 40 y en las Normas Técnicas Complementarias de la Ciudad de México [42].

### 1.3.6. Espectros de respuesta elástica según las NTCDS – CDMX

En la Ciudad de México, las normas que establecen los lineamientos de diseño y criterios de seguridad de las estructuras de edificación son las Normas Técnicas Complementarias [42]. En esta normativa se presentan las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTCDS), las cuales deben ser acatadas en el diseños sísmico de edificios, naves industriales y estructuras similares ubicadas en la Ciudad de México. Debido a las condiciones singulares del subsuelo de la Ciudad de México, las NTCDS dividen a la región en tres zonas sísmicas: Zona 1 o de lomas, zona II o de transición y zona III o del lago. La Figura 25 muestra la zonificación establecida.

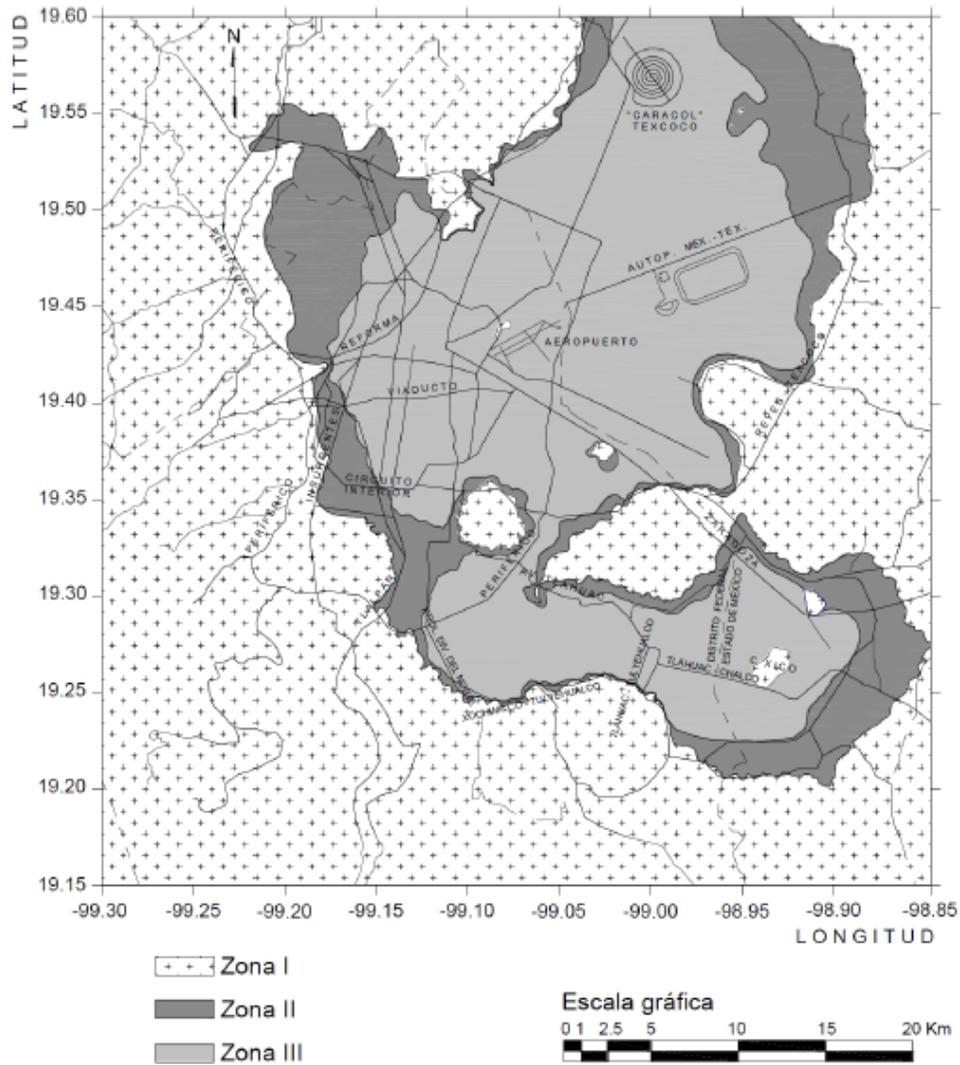


Figura 25. Zonificación geotécnica de la Ciudad de México. Tomado de [42].

Con anterioridad, las NTC empleaban la zonificación geotécnica para que los proyectistas elaborasen los espectros de respuesta en función de los parámetros propios de cada zona, sin embargo, actualmente los espectros de diseño deben de obtenerse del programa SASID<sup>[46]</sup>. El SASID es una base de datos en la cual, al introducir las coordenadas donde se ubicará el inmueble a analizar, brinda los espectros de respuesta y de diseño correspondientes. En las Figuras 26 – 29 se muestran los espectros de diferentes sitios obtenidos por medio del SASID con sus respectivas coordenadas. Es importante indicar que las ordenadas, tanto los espectros de peligro uniforme como de diseño, se encuentran asociadas un periodo de retorno de no menos de 250 años<sup>[42]</sup>.

Adicionalmente, el SASID brinda los espectros de diseño para diferentes valores del factor de comportamiento sísmico ( $Q$ ), que tiene como función el limitar las demandas de ductilidad y es dependiente del sistema estructural analizado. El factor  $Q$  es empleado para calcular el factor de reducción de comportamiento sísmico ( $Q'$ ), tal como se indica en la referencia indicada <sup>[42]</sup>, siendo  $Q'$  el utilizado para reducir las ordenadas del espectro elástico.

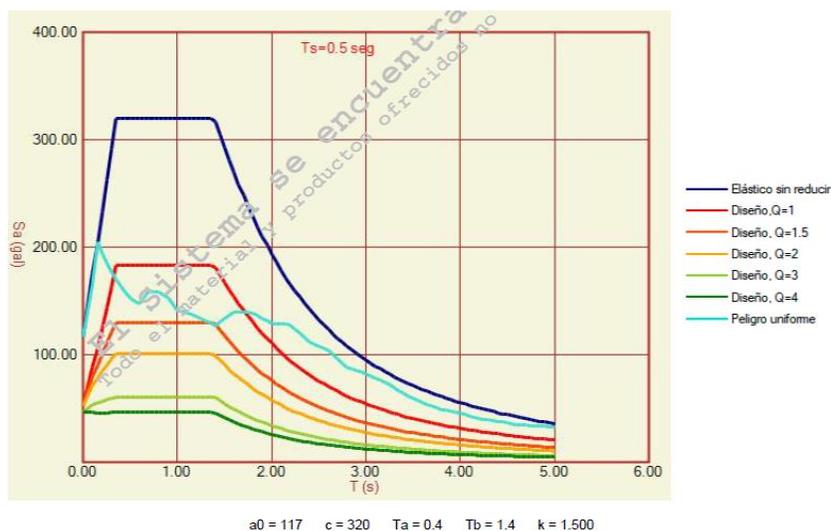


Figura 26. Espectros de respuesta, zona I o de lomas, coordenadas: (Latitud: 19.448, Longitud: - 99.214). Tomada de <sup>[46]</sup>.

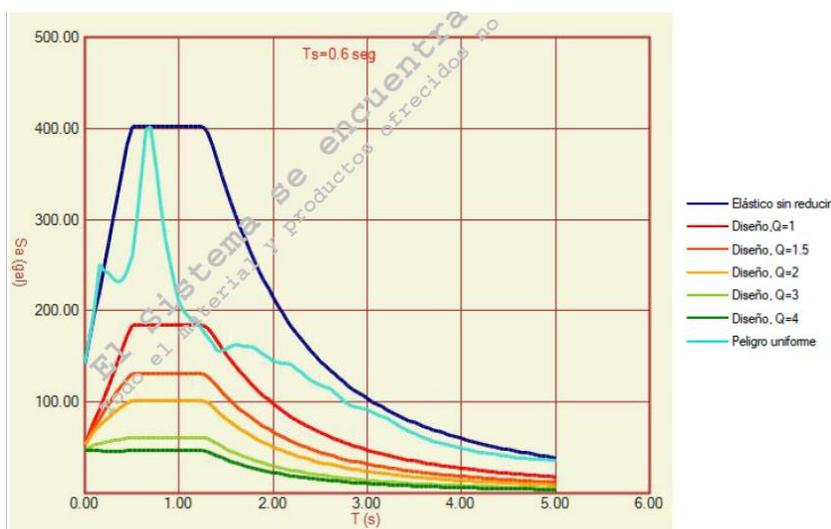


Figura 27. Espectros de respuesta, zona II o de transición, coordenadas: (Latitud: 19.502, Longitud: - 99.187). Tomada de <sup>[46]</sup>.

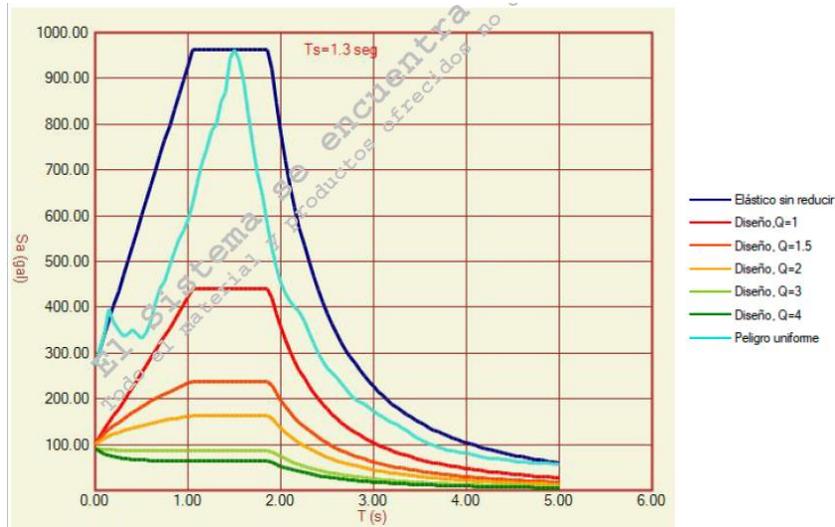


Figura 28. Espectros de respuesta, zona II o de transición, coordenadas: (Latitud: 19.45, Longitud: - 99.15). Tomada de [46].

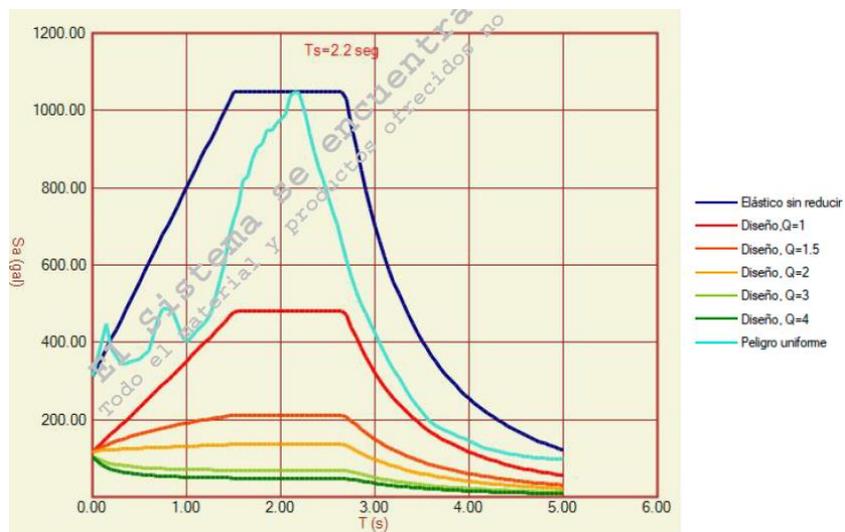


Figura 29. Espectros de respuesta, zona III o del lago, coordenadas: (Latitud: 19.43, Longitud: - 99.13). Tomada de [46].

Nótese que los periodos del suelo ( $T_s$ ) y las aceleraciones de la meseta varían enormemente entre los espectros de respuesta, aun cuando los datos empleados para elaborarlos hayan sido tomados en la misma zona geotécnica (Figura 27 y 28). Esto no indica una mala calidad de los datos, sino que es muestra de la compleja situación geotécnica existente en la Ciudad de México. En la siguiente sección, se describe el proceso para generar los espectros de demanda por medio de los datos brindados por el SASID.

### 1.3.7. Construcción de los espectros de respuesta según las NTCDS

El SASID brinda los parámetros del sitio necesarios para construir los espectros de respuesta elástica, siendo éstos los siguientes:  $a_0$ ,  $c$ ,  $T_a$ ,  $T_b$  y  $k$ ; donde  $a_0$  es el coeficiente de aceleración del terreno,  $c$  es la aceleración máxima,  $T_a$  y  $T_b$  son los periodos característicos de la meseta central y  $k$  es la relación entre el desplazamiento máximo del suelo y el desplazamiento espectral máximo. Cuando el coeficiente  $k$  es menor a la unidad indica una reducción del valor del desplazamiento espectral ( $S_d$ ) a medida que aumenta el periodo. La Figura 30 muestra el efecto del parámetro  $k$  en las ordenadas del espectro de respuesta.

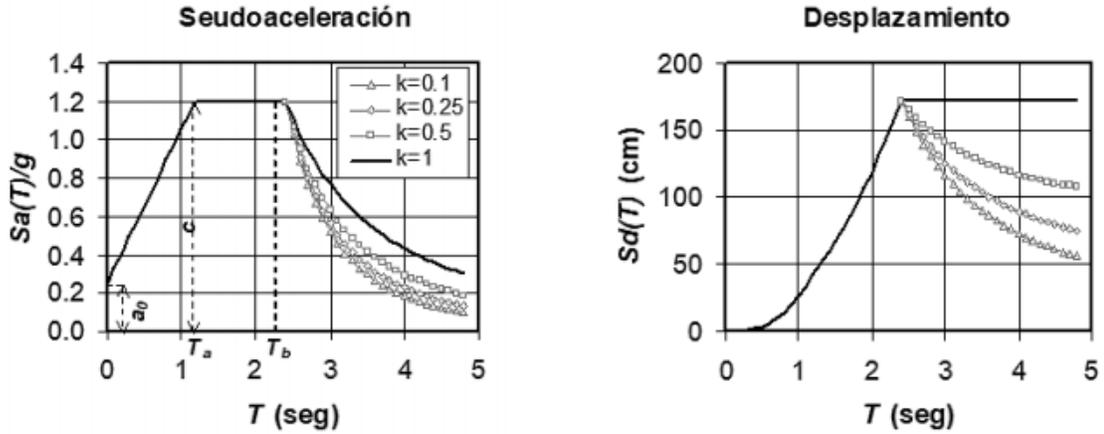


Figura 30. Efectos del parámetro  $k$  en las ordenadas del espectro de respuesta. Tomada de [42].

Las ordenadas del espectro se definen en función de los periodos característicos de la meseta central, tal como se muestra a continuación:

$$S_a = \begin{cases} a_0 + (\beta c - a_0) \frac{T}{T_a}; & \text{si } T < T_a \\ \beta c; & \text{si } T_a \leq T \leq T_b \\ \beta c \rho \left(\frac{T_b}{T}\right)^2; & \text{si } T \geq T_b \end{cases} \quad (41)$$

Donde

$$\rho = k + (1 - k) \left(\frac{T_b}{T}\right)^2 \quad (42)$$

Obsérvese que el coeficiente  $\rho$  depende de  $k$  y afecta únicamente al espectro de respuesta cuando  $T \geq T_b$ , esto debido a que el coeficiente  $k$  es el responsable de definir la variación de  $S_d$  en dicho intervalo.

$$\beta = \begin{cases} 1 - \left[ 1 - \left( \frac{0.05}{\zeta} \right)^\lambda \right] \frac{T}{T_a}; & \text{si } T < T_a \\ \left( \frac{0.05}{\zeta} \right)^\lambda; & \text{si } T_a \leq T \leq T_b \\ 1 + \left[ \left( \frac{0.05}{\zeta} \right)^\lambda - 1 \right] \left( \frac{\tau T_b}{T} \right)^\varepsilon; & \text{si } T \geq T_b \end{cases} \quad (43)$$

Las ecuaciones que definen al parámetro  $\beta$  se basan en las que fueron desarrolladas por Castillo et al.<sup>[47]</sup> para construir espectros de respuesta con un amortiguamiento distinto al 5% con respecto del crítico. Los coeficientes de  $\lambda$ ,  $\varepsilon$  y  $\tau$  se obtienen en función del periodo de vibración del suelo ( $T_s$ ) y sus valores se muestran enlistados en la Tabla 5.

Tabla 5. Valores de  $\lambda$ ,  $\varepsilon$  y  $\tau$  en función de  $T_s$ . Tomada de <sup>[42]</sup>.

Periodo del sitio, s			$\lambda$	$\varepsilon$	$\tau$
	$T_s$	$\leq 0.5$	0.40	0.80	2.50
0.5 <	$T_s$	$\leq 1.0$	0.45	0.20	1.00
1.0 <	$T_s$	$\leq 1.5$	0.45	0.30	1.00
1.5 <	$T_s$	$\leq 2.0$	0.50	1.20	1.00
2.0 <	$T_s$	$\leq 2.5$	0.50	1.80	1.00
2.5 <	$T_s$	$\leq 3.0$	0.55	3.00	1.00
3.0 <	$T_s$	$\leq 4.0$	0.50	4.00	1.00

### 1.3.8. Construcción de los espectros de respuesta según la ATC – 40

En la ATC – 40 se emplean coeficientes sísmicos ( $C_A$ ,  $C_V$ ) para definir el espectro de respuesta elástica. En esta metodología, el coeficiente  $C_A$  representa el pico efectivo de la aceleración del suelo mientras que  $C_V$  representa la respuesta de un sistema con amortiguamiento igual al 5% con respecto al crítico y un periodo de 1 segundo<sup>[39]</sup>. La Figura 31 muestra la manera de construir un espectro de respuesta elástica por medio de los coeficientes sísmicos.

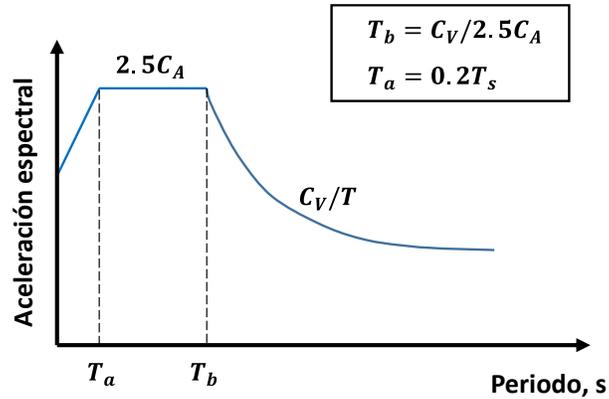


Figura 31. Elaboración del espectro de respuesta elástica por medio de los coeficientes sísmicos  $C_A$  y  $C_V$ . Adaptada de <sup>[39]</sup>.

A manera de simplificación, es posible considerar que la aceleración  $S_a$  es constante en el intervalo  $0 \leq T \leq T_s$ . El periodo  $T_s$  se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$T_s = \frac{SR_V \cdot C_V}{2.5 \cdot SR_A \cdot C_A \cdot g} \quad (44)$$

La Tabla 6 muestra la forma de definir el espectro de demanda en función de los coeficientes sísmicos ( $C_A, C_V$ ). Adicionalmente, en la Figura 32 se muestra un espectro de demanda elaborado con los coeficientes sísmicos  $C_A = 0.44$  y  $C_V = 0.40$ .

Tabla 6. Construcción del espectro de demanda en función de los coeficientes sísmicos ( $C_A, C_V$ ). Adaptada de <sup>[39]</sup>.

$T, s$	$S_a, g$	$S_d$
0	$S_{a,max}$	0
$T_s$	$S_{a,max}$	$S_{ds}$
$T > T_s$	$\frac{SR_V C_V}{T}$	$S_a \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2$

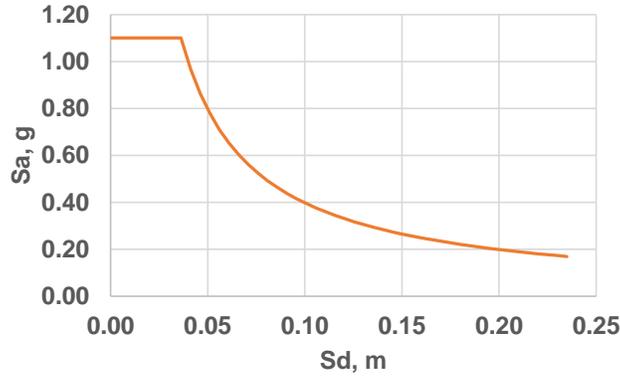


Figura 32. Espectro de demanda siguiendo la ATC40 considerando  $C_A = 0.44$  y  $C_V = 0.40$ .

### 1.3.9. Comparación entre los espectros de demanda según las NTCDS y la ATC40

Los métodos propuestos por la ATC – 40 y las NTC para construir los espectros de repuesta son distintos, por tal razón se realiza una comparación entre los espectros de demanda que se obtienen con ambas metodologías. Por un lado, se construyó un espectro de demanda siguiendo el método presentado en la ATC – 40, considerado los coeficientes  $C_A = 0.44$  y  $C_V = 0.40$ . Por otra parte, para las NTC, se construyeron los espectros de respuesta de dos sitios distintos, empleando los parámetros que brindó el SASID. Los datos utilizados en la elaboración de los espectros de respuesta son mostrados en la Tabla 7. Los espectros resultantes se muestran en la Figura 33.

Tabla 7. Parámetros de los espectros de demanda comparados, NTC. Datos obtenidos del SASID <sup>[46]</sup>.

Parámetro	Sitio 1	Sitio 2
$T_s, s$	0.6	1.3
$a_0, cm/s^2$	143	273
$c$	402	962
$T_a, s$	0.5	1.1
$T_b, s$	1.3	1.9
$k$	1.5	0.35
$\lambda$	0.45	0.45
$\epsilon$	0.2	0.3
$\tau$	1	1
Latitud	19.502	19.450
Longitud	-99.187	-99.150

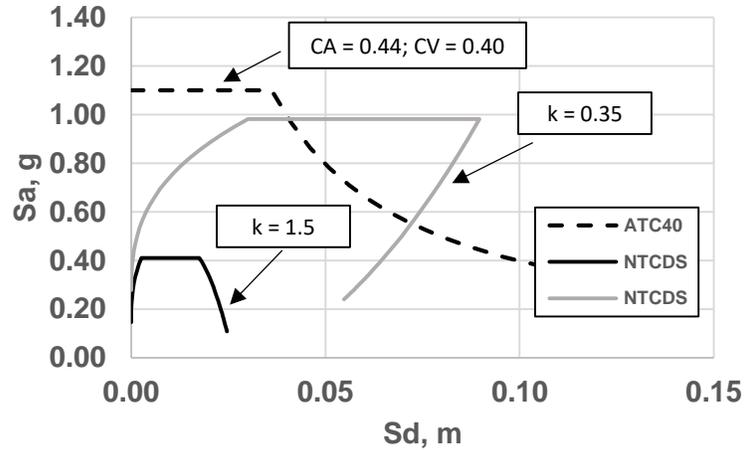


Figura 33. Comparación entre los espectros de demanda; ATC – 40 considerando  $C_A = 0.44$  y  $C_V = 0.40$ , NTCDS considerando  $k = 0.35$  y  $k = 1.5$ .

Se observa que ambas normativas brindan espectros de demanda muy diferentes entre sí. Mientras que los espectros de la ATC – 40 presentan un aumento continuo de  $S_d$  cuando  $T \geq T_b$ , los de las NTC pueden presentar un ligero aumento o una disminución de la respuesta  $S_d$  en función del valor de  $k$ . Cuando  $k > 1$ ,  $S_d$  incrementa en el intervalo  $T \geq T_b$ , en caso contrario ( $k < 1$ )  $S_d$  disminuye. Los valores  $k < 1$  son usuales para suelos blandos<sup>[42]</sup>, con lo cual, cabría esperarse que fueran comunes en los espectros de repuesta brindados por el SASID.

### 1.3.10. Desempeños objetivo

De manera independiente al método escogido para evaluar el desempeño sísmico de una estructura, es necesario definir dos conceptos adicionales, los cuales son los niveles de desempeño y desempeño objetivo de la estructura. Los primeros definen las magnitudes de daño presentado para los elementos estructurales y contenidos al ser sometidos a una demanda sísmica, mientras el segundo define el desempeño global del edificio al ser sometido a una demanda sísmica específica.

La ATC – 40 describe dos tipos de niveles de desempeño: para elementos estructurales y para contenidos; ambos son estados discretos de daño que establecen límites a la respuesta en una evaluación estructural. Al definir estos dos niveles de desempeño y combinar sus requerimientos, se define el desempeño global del edificio. Los niveles de desempeño presentados en la ATC – 40 se describen a continuación<sup>[39]</sup>.

Niveles de desempeño para elementos estructurales:

- **Ocupación inmediata:** Posterior al sismo, solo hay presencia de un muy limitado daño estructural.
- **Control de Daño:** Es un estado intermedio entre Ocupación inmediata y Seguridad de Vida. Representa un daño estructural limitado, sin pretender una ocupación del inmueble de manera inmediatamente posterior al evento sísmico.
- **Seguridad de Vida:** En estado se presenta un daño estructural considerable, sin embargo, la estructura presenta un riesgo muy bajo de colapso parcial o total.
- **Estabilidad Estructural:** El daño estructural es de tal magnitud que existe un potencial de colapso parcial o total, sin embargo, la estructura aún es capaz de soportar las cargas gravitatorias.

Niveles de desempeño para contenidos:

- **Operacional:** Los contenidos se encuentran en su lugar y en funcionamiento después del evento sísmico.
- **Ocupación inmediata:** La mayoría de los contenidos se encuentran en su lugar y pueden presentarse limitaciones en su uso y funcionamiento.
- **Seguridad de Vida:** El daño a los contenidos es considerable y pueden requerir de reparaciones o reemplazos para volver a ser funcionales. Hay un riesgo mínimo de incendios, fugas de tuberías a presión, etc.
- **Riesgo Reducido:** Los contenidos presentan daños considerables y pueden presentarse personas heridas debido a la caída de elementos no estructurales de considerable peso.

Combinando los requerimientos de los niveles de desempeño para elementos estructurales y contenidos deseados, es que se define el desempeño global del edificio. De manera similar, el desempeño global de edificio se define por estados discretos de daño. La descripción de los niveles de desempeño es tomada de la ATC – 40<sup>[39]</sup>.

- **Operacionalidad:** Nivel de desempeño relacionado a la funcionalidad. Los daños estructurales y a contenidos es mínimo. En caso de ser necesaria una reparación, la ejecución de ésta no afecta a los ocupantes del edificio.
- **Ocupación inmediata:** Criterio más ampliamente usado en infraestructura esencial. Se puede presentar daño a los contenidos, pero no se existe una interrupción en el uso de las instalaciones.

- **Seguridad de Vida:** Existe una amenaza a la integridad física de los ocupantes muy baja, ya sea por la caída de contenidos o falla de elementos estructurales. Pueden existir amenazas secundarias para la caída de sustancias químicas o fuego.
- **Estabilidad Estructural:** Este nivel de desempeño exige únicamente la estabilidad del sistema estructural frente a cargas gravitatorias. El daño es de tal magnitud que el edificio puede colapsar en el caso de presentarse réplicas.

Como se mencionó antes, al seleccionar el desempeño global del edificio y definir el nivel de demanda sísmica, se define el desempeño objetivo de la estructura. La ATC – 40 define tres tipos de demanda sísmica: Sismo de Servicio, Sismo de Diseño y Sismo Máximo. Dicha clasificación se basa en la probabilidad de ocurrencia de cada sismo en un periodo de tiempo de 50 años. La definición de cada sismo se muestra a continuación<sup>[39]</sup>:

- **Sismo de Servicio:** Sismo con una probabilidad de ser excedido del 50% en un periodo de 50 años.
- **Sismo de Diseño:** Sismo con una probabilidad de ser excedido del 10% en un periodo de 50 años.
- **Sismo Máximo:** Sismo con una probabilidad de ser excedido del 5% en un periodo de 50 años.

### 1.3.11. Respuestas límite

En el Método del Espectro de Capacidad se permite comparar las repuestas registradas durante el análisis con ciertos valores límite para determinar si el edificio cumple con las exigencias del desempeño objetivo seleccionado. Estas respuestas pueden dividirse en dos categorías:

- **Límites de aceptabilidad global del edificio:** Esta categoría incluye los requerimientos de carga gravitatoria, resistencia a cargas laterales y distorsiones de entrepiso.
- **Límites de aceptabilidad de elementos y contenidos:** Los elementos estructurales deben ser revisados para determinar si su respuesta se encuentra entre los límites aceptables. Las revisiones que se deben de realizar a cada elemento estructural se presentan en la ATC – 40 de una manera más detallada. Por otra parte, no se definen valores límite para la aceptabilidad de los contenidos, sin embargo, se indica que el daño de éstos se ve influenciado por las distorsiones de entrepiso, por lo que se emplea esta respuesta para estimar la aceptabilidad del daño estimado.

# 1.4. OPTIMIZACIÓN POR ALGORITMOS METAHEURÍSTICOS

## 1.4.1. Resolución de problemas complejos

En nuestra vida cotidiana, nos enfrentamos a problemas que exigen diversos enfoques para ser resueltos. Estos problemas pueden incluir cuestiones académicas como resolver operaciones, despejar incógnitas, derivar una función, etc., pero también se presentan otros más mundanos como administrar el gasto de la casa, el definir el orden de las actividades a realizar en el día o el escoger la ruta más corta para llegar a nuestro trabajo. Algunos de esos problemas son lo suficientemente sencillos como para ser resueltos rápidamente, sin embargo, muchos otros son demasiado complejos como para encontrarles una solución en un tiempo razonable.

Para comprender mejor esta idea tomemos como ejemplo el bien conocido problema del Viajante de Comercio, es cual se define de la siguiente manera: Si se requiere visitar  $n$  ciudades tan solo una vez, ¿en qué orden tengo que visitarlas de tal manera que pueda regresar al punto de origen recorriendo la mínima distancia recorrida posible? Evidentemente, a medida que crece el valor de  $n$ , se incrementa el número de posibles soluciones y, por lo tanto, también lo hace la complejidad del problema. En la Figura 34 se muestra un esquema del problema para  $n = 3$  y  $n = 15$ . Para tres ciudades, la distancia es la misma sin importar el orden, con lo cual cualquier ruta brinda la mejor solución posible, sin embargo, al incrementar el número de ciudades a 15, deja de ser claro cómo el orden en que son visitadas afecta la calidad de nuestra solución.

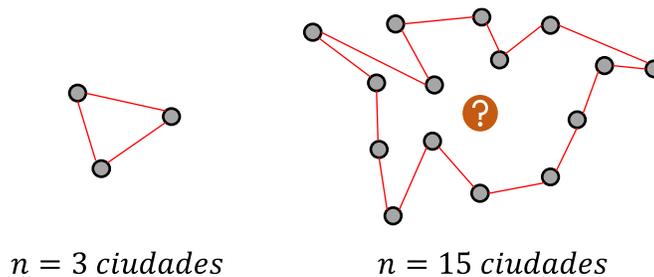


Figura 34. Problema del Viajante de Comercio con  $n = 3$  y  $n = 15$ .

Al no existir un método enumerativo que nos guíe directamente a la solución de nuestro problema, para resolverlo, una persona tendría que definir primero todas las posibles soluciones y, después, calcular la distancia que cada una recorre. Solo después de haber revisado todas las posibles alternativas a tomar es que se podría brindar la ruta óptima. El

inconveniente está en el tiempo requerido para hallar dicha solución, ya que, dependiendo de la complejidad del problema, incluso a una computadora le podría tomar desde segundos hasta años el revisar cada una de las posibles soluciones.

Así como el problema del Viajante de Comercio, en la vida real hay muchos problemas de optimización que requieren encontrar una solución en un tiempo razonable. Algunos de ellos se pueden resolver por medio de métodos exactos, es decir, métodos que examinan todas las posibles soluciones y son capaces de encontrar la mejor de todas (p. ej. el método simplex), mientras que otros solo pueden ser afrontados por métodos heurísticos, los cuales regresan soluciones en un tiempo razonable pero no necesariamente las óptimas<sup>[48]</sup>. En función de su complejidad, los problemas pueden ser definidos como P o NP. Cuando un problema es de tipo P significa que puede ser resuelto en un tiempo razonable, por otra parte, los problemas de tipo NP (como el del Viajante de Comercio) son aquellos cuya solución puede ser verificada en un tiempo razonable, pero no existen algoritmos polinómicos que puedan hallar dicha solución con la misma rapidez<sup>[49]</sup>.

En este punto, el lector se puede preguntar ¿qué significa resolver un problema de manera heurística? Para resolver esta pregunta, primero conviene hablar un poco sobre el significado de la palabra misma. La palabra *heurística* viene del griego “heuriskein” que significa encontrar, y hace referencia al conjunto de conceptos, enfoques, ideas o estrategias que permiten resolver problemas de manera creativa. Volviendo al problema del Viajante de Comercio, el resolver dicho problema de manera heurística implicaría hacer uso de estrategias basadas en la observación y el ingenio, de tal manera que seamos capaces obtener una solución aceptable en un tiempo razonable y no en años.

Un punto muy curioso sobre la resolución de problemas es que es un área científica que no había llamado la atención de los investigadores hasta el siglo pasado, esto a pesar de que los seres humanos nos hemos enfrentado a una gran variedad de problemas a lo largo de nuestra historia. Es bien sabido que la aparición de los métodos exactos coincide con la creación de la Investigación de Operaciones durante la Segunda Guerra Mundial<sup>[50]</sup>, por su parte, los métodos heurísticos no comienzan a ser aplicados hasta la segunda mitad del siglo XX.

Uno de los primeros en dirigir su atención al estudio de las estrategias para resolver problemas fue George Pólya, quien publicó un libro en el año de 1945 titulado: “How to solve it?: A new aspect of mathematical model”<sup>[51]</sup>. A continuación, se enlistan algunos ejemplos de las estrategias que pueden ser empleadas para resolver problemas y que fueron presentadas por Pólya:

- **Aprender por analogía.** Buscar un problema similar cuya resolución sea conocida y emplear ese conocimiento para resolver el problema de interés.
- **Resolución por inducción.** Resolver un problema por medio de la generalización de algunos ejemplos.
- **Emplear problemas auxiliares.** Utilizar un subproblema para resolver el problema general.
- **Análisis medio – fin.** Obteniendo un resultado A, ¿qué cambios debo de realizar para acercarme o alcanzar el resultado deseado B?

Estos enfoques, a pesar de estar dirigidos a cuestiones de índole matemática, son usados por muchos investigadores hoy en día para enfrentarse a problemas de manera heurística<sup>[50]</sup>. Tal es la generalidad de estas estrategias que resulta evidente que los seres humanos las han estado empleando a lo largo de su historia sin siquiera darse cuenta. Tal como ejemplifican Sörensen et al.<sup>[50]</sup>, el ser humano aprendió por analogía a cazar animales por medio de lanzas partiendo de la idea de que es posible dañar algo (como ratas u osos) arrojando objetos (como piedras). Profundizando un poco más el ejemplo, está claro que en un principio nadie sabía cómo lanzar una lanza, seguramente los primeros intentos no tomaban en cuenta aspectos como la aerodinámica el objeto, la resistencia del aire, o la dureza de la piel del animal al que se quería cazar. Fue gracias a la prueba y error que la técnica se fue refinando cada vez más, así, al encontrar factores que afectaban el resultado obtenido y añadiéndolos en el siguiente intento, es que finalmente se consiguió dañar a un animal. Eso es lo que se conoce como análisis medio – fin, es decir, encontrándome en el estado A (lanzar una lanza torpemente), ¿qué pasos debo tomar para acercarme al resultado deseado B (cazar un animal)? Tomando en cuenta lo anterior, salta a la vista que nuestro cerebro resuelve problemas de manera heurística por defecto, y puede ser que esa sea la razón por la que tardáramos tanto en prestarles atención.

#### 1.4.2. Origen de las metaheurísticas

Si bien las estrategias presentadas por Pólya brindan métodos para resolver problemas matemáticos de manera heurística, éstas distan mucho de ser los algoritmos aplicables a los problemas de difícil resolución de los que antes hablamos. Para enfrentar problemas de tipo NP, hoy en día, se utilizan un conjunto de algoritmos que toman inspiración en diferentes procesos, ya sean físicos, biológicos o antropológicos, los cuales son lo suficientemente generales como para permitir su implementación en un amplio abanico de áreas como lo son la industria, los servicios, las finanzas, la administración o la ingeniería<sup>[52]</sup>. A estos algoritmos, los cuales fueron conocidos originalmente como “heurísticas modernas”<sup>[49]</sup>, reciben actualmente el nombre de metaheurísticas (MH’s).

Uno de los primeros eventos que dieron origen a las MH's ocurre en la década de los 60's, cuando se creó un algoritmo computacional con la intención estudiar la forma en que se desarrollaban los procesos evolutivos y de selección natural. A pesar de su sencillez (solo consideraba un único individuo que daba origen a otro por medio de una mutación), contenía las bases de una familia de MH's que hoy conocemos como Algoritmos Evolutivos. Años más tarde, la idea de simular los procesos de selección natural fue empleada en la optimización de problemas, creándose así la primera MH conocida como *Evolution Strategy* (ES). Esta MH se inspira en el hecho de que, por medio de la selección natural, las características que le permiten a un individuo sobrevivir se transfieren a su descendencia, imponiéndose en su especie al cabo de varias generaciones. Aplicando estos conceptos a los problemas de optimización, un "individuo" se convierte en una solución y su "descendencia" es otra solución generada a partir de ella misma. Obsérvese que se está aplicando la idea conocida como Aprender por Analogía, presentada anteriormente por Pólya.

En la Figura 35 se presenta un esquema que ayuda a ejemplificar el uso de ES en la optimización de problemas. Imaginemos que cada una de nuestras posibles soluciones, al problema en cuestión, se define por 7 factores. Al conjunto de todas las posibles soluciones se le denomina espacio de soluciones. Al iniciar el algoritmo, se toma una solución al azar del espacio de soluciones (denominada aquí como solución A), esta solución puede contener o no alguna característica que ayude a optimizar el problema. Para fines didácticos, dicha característica es representada aquí con una estrella. Como se indicó antes, al principio ES solo permitía crear una nueva solución por medio de la "mutación" de la original<sup>[50]</sup>, al movimiento de una solución a otra se le conoce como operador. En este ejemplo, la solución B (resultante de la mutación de A) pierde la característica que beneficia a la optimización del problema, por eso es desechada y se conserva la solución A. En la segunda generación surge una solución C con una nueva característica deseable, por lo tanto, ésta se conserva y ahora A es desechada. Si este proceso se repite múltiples veces, al final se llegará a una solución con un conjunto de características que le permitan desempeñarse mejor que la mayoría del resto de las soluciones.

Esta idea tan sencilla, e ingeniosa a la vez, fue posteriormente enriquecida introduciendo los conceptos de población y cruce, es decir, trabajar con un número  $\mu$  de individuos y el permitir el intercambio de características entre dos o más soluciones, respectivamente. Los dos siguientes puntos importantes del desarrollo de la familia de Algoritmos Evolutivos fueron el seminario de John Holland<sup>[53]</sup>, en el cual se comienza a introducir aspectos teóricos de la MH, y la publicación del libro de David Goldberg<sup>[54]</sup> (alumno de Holland) que permitió la difusión de los Algoritmos Evolutivos<sup>[50]</sup>.

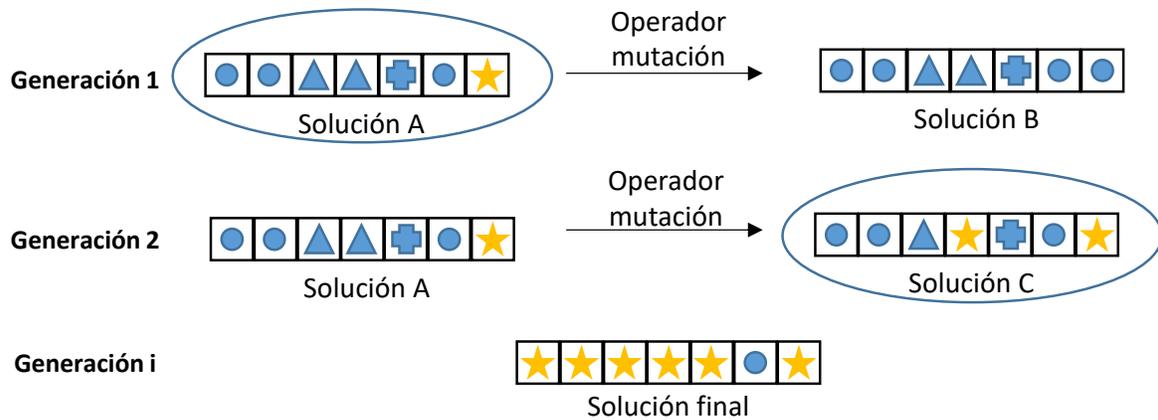


Figura 35. Esquema de la aplicación del primer algoritmo de Estrategias Evolutivas en la optimización de problemas.

Hoy en día, además de los Algoritmos Evolutivos, se han desarrollado otras MH's como *Simulated Annealing* (SA), *Variable Neighborhood Search* (VNS), *Threshold Accepting* (TA), *Tabu Search* (TS), *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP), *Ant Colony Optimization* (ACO), y un muy largo etc. Antes de revisar los diferentes algoritmos que existen hoy en día, es necesario detenerse un momento para comentar el significado de la palabra "Metaheurística".

El primero en utilizar la palabra "Metaheurística" para referirse a este conjunto de algoritmos de optimización fue Goldberg en los años 80's<sup>[49]</sup>, siendo el término una combinación de dos palabras de origen griego: "meta" → más allá y "heurística" → encontrar. A lo largo del tiempo, la definición que se le ha dado a las metaheurísticas ha cambiado múltiples veces, observándose en la literatura algunas como las presentadas a continuación:

- Una MH es un grupo de algoritmos, independientes del problema, de alto nivel que proveen un conjunto de guías o estrategias para desarrollar algoritmos de optimización heurística<sup>[55]</sup>.
- Las MH's son procesos maestros que guían y modifican otras heurísticas subordinadas para explorar soluciones más allá de óptimos locales<sup>[56]</sup>.
- El término MH se refiere a los conceptos e ideas que permiten desarrollar algoritmos de optimización; además también se usa para referirse a su aplicación en problemas específicos<sup>[50]</sup>.
- Las MH's son los entornos de trabajo que se usan para diseñar heurísticas aplicables a problemas de optimización<sup>[57]</sup>.
- Las MH's son algoritmos empleados en problemas de difícil resolución que, a diferencia de los algoritmos exactos, no garantizan que la solución encontrada sea la óptima<sup>[58]</sup>.

- Las MH's son algoritmos diseñados para resolver de manera aproximada un amplio abanico de problemas de difícil optimización sin tener que adaptarse profundamente a cada problema<sup>[52]</sup>.
- Las MH's son herramientas independientes del problema que pueden ser usadas para crear el esqueleto de una nueva heurística<sup>[59]</sup>.

Como se puede observar, una definición concreta sobre lo que es una MH parece ser algo esquiva. Sin embargo, en base a expuesto en la bibliografía revisada, se enlistan algunas características generales de las MH's:

- Son independientes del problema de optimización a resolver.
- Las soluciones que brindan son peores que la solución óptima.
- No son capaces de indicar qué tan cerca está la solución encontrada del óptimo.
- Se emplean para acelerar el proceso de encontrar soluciones satisfactorias cuando las soluciones optimas son imprácticas.
- Usan componentes estocásticos.
- Toman inspiración de procesos físicos, biológicos y antropológicos.
- Son combinables entre sí.

### **1.4.3. Clasificación de las metaheurísticas**

Como se ha indicado antes, existen una gran variedad de algoritmos metaheurísticos, cada uno con sus particularidades y enfoques distintos. Debido a la diversidad de algoritmos, se han propuesto varias maneras de clasificarlos, algunas de las cuales se enlistan a continuación<sup>[60]</sup>:

- En función a cómo se desplazan por el espacio de soluciones (siguiendo una trayectoria o moviéndose entre soluciones por medio de “saltos”).
- Si se basados en poblaciones o en una única solución (Si trabajan con varias soluciones por iteración o con una sola).
- Si almacenan la experiencia adquirida durante la búsqueda (Algoritmos con y sin “memoria”).
- Si emplean una o más vecindades (Es decir, cuantas “reglas” u operadores ocupan para moverse entre soluciones).
- Por medio de sus funciones objetivo (pueden ser dinámicas o estáticas).
- En función de donde toman inspiración (basadas en la naturaleza o en otros procesos).

A pesar de las diferentes formas en que se pueden clasificar las MH's, la más común de todas es la que se basa en la cantidad de soluciones con las que trabaja el algoritmo en cada iteración, esto se debe a que la clasificación toma en cuenta de manera indirecta dos

parámetros que tienen un gran peso en el desempeño de las MH's: la diversificación y la intensificación.

La diversificación de una MH es su capacidad de encontrar regiones del espacio de búsqueda con soluciones de buena calidad, por su parte, la intensificación hace referencia a la capacidad de profundizar en esas zonas para extraer las mejores soluciones. El balance entre ambos criterios es lo que define el desempeño de una MH<sup>[58]</sup>. Debido a que trabajan con múltiples soluciones en cada iteración, los algoritmos basados en poblaciones tienen un enfoque hacia la diversificación, mientras que los algoritmos basados en una única solución se orientan más hacia la intensificación<sup>[52]</sup>. A continuación, se brinda una breve descripción de las MH's más conocidas de ambos grupos.

#### **1.4.4. Metaheurísticas basadas en poblaciones**

Como ya se ha mencionado antes, estas MH's trabajan con más de una solución en cada iteración. Existen múltiples algoritmos que se basan en poblaciones, como está fuera del alcance de este trabajo el revisar cada uno de ellos, solo se presenta la información relacionada con los algoritmos evolutivos y la optimización por colonia de hormigas, los cuales fueron de las primeras MH's de este tipo.

##### **Algoritmos evolutivos (AE)**

Los Algoritmos Evolutivos son una familia de MH's que emulan la selección natural, en este grupo encontramos a los *Genetic Algorithm*, *Evolution Strategy*, *Programming Evolution* y *Genetic Programming*. Estos algoritmos presentan las siguientes características generales<sup>[49,52,54,61]</sup>:

- Una solución es representada por un individuo.
- La población es un conjunto de individuos generados aleatoriamente.
- Cada individuo es evaluado para definir su desempeño.
- Se usa algún mecanismo estocástico de selección para escoger a los individuos que darán origen a la siguiente generación.
- Los individuos más aptos son los que tienen la mayor probabilidad de heredar sus genes.
- Los operadores que utilizan son el cruce y la mutación.
- Cada generación es una iteración del algoritmo y el criterio de parada suele ser un número máximo de iteraciones.
- Los algoritmos convergen a una única solución si realizan un número lo suficientemente alto de iteraciones.

**Evolution Strategy (ES):** Estos algoritmos fueron desarrollados en los años 60's y fueron los primeros entre los AE. Al principio no usaban el concepto de población y solo empleaban la mutación para generar nuevas soluciones. Posteriormente, se introdujo el concepto de población por medio de la variante llamada  $(\mu + 1)$ , donde  $\mu > 1$  era el número de progenitores. En esta versión se mantenía el tamaño de la población fijo, cuando se creaba una nueva solución, si ésta era mejor que la peor solución de la población actual, la reemplazaba. El uso de la población permitió utilizar otros operadores como el cruce<sup>[52]</sup>. Estos algoritmos son muy usados en problemas continuos<sup>[49]</sup>.

**Genetic Algorithm (GA):** Este es el algoritmo más conocido y utilizado de los AE. Fueron desarrollados en los años 70's y representan a las soluciones por medio de "cromosomas". Emplean múltiples formas de escoger a las soluciones que darán origen a la nueva generación, como lo pueden ser la selección por ruleta, por torneo, por ranking, etc. Los operadores que emplean son el cruce y la mutación. El cruce es la combinación de 2 o más soluciones. La mutación es el operador que se utiliza para evitar óptimos locales y es común utilizar una probabilidad del 1% de que ocurra una mutación, aunque puede variar de problema en problema<sup>[52]</sup>. Este tipo de algoritmos es muy utilizado en problemas combinatorios<sup>[49]</sup>.

**Programming Evolution (PE):** Algoritmo desarrollado en los años 60's. Debido a su fuerte parecido con ES, su uso fue disminuyendo. Utiliza el concepto de población, pero solo emplea la mutación para generar nuevas soluciones<sup>[52]</sup>.

**Genetic Programming (GP):** Estos algoritmos se volvieron populares en los años 90's. Esta clase de algoritmos utiliza operadores especiales y representa a las soluciones por medio de programas de computadora. Hoy en día, se utilizan principalmente en *Machine Learning* y *Data Mining*<sup>[52]</sup>.

## **Inteligencia de colmena**

Esta clase de algoritmos busca emular el comportamiento grupal de poblaciones de insectos y otros animales sociales<sup>[52]</sup>. El fundamento de esta idea recae en el hecho de que se ha demostrado que modelos probabilísticos simples son suficientes para justificar patrones colectivos complejos<sup>[62]</sup>. Un principio similar es utilizado en las llamadas redes neuronales<sup>[63]</sup>. Muchos algoritmos de optimización basados en esta idea han sido propuestos, sin embargo, solo se revisa el conocido como *Ant Colony Optimization*, debido a que fue el primero y es uno de los más empleados.

**Ant Colony Optimization (ACO):** Este algoritmo fue presentado en 1991 por Dorigo et al.<sup>[62]</sup>, y su uso fue ejemplificado empleándolo para resolver el Problema del Vendedor Ambulante. La idea se basó en que una colonia de hormigas puede ser emulada empleando un grupo de individuos simples, capaces de comunicarse entre sí por medio de “feromonas”. Cada individuo se dedicaría a recorrer un camino que conectara las  $n$  ciudades del problema, cuando se encontrara una ruta prometedora, el rastro de feromonas atraería a las demás hormigas, empujándolas a recorrer soluciones cada vez más optimizadas. En la Figura 36 se muestra un esquema de esta la idea. La hormiga que se encuentra en O debe de escoger a qué ciudad dirigirse (A, B o C). Debido a que un mayor número de hormigas se está moviendo a la ciudad A, la cual es la más cercana de las tres, es muy probable que ella también se decante por tomar esa ruta.

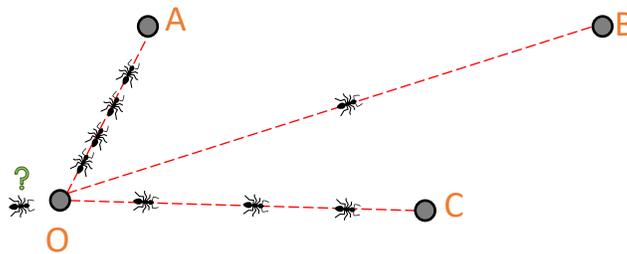


Figura 36. Esquema de la aplicación de ACO en el PVA.

#### 1.4.5. Metaheurísticas basadas en una única solución

Estas MH's se encuentran orientadas hacia la intensificación, es decir, a extraer las mejores soluciones de una zona específica del espacio de búsqueda. Los algoritmos comienzan con una única solución y se van alejando de ella posteriormente, describiendo una trayectoria en el espacio de búsqueda<sup>[52]</sup>. En esta clasificación encontramos a *Simulated Annealing* (SA), *Tabu Search* (TS), *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP), *Variable Neighborhood Search* (VNS), entre otros. Estos algoritmos son descritos brevemente a continuación.

**Simulated Annealing (SA):** Esta MH fue propuesta en 1983 por Kirkpatrick et al.<sup>[64]</sup> y tiene sus orígenes en la mecánica estadística. Se basa en la idea de simular el proceso físico conocido como recocido, empleado en la industria metalúrgica para obtener un estado sólido ordenado de mínima energía a partir de una masa fundida<sup>[52]</sup>. La principal característica de esta MH es que considera la opción de aceptar soluciones peores, esto con la finalidad de salir de mínimos locales. La probabilidad de transitar a una solución peor se define por la distribución de Boltzmann y es inversamente proporcional a la altura del descenso,

decreciendo a medida que disminuye la temperatura del proceso<sup>[65]</sup>. Existe otro algoritmo conocido como *Threshold Accepting* (TA), el cual emplea una idea muy similar, pero utiliza un criterio determinístico para tomar las soluciones peores, en lugar de uno probabilístico como lo hace SA<sup>[66]</sup>. Hoy en día, SA es más utilizado como un componente de otras MH's en vez de un algoritmo de búsqueda independiente<sup>[49]</sup>.

***Tabu Search (TS)***: Esta MH genera un historial de búsqueda a medida que se mueve por el espacio de búsqueda, por lo tanto, es un algoritmo capaz de aprender del pasado. El historial, llamado lista de memoria, es empleado para aplicar una estrategia exploratoria y escapar de mínimos locales<sup>[49]</sup>. La lista de memoria le impide al algoritmo regresar a las soluciones que ya han sido revisadas, y su longitud afecta el desempeño del algoritmo<sup>[52]</sup>. Las listas pequeñas causan que la búsqueda se concentre en áreas pequeñas del espacio de búsqueda, por otra parte, las listas largas permiten al algoritmo visitar regiones amplias regiones de búsqueda que no han sido exploradas. Un punto intermedio es variar la longitud del historial durante la búsqueda, a esta variante se le conoce como *Reactive Tabu Search*.

***Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP)***: Este algoritmo de búsqueda consta de dos partes: la primera, en la que se construye una solución por medio de una función de codicia, seguida de un proceso de búsqueda local, en el cual se revisa la vecindad de la solución generada en busca de alguna mejor. El utilizar dos fases de búsqueda se fundamenta en que la efectividad de los algoritmos de búsqueda local se ve incrementada cuando la solución inicial es de alta calidad<sup>[48]</sup>. En GRASP, la solución inicial se genera de manera iterativa, añadiendo elementos a la misma en función de cómo afectan a la calidad de la solución resultante. Los elementos que aportan un mayor beneficio tienen mayores probabilidades de ser incluidos en la siguiente iteración. Debido a que se actualiza el beneficio de agregar cada elemento en cada iteración, la probabilidad asociada a tomar cada elemento también se ve modificada. Esto permite que el algoritmo se considere como adaptativo, es decir, como un algoritmo que modifica su propia configuración durante el proceso de búsqueda<sup>[48,58]</sup>.

***Variable Neighborhood Search (VNS)***: Fue propuesto por Mladenović et al. en 1997<sup>[67]</sup> y es el más sencillo de los algoritmos de búsqueda local<sup>[58]</sup>. La idea se basa en que el espacio de soluciones puede ser explorado por medio de diferentes vecindades o entornos. De manera simplificada, una vecindad define las soluciones que podemos alcanzar en la siguiente iteración. Como su nombre lo indica, el algoritmo utiliza un número definido de diferentes entornos, de tal manera que, si una vecindad nos encierra en un mínimo local, es posible que otro nos permita salir y encontrar mejores soluciones. El proceso de búsqueda

finaliza cuando ninguna vecindad permite encontrar una solución mejor a la actual<sup>[58]</sup>. Actualmente existen muchas variables de este algoritmo<sup>[68]</sup>.

#### **1.4.6. Sobre las metaheurísticas “innovadoras”**

Como se ha visto, las MH's han recorrido un largo camino desde los primeros algoritmos evolutivos propuestos. Buena parte de este desarrollo puede ser explicado por factores como el desarrollo de la teoría de programación matemática y el diseño de algoritmos, el incremento del desempeño y poder de procesamiento de las computadoras y la comunicación de ideas y su posterior integración en los programas informáticos<sup>[52,67]</sup>.

Uno de los principales problemas que enfrentan las MH's hoy en día es su carencia de fundamentos teóricos. Recordando los algoritmos mostrados anteriormente, la mayoría de ellos tomaron su inspiración en algún proceso orientado a la optimización (p. ej. aumentar la probabilidad de supervivencia de una especie por medio de la selección natural, el reducir la energía de un sistema o el encontrar la distancia más corta a una fuente de alimento). Más aún, la implementación de estos algoritmos resulta ser un proceso casi artesanal por parte de los investigadores, los cuales definen algunos de sus parámetros en base a su experiencia y conocimientos.

Debido a estas deficiencias, algunos investigadores veían en un principio a las MH's como un campo carente de seriedad científica, tal como lo ejemplifica la siguiente cita de Glover<sup>[69]</sup>:

*“Los algoritmos son concebidos en la pureza de las altas esferas de la investigación académica, las heurísticas nacen de la conveniencia en los rincones oscuros de las guaridas de los practicantes, teniendo, por lo tanto, estándares más bajos”* (Glover, 1977).

A pesar de la imposibilidad de ver a las MH's como un área científica madura, éstas son utilizadas ampliamente debido a que suelen ser la única opción para resolver los problemas de difícil optimización que se presentan en la vida diaria<sup>[50]</sup>.

Hoy en día, si una persona se pone a indagar en los trabajos publicados relacionados con las MH's, fácilmente se dará cuenta que existe una gran cantidad de material bibliográfico. Algunos trabajos hablan sobre la aplicación de algoritmos en la optimización de problemas, otros presentan algún fundamento teórico, hay otros que presentan estrategias para correr los algoritmos<sup>[70]</sup> y muchos otros presentan nuevas MH's a las que suelen denominar como “innovadoras”.

En la revisión bibliográfica realizada por Dokeroglu et al.<sup>[71]</sup> se reporta la existencia de casi 100 algoritmos diferentes. Llegados a este punto, cualquiera podría hacerse la siguiente pregunta: ¿Cuál es la razón de que existan tantos algoritmos y cuál es el mejor de todos ellos? Ambas preguntas serán respondidas en las subsecuentes secciones.

#### **1.4.7. Validez del uso de metáforas**

Ya se ha señalado que muchos procesos naturales o artificiales han sido tomados como fuente de inspiración en la creación de nuevas MH's, esto fue así en los años 60's y sigue siendo cierto hoy en día. En un principio, la idea de usar analogías de la selección natural o el comportamiento colectivo de insectos no parecía tan descabellada, al final de cuentas, la naturaleza se ha mostrado muy ingeniosa y ha tenido mucho tiempo para perfeccionar todos estos procesos. Sin embargo, algunos de los nuevos algoritmos novedosos parecen tomar inspiración en procesos poco relacionados con la optimización, haciendo ver a la analogía como un elemento decorativo que apuntala su método. Ejemplos de la sobre explotación de analogías hay muchos, se han publicado algoritmos inspirados en la música Jazz<sup>[72]</sup>, enjambres de gatos<sup>[73]</sup>, abejas<sup>[74]</sup>, ranas<sup>[75]</sup>, gotas de agua inteligentes<sup>[76]</sup>, la gravedad<sup>[77]</sup>, pájaros cucús<sup>[78]</sup>, murciélagos<sup>[79]</sup>, abejorros<sup>[80]</sup>, imperios<sup>[81]</sup>, cuerpos en colisión<sup>[82]</sup>, espirales<sup>[83]</sup>, ballenas<sup>[84]</sup>, duelistas<sup>[85]</sup>, saltamontes<sup>[86]</sup>, ballenas asesinas<sup>[87]</sup>, el ciclo hidrológico<sup>[88]</sup>, halcones<sup>[89]</sup>, pingüinos emperador<sup>[90]</sup>, investigaciones forenses<sup>[91]</sup>, cachipollas<sup>[92]</sup>, pastores<sup>[93]</sup>, viudas negras<sup>[94]</sup>, águilas doradas<sup>[95]</sup>, etc.

De manera similar a Dokeroglu et al.<sup>[71]</sup>, se realizó una búsqueda en Google Scholar de algunas de las MH's enlistadas. En la Figura 37 se muestra la gráfica realizada con la información de las MH's presentadas en las secciones 1.4.4 y 1.4.5. La nomenclatura empleada es la siguiente: *Genetic Algorithm* (GA), *Simulated Annealing* (SA), *Tabu Search* (TS), *Genetic Programming* (GP), *Ant Colony Optimization* (ACO), *Evolution Strategies* (ES), *Greedy Randomized Adaptive Search Procedures* (GRASP) y *Variable Neighborhood Search* (VNS).

En la Figura 38, se presenta la gráfica con algunas de las MH's "novedosas" presentadas en esta sección. La nomenclatura empleada es la siguiente: *Artificial Bee Colony* (ABC), *Harmony Search* (HS), *Cuckoo Search* (CS), *Bat Algorithm* (BA), *Gravitational Search Algorithm* (GSA), *Shuffled Frog-Leaping Algorithm* (SFLA), *Whale Optimization Algorithm* (WOA), *Cat Swarm Optimization* (CSO), *Grasshopper Optimization Algorithm* (GOA), *Intelligent Water Drops* (IWD) y *Colliding Bodies Optimization* (CBO).

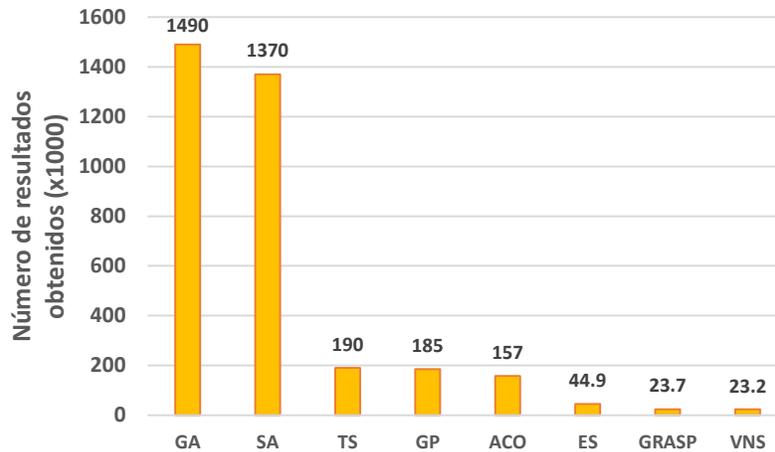


Figura 37. Numero de resultados obtenidos por Google Scholar sobre MH's presentadas en las secciones tal. Elaboración propia con datos obtenidos en febrero del 2021.



Figura 38. Numero de resultados obtenidos por Google Scholar sobre MH's “novedosas”. Elaboración propia con datos obtenidos en febrero del 2021.

De las Figuras 37 y 38 se observa que actualmente la MH más utilizada es GA. El alto número de artículos relacionados con SA se puede explicar a su uso en combinación con otras MH's. Por otra parte, de las nuevas MH's revisadas, las más utilizadas son ABC, HS y CS. Al existir tantos algoritmos, no solo es difícil ver cuál es el aporte específico de cada uno, sino que también complica la tarea de contrastar los nuevos algoritmos con los que han sido propuestos anteriormente. Uno de los principales problemas que genera el uso de analogías en la elaboración de MH's es el abuso del lenguaje propio del campo del que se toma la inspiración. Para ejemplificar esto, en la Figura 39 se presenta el diagrama de flujo correspondiente a la MH conocido como “*Imperialist Competitive Algorithm*”. Como se puede observar, el algoritmo emplea conceptos como imperios y colonias, sin embargo, el uso que se le da al lenguaje dificulta determinar cuál de esos conceptos es una solución, que

proceso se utiliza para moverse por el espacio de soluciones, o si quiera por qué el concepto de imperialismo permite la optimización de problemas.

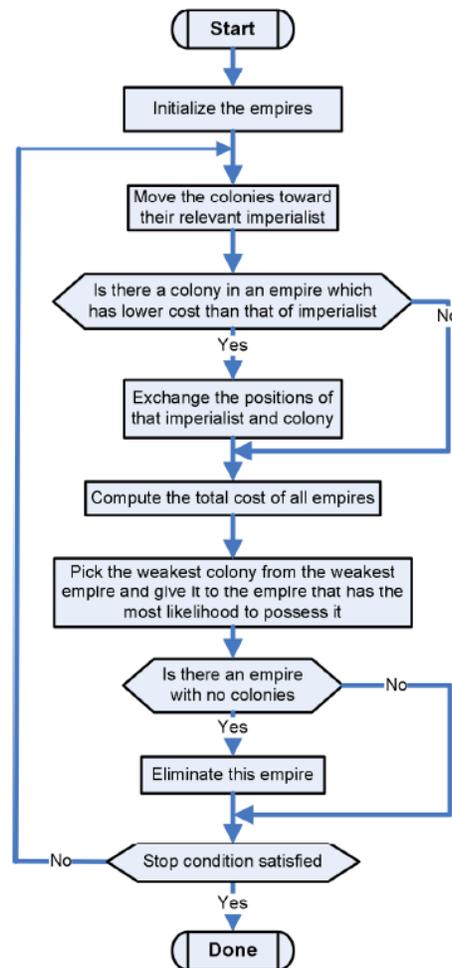


Figura 39. Diagrama del Imperialist Competitive Algorithm propuesto por Abdollahi et al.<sup>[81]</sup>. Tomada de <sup>[59]</sup>.

El problema del abuso de las analogías en la creación de MH's ha sido abordado con anterioridad por otros trabajos<sup>[50,59,96]</sup> y es un tema que aún se encuentra lejos de estar zanjado. Del Ser et al.<sup>[96]</sup> indican que el valor científico de las MH's no recae ni en la variedad ni en la cantidad de algoritmos existentes, pero también afirma que es posible obtener elementos novedosos por medio de analogías, con lo cual, consideran no debería de excluirse su uso en el desarrollo de nuevos métodos. Por otra parte, Sörensen et al.<sup>[50,59]</sup> se muestran menos condescendientes y afirman que estos “algoritmos novedosos” suelen ser innecesarios y, lejos de realizar un aporte al campo, dañan su calidad científica. Al observar el diagrama del *Imperialist Competitive Algorithm* se vuelve difícil no sentir sintonía con lo propuesto por Sörensen.

Además de hacer parecer al uso de MH's más con un juego que como un trabajo científico, se han presentado casos en los que el abuso del lenguaje relacionado con una analogía termina por esconder similitudes con trabajos presentados anteriormente. Dos casos llamativos son los de *Intelligent Water Drops* (IWD), creado por Hosseini<sup>[76]</sup>, y *Harmony Search* (HS), presentado en Geem et al.<sup>[72]</sup>, ambos algoritmos acusados de ser idénticos a otros más conocidos. En el caso de IWD, Camacho et al.<sup>[97]</sup> indican que el método es un caso especial de *Ant Colony Optimization* (ACO), mientras que, para el caso de HS, Weyland<sup>[98]</sup> señala que es un caso especial de *Evolutive Strategies* (ES).

El caso de HS es especialmente llamativo debido a que parece ser que la acusación de plagio no tuvo gran impacto en la comunidad científica. En un trabajo posterior Weyland<sup>[99]</sup> demuestra de manera rigurosa que HS es un caso especial de ES y reporta que, al buscar “*harmony search*” (con comillas) en Google Scholar, se obtienen 9,000 resultados. Como se observa en la Figura 38, a la fecha de realizar este trabajo, la misma búsqueda brinda 42,000 resultados, lo cual hace evidente la creciente popularidad del algoritmo.

El incremento de artículos relacionados con HS, aún a pesar de las declaraciones de Weyland, se puede explicar tanto por los buenos resultados que se reportan como por la difusión que su creador le da por medio de una página web especialmente elaborada para el algoritmo. En dicho sitio web, Geem brinda todo un abanico de trabajos relacionados con su algoritmo, desde artículos publicados, hasta libros y presentaciones. A pesar de lo extravagante que esto pueda parecer, hay varios algoritmos que utilizan sitios web como estrategia de difusión. Algunas capturas de pantalla que ejemplifican esto se muestran en las Figuras 40 – 42.

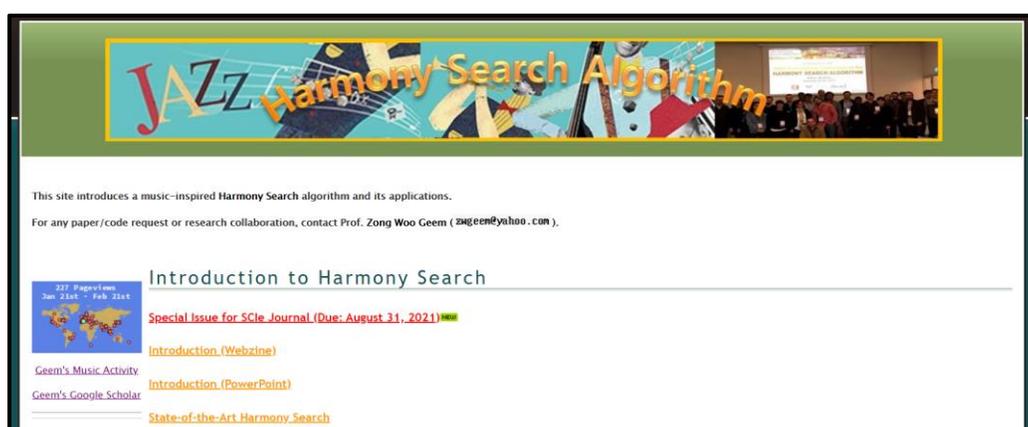


Figura 40. Sitio web de *Harmony Search* (HS), algoritmo propuesto por Geem et al.<sup>[72]</sup>.  
[\(https://sites.google.com/a/hydrroteq.com/www/\)](https://sites.google.com/a/hydrroteq.com/www/).



Figura 41. Sitio web de *Artificial Bee Colony* (ABC), algoritmo propuesto por Karaboga et al.<sup>[74]</sup>. (<https://abc.erciyes.edu.tr/>).

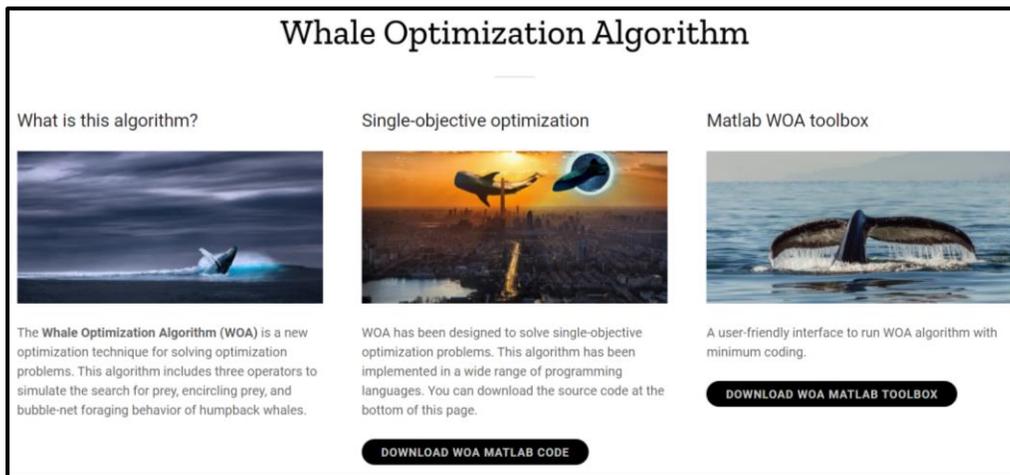


Figura 42. Sitio web de *Whale Optimization Algorithm* (WOA), algoritmo propuesto por Mirjalili et al.<sup>[84]</sup>. (<https://seyedalimirjalili.com/woa>).

Está claro que una parte importante de este problema se origina por la falta de un lenguaje común que facilite la comparación de los nuevos métodos presentados, para subsanar esta deficiencia Sörensen<sup>[59]</sup> propone las siguientes prácticas:

- Mostrar los componentes del algoritmo
- Indicar dónde aparecen esos componentes en otros algoritmos
- Señalar la manera en que se aplican para resolver el problema de interés

#### 1.4.8. No Free Lunch

La ingente cantidad de algoritmos existentes puede fácilmente abrumar a las personas que recién se están iniciando en este campo. Al conocer tal variedad de algoritmos y no disponer de tiempo suficiente para revisarlos todos, cualquiera desearía que alguien simplemente le señalara el mejor de todos para enfocarse únicamente en él y, así, evitar una pérdida de tiempo. Desafortunadamente y, a pesar de lo que pueden afirmar muchos

investigadores sobre sus propios algoritmos, la verdad es que se ha demostrado que no existe un algoritmo que siempre se desempeñe mejor que el resto de métodos propuestos.

En 1996, Wolpert et al.<sup>[100]</sup> enunciaron dos teoremas a los que llamaron “*No Free Lunch Theorems*” (NFL). De manera resumida, estos teoremas afirman que el desempeño de dos algoritmos de búsqueda cualesquiera, aplicados a todos los problemas de optimización posibles, es prácticamente idéntico bajo cualquier métrica. Este resultado tiene dos implicaciones importantes:

- Si nosotros utilizamos dos algoritmos de búsqueda (denominémoslos A y B) para resolver todos los problemas posibles de optimización, habrá problemas para los cuales A se desempeñe mejor que B y viceversa, manteniéndose esto cierto aún si uno de los dos algoritmos es simplemente una búsqueda aleatoria.
- Para que NFL se cumpla, es necesario que valores altos de desempeño, en un conjunto de problemas, sean pagados con bajos desempeños en el resto, es decir, mientras más especializado esté un algoritmo en resolver un conjunto de problemas, peor se desenvolverá para el resto de problemas posibles.

En la Figura 43 se presenta un esquema para ayudar a ejemplificar los puntos anteriores.

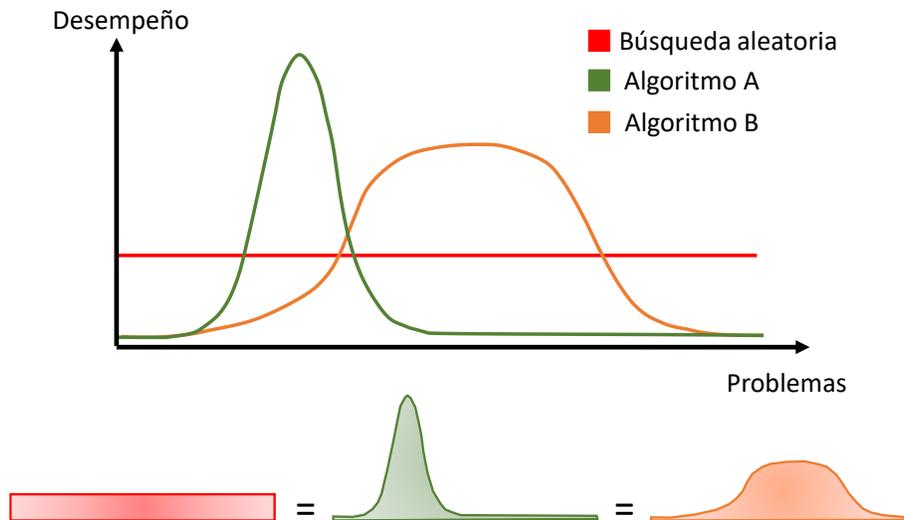


Figura 43. Comparación del desempeño de una búsqueda aleatoria y dos algoritmos de búsqueda cualesquiera A y B.

#### 1.4.9. Problemas de optimización

Para aplicar las MH's en la resolución se problemas de difícil optimización, es necesario definir cuatro elementos básicos:

- **Objeto a optimizar:** Característica que se quiere maximizar o minimizar.
- **Variables y parámetros:** Las variables son los valores susceptibles de ser modificados durante el proceso de optimización, mientras que los parámetros son variables que se requieren para definir nuestro objeto a optimizar pero que se mantienen en valores fijos durante la búsqueda.
- **Función objetivo:** Expresión matemática que mide la calidad de una solución en base al concepto que se quiere optimizar.
- **Restricciones:** Definen las condiciones que deben de cumplir las soluciones propuestas para ser factibles.
- **Algoritmo de optimización:** La MH que se va a emplear para resolver el problema.

Al conjunto de todas las soluciones que se pueden proponer por medio de la función objetivo y las variables establecidas se le conoce como espacio de soluciones. Como ya se comentó, una de las ventajas que presentan las MH's es que no requieren que el espacio de soluciones sea ni suave ni diferenciable para realizar el proceso de optimización<sup>[66]</sup>.

A continuación, se presentan algunos conceptos de los problemas de optimización, considerando que se realiza una minimización. De manera formal, los problemas de optimización se pueden definir de la siguiente manera:

$$\min \{f(\mathbf{x}) \mid \mathbf{x} \in \bar{\mathbf{X}}, \bar{\mathbf{X}} \subseteq \mathcal{S}\} \quad (45)$$

Sujeto a:

$$g_i(\mathbf{x}) \leq 0 \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, m\}$$

$$h_i(\mathbf{x}) = 0 \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}$$

$$a_j \leq x_j \leq b_j \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, p\}$$

Donde  $g_i$  y  $h_i$  son las restricciones del problema,  $a_j$  y  $b_j$  son los límites de las variables de decisión,  $\mathcal{S}$  es el espacio de soluciones,  $\bar{\mathbf{X}}$  es el conjunto de soluciones factibles,  $f(\mathbf{x})$  es la función objetivo y  $\mathbf{x}$  es una solución formada por el vector de variables de decisión:

$$\mathbf{x}^T = \{x_1, x_2, \dots, x_q\} \quad (46)$$

Donde  $q$  es el tamaño del problema. La solución  $\mathbf{x}^*$  es óptima si cumple que:

$$f(\mathbf{x}^*) \leq f(\mathbf{x}) \quad \forall \mathbf{x} \in \bar{\mathbf{X}} \quad (47)$$

Los problemas de optimización se pueden definir en función de las características de  $\mathbf{x}$  y de  $\mathcal{S}$ . Si  $\mathcal{S} \in \mathbb{R}^N$  se define como un problema de optimización continua. Cuando  $\mathcal{S}$  es finito, pero muy grande, el problema se define como de optimización combinatoria<sup>[101]</sup>. Por otra parte, en función de las características de  $\mathbf{x}$ , se pueden presentar los siguientes casos<sup>[58]</sup>:

- Si  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}$  es un problema continuo.
- Si  $\mathbf{x} \in \{0,1\}$  es un problema binario.
- Si  $\mathbf{x} \in \mathbb{N}$  es un problema de enteros.
- Si  $\mathbf{x} \in \mathbb{N}$ ,  $1 \leq x_i \leq m$ ;  $x_i \neq x_j$  si  $i \neq j$  es un problema de permutaciones.

Existen problemas para los cuales se requiere optimizar más de un objetivo, estos se conocen como problemas de optimización multiobjetivo y se definen de la siguiente manera:

$$\min \{f_1(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x}) \mid \mathbf{x} \in \bar{\mathbf{X}}, \bar{\mathbf{X}} \subseteq \mathcal{S}\} \quad (48)$$

Donde  $k$  es el número de funciones objetivo del problema. Coello<sup>[61]</sup> indica que cuando existe un único punto que optimice de manera simultánea todas las funciones objetivo es porque no existe conflicto entre ellas, al ser esto poco común, en estos problemas se suelen buscar puntos de equilibrio entre los objetivos a optimizar. Una forma de hacerlo es por medio del Optimo de Pareto<sup>[102]</sup>. Una solución  $\mathbf{x}^* \in \bar{\mathbf{X}}$  es un óptimo de Pareto si no existe otro vector  $\mathbf{x} \in \bar{\mathbf{X}}$  de tal manera que:

$$\begin{aligned} f_i(\mathbf{x}) &\leq f_i(\mathbf{x}^*) \quad \forall i = 1, 2, \dots, k \\ f_j(\mathbf{x}) &< f_j(\mathbf{x}^*) \text{ para al menos un valor de } j \end{aligned} \quad (49)$$

Esto significa que no existe un vector posible de las variables de decisión  $\mathbf{x} \in \bar{\mathbf{X}}$  que podría reducir algún criterio sin causar, de manera simultánea, un incremento en al menos otro criterio<sup>[61]</sup>. Es usual que existan múltiples óptimos de Pareto, conociéndose a la imagen formada por el conjunto de éstos como Frontera de Pareto.

Debido a que en el presente trabajo se busca utilizar la MH conocida como SA en el área de la ingeniería estructural, específicamente en la optimización del refuerzo de estructuras aporticadas por medio de disipadores de tipo CRP, es que a continuación se presenta una descripción detallada del algoritmo.

#### 1.4.10. *Simulated Annealing* (SA)

*Simulated Annealing* (SA) es considerada como una de las MH's más antiguas ya que fue presentada en un artículo de la revista *Science* por Kirkpatrick et al.<sup>[64]</sup> en el año de 1983. La parte innovadora del algoritmo fue que, durante el proceso de búsqueda, no solo se aceptaban soluciones mejores, sino también introducía la posibilidad de aceptar algunas peores. SA hace una analogía con la formación de cristales a partir de masas fundidas a altas temperaturas<sup>[103]</sup>. Si la masa fundida es enfriada de manera súbita, los átomos que la forman no tendrán tiempo de crear un patrón organizado, dando lugar a imperfecciones en el cristal. Para evitar esto, es necesario aplicar un programa de enfriamiento que permita llegar a estados ordenados de baja temperatura. A ese proceso se le conoce como recocido (o *annealing*, en inglés) en la industria metalúrgica.

Para generar una MH que empleara los conceptos del recocido, Kirkpatrick utilizó el algoritmo Metropoli, proveniente del área de la mecánica estadística. Este algoritmo, el cual simula el arreglo que presentan los átomos a una temperatura dada<sup>[64]</sup>, emplea la distribución de Boltzmann:

$$e^{-\frac{\Delta E}{k_b T}} \quad (50)$$

Donde  $\Delta E$  es el incremento de energía,  $T$  es la temperatura y  $k_b$  es la constante de Boltzmann. Traduciendo esto a un problema de optimización,  $k_b$  se vuelve innecesaria, por lo tanto, se considera con valor igual a la unidad, se conserva el concepto de temperatura  $T$  y el incremento de energía  $\Delta E$  se convierte en la degradación de la función objetivo.

$$\Delta E = f(x') - f(x) > 0 \quad (51)$$

Donde  $f(x)$  y  $f(x')$  son los valores de la función objetivo para la solución actual ( $x$ ) y la solución peor encontrada ( $x'$ ), respectivamente y considerando un problema de minimización. En base a lo anterior, la solución degradada es aceptada con una probabilidad de:

$$e^{-\left[\frac{f(x')-f(x)}{T}\right]} \quad (52)$$

En la Figura 44 se muestra de manera esquemática la probabilidad de aceptación en función del incremento de la función objetivo y considerando diferentes temperaturas. De la figura se observa que la probabilidad de aceptar una solución peor es inversamente

proporcional al incremento de la función objetivo y disminuye a medida que decrece la temperatura.

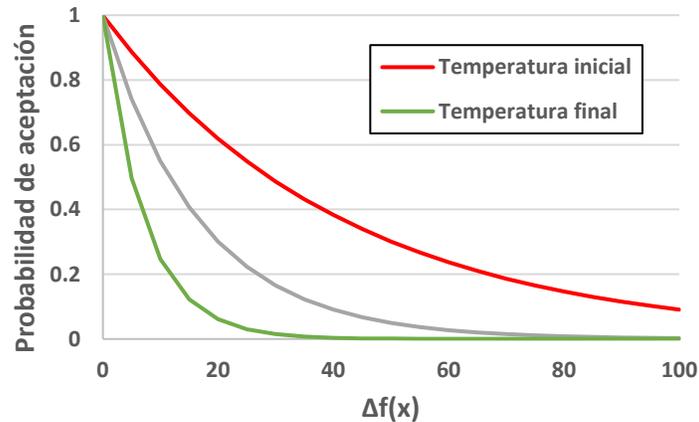


Figura 44. Ejemplo de la distribución de probabilidad utilizada en SA para aceptar soluciones peores.

En SA la temperatura del proceso disminuye siguiendo un programa o esquema de enfriamiento. Para cada valor de temperatura  $T$ , se revisan un número  $m$  de posibles soluciones. Este proceso se conoce como cadena de Márkov debido a que sigue una trayectoria en la cual, el estado sucesor, es escogido dependiendo únicamente del estado actual<sup>[49]</sup>.

Es claro que la temperatura y el programa de enfriamiento juegan un rol central en el desempeño de SA. En lo que refiere a la temperatura, su valor define tanto el criterio de parada como el enfoque de búsqueda que presenta el algoritmo. Valores de temperatura muy altos permiten que el algoritmo busque en zonas inexploradas del espacio de soluciones, aunque también pueden provocar que se comporte con una búsqueda aleatoria<sup>[66]</sup>. Por otra parte, las temperaturas bajas permiten que la búsqueda se enfoque en una zona específica<sup>[59]</sup>. Para controlar esto, Medina et al.<sup>[104]</sup> proponen que la temperatura inicial sea una fracción del valor de la función objetivo para la solución inicial. El algoritmo se detiene cuando la temperatura disminuye hasta un cierto porcentaje de la temperatura inicial, siendo valores usuales el 1% o 2% de ésta<sup>[103,104]</sup>, este criterio de parada es conocido como criterio de congelación.

En lo que respecta al programa de enfriamiento, se sabe que SA converge al óptimo global cuando el algoritmo se corre por un tiempo que tiende a infinito y para ciertos programas de enfriamiento<sup>[49,65,105]</sup>. Desafortunadamente, y aún si no tomáramos en cuenta el inconveniente de correr SA por un tiempo extremadamente largo, los programas de

enfriamiento que permiten la convergencia son demasiado lentos, por lo que es usual emplear un decrecimiento geométrico de la temperatura<sup>[49]</sup>. En un decrecimiento geométrico, la temperatura de la cadena de Márkov siguiente es proporcional a la temperatura actual por medio de un coeficiente de enfriamiento  $K$ .

$$T_{j+1} = K \cdot T_j \quad (53)$$

Tomando en cuenta todo lo expuesto anteriormente, en la Figura 45 se presenta el pseudo – código genérico de SA.

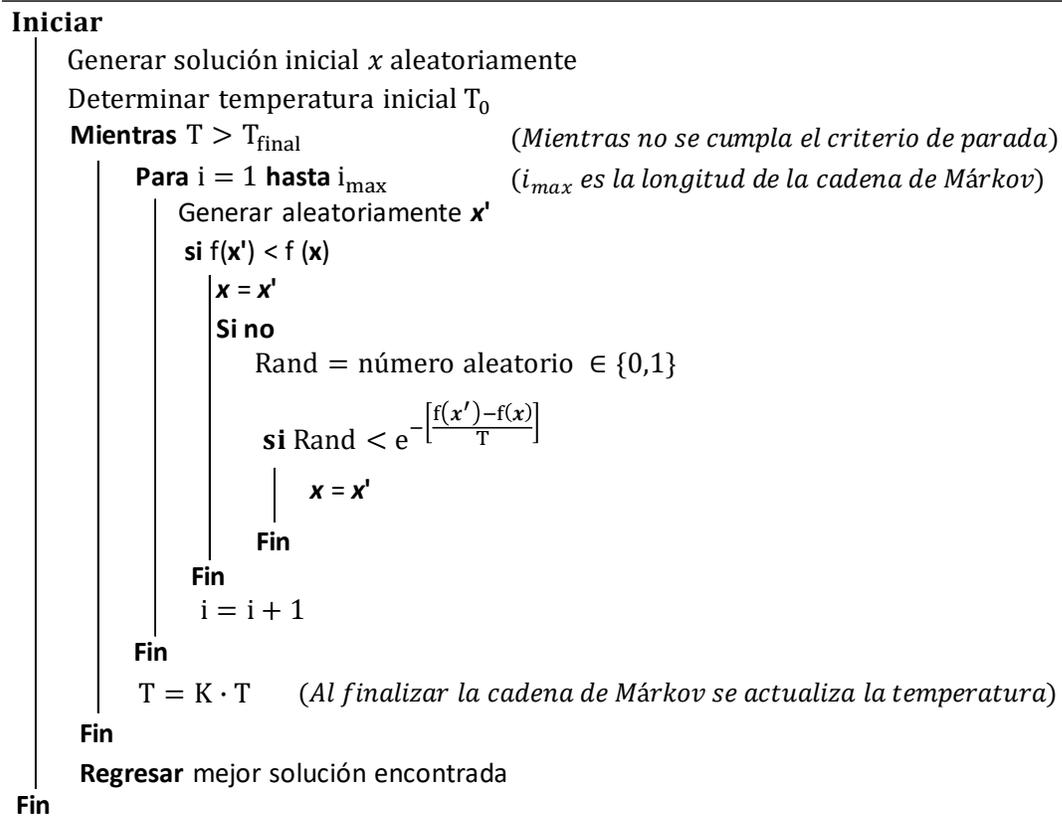


Figura 45. Pseudo – código de SA.

Para finalizar este capítulo, se brinda una revisión de diferentes trabajos publicados que se encuentran relacionados con la optimización de estructuras. Los trabajos consultados emplean tanto métodos determinísticos como estocásticos, haciéndose una división entre la optimización de estructuras sometidas a cargas convencionales y estructuras sometidas a cargas sísmicas, el cual es el tema que nos interesa aquí principalmente.

## 1.5. APLICACIÓN DE LA OPTIMIZACIÓN EN LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL

### 1.5.1. Tipos de problemas de optimización en la ingeniería estructural

Hay múltiples áreas en las que se pueden utilizar las MH's para optimizar problema, sin embargo, aquí nos enfocaremos únicamente en su uso en la ingeniería estructural. Zavala et al.<sup>[106]</sup> indican que, en general, se presentan dos tipos de problemas:

- **Diseño de elementos:** Esto es todo lo relacionado a la optimización de formas y dimensiones de los elementos de una estructura.
- **Diseño tipológico:** En estos casos se define la forma completa de la estructura con el objetivo de encontrar el diseño óptimo.

En los dos tipos de problemas presentados por Zavala, se suele optimizar el costo de la estructura o su peso, esto último cuando se trata de una estructura metálica. De manera adicional, existen otros problemas relacionados a la actualización de modelos de elementos finitos. En esta clase de problemas, se busca que la respuesta del modelo computacional de una estructura sea lo más parecida posible a su homóloga real al ser ensayada en un laboratorio<sup>[107,108]</sup>. En estos casos, lo que se mínima es el error de la respuesta del modelo de elementos finitos.

A continuación, se presentará una revisión bibliográfica sobre la aplicación de los procesos de optimización, ya sea por métodos estocásticos o determinísticos, en la ingeniería estructural. Debido a la gran cantidad de trabajos existentes sobre este tema, solo se reportan sus características más importantes y unas cuantas conclusión. Los trabajos revisados fueron divididos en dos categorías: Optimización de estructuras considerando acciones convencionales y Optimización de estructuras considerando acciones sísmicas. Al final de la sección, se brindan unas cuantas conclusiones sobre los aspectos remarcables de los trabajos revisados.

### 1.5.2. Optimización convencional de estructuras

- (1966) Barron et al. presentan un programa para minimizar el costo de la superestructura de puentes de carretera pretensados de una sola luz. El proceso de optimización se realiza por medio de métodos de programación no lineal<sup>[109]</sup>.

- (1984) Cohn et al. minimizan el costo de una viga de hormigón armado por medio de un método de programación no lineal.<sup>[110]</sup>.
- (1987) Plaut determina la distribución óptima de rigidez en cimentaciones para algunos casos específicos. En este trabajo no se emplean algoritmos metaheurísticos y, en cambio, la distribución óptima de rigidez es determinada por medio del análisis del comportamiento mecánico de las cimentaciones estudiadas<sup>[111]</sup>.
- (1991) Balling utiliza el algoritmo metaheurístico conocido como *Simulated Annealing* para optimizar la estructura de un edificio tridimensional irregular de 6 plantas. Se comparan los resultados obtenidos por SA con el algoritmo de programación no lineal conocido como Branch and Bound, observándose un mayor robustez del algoritmo de optimización con SA<sup>[112]</sup>.
- (1993) Chakrabarty presenta el problema de optimizar el diseño de una viga de hormigón armado, de tal manera que el costo del diseño propuesto sea el mínimo posible. Se utilizan algoritmos de programación no lineal, con lo cual, el proceso de optimización es determinístico<sup>[113]</sup>.
- (1993) Lounis et al. realizan la optimización multiobjetivo de estructuras de hormigón pretensado, específicamente elementos tipo viga. En este trabajo se emplea el método Lagrange de optimización, el cual es un método matricial determinístico<sup>[114]</sup>.
- (1994) Hajela et al. realizan el proceso de optimización de una armadura cumpliendo los requisitos de rigidez y resistencia, tanto la topología de la armadura como las dimensiones de sus elementos son considerados como variables de decisión en el proceso de optimización. En este trabajo se busca minimizar el peso de la estructura, siendo algoritmos genéticos la metaheurística utilizada<sup>[115]</sup>.
- (1995) Cohn et al. optimizan el diseño de la superestructura de puentes de carretera de corta y mediana luz. Un método de programación no lineal es utilizado en este trabajo. Debido a que se toman en cuenta múltiples aspectos del diseño de la estructura, el problema es dividido en diferentes etapas de optimización<sup>[116]</sup>.
- (1996) Kacer et al. optimizan el diseño de postes de transmisión pretensados por medio de algoritmos genéticos y el algoritmo *Branch and Bound*. Como parte de las conclusiones, los autores indican que los algoritmos genéticos presentaron un mejor

desempeño en comparación con la estrategia de optimización conocida como *Branch and Bound*<sup>[117]</sup>.

- (1997) Coello et al. optimizan una viga de hormigón armado simplemente apoyada por medio de algoritmos genéticos. En el proceso de optimización se buscó minimizar el costo total de la viga<sup>[118]</sup>.
- (1998) Rajeev et al. optimizan el diseño de marcos planos de hormigón armado por medio de algoritmos genéticos. Los autores indican que, hasta ese momento, solía ser común utilizar variables de decisión continuas, siendo necesario su modificación para alcanzar diseños más realistas. En este trabajo se utilizan variables de decisión con valores discretos, existentes en un intervalo definido por el usuario. Esta forma de definir los posibles valores de las variables de decisión permite alcanzar diseño óptimos más realistas<sup>[119]</sup>.
- (1998) Jenkins hace una revisión sobre cómo implementar los algoritmos genéticos en la optimización de problemas ingenieriles. Como ejemplo práctico, optimiza el diseño de una viga de hormigón armado<sup>[120]</sup>.
- (1998) Fadee et al. minimizan el costo de una estructura aperturada en 3D de hormigón armado, de un solo nivel y con muros de carga. Se emplea el método conocido como Criterio de Optimalidad, el cual utiliza derivadas parciales para obtener los valores óptimos de las variables de decisión, con lo cual, se emplea un método determinístico en este caso<sup>[121]</sup>.
- (1998) Koumoussis et al. utilizan algoritmos genéticos para optimizar los detalles constructivos de una viga continua de hormigón armado. En este trabajo no solo se define el diámetro y la cantidad de varillas a utilizar, sino que también se encuentra la longitud y la disposición que éstas deben presentar para minimizar el peso de la estructura y la cantidad de armado requerido, maximizando a su vez la uniformidad de los detalles constructivos<sup>[122]</sup>.
- (1999) Manoharan et al. optimizan una serie de armaduras por medio de tres algoritmos metaheurísticos: *Tabu Search*, *Simulated Annealing* y Algoritmos Genéticos. En este trabajo también se pone a prueba el algoritmo conocido como *Branch and Bound*, el cual enumera las posibles soluciones del problema y enfoca la búsqueda en aquellas más prometedoras. El estudio concluye que todos los algoritmos metaheurísticos son capaces

de localizar óptimos satisfactorios para los casos estudiados siendo esto no aplicable para el algoritmo *Branch and Bound*<sup>[123]</sup>.

- (2000) Coello et al. proponen utilizar un algoritmo genético multiobjetivo para optimizar dos armadura de 25 y 200 elementos. En el proceso se buscó minimizar el peso de la estructura y maximizar los esfuerzos al que las barras se encontraban sometidos<sup>[124]</sup>.
- (2002) Hasançebi et al. realizan el proceso de optimización de una armadura, nuevamente se modifica tanto su tipología como las dimensiones de sus elementos. En esta ocasión, se utiliza *Simulated Annealing* como algoritmo de optimización. El proceso minimiza el peso de la estructura tomando en cuenta las restricciones impuestas por el código de referencia, es decir, desplazamientos, esfuerzos máximos y estabilidad de la estructura. Se utilizan secciones comerciales con sus respectivas propiedades para definir la estructura<sup>[125]</sup>.
- (2003) Lepš et al. optimizan elementos hiperestáticos tipo viga, de hormigón armado, por medio de algoritmos genéticos en combinación con una versión de *Simulated Annealing*<sup>[126]</sup>.
- (2004) Fairbairn et al. minimizan el costo de elementos de hormigón en masa por medio de Algoritmos Genéticos. Como variable se consideran el tipo de material, la temperatura de colocación, la altura y tiempo entre colados. El proceso fue ejemplificado por medio de la optimización de una presa de gravedad<sup>[127]</sup>.
- (2005) Charmpis et al. proponen combinar la optimización en cascada con Algoritmos Evolutivos para optimizar la estructura de un edificio tridimensional de acero. La optimización en cascada se refiere al proceso de aplicar múltiples algoritmos de optimización, de manera secuencial, para optimizar un problema<sup>[128]</sup>.
- (2007) Hong et al. estudian los procedimientos de mantenimiento, reparación, rehabilitación y reemplazo de puentes de carretera en los Estados Unidos, proponiendo una metodología para identificar la estrategia óptima que permita minimizar los costos generados por esta clase de infraestructura durante su vida útil<sup>[129]</sup>.
- (2007) Dissanayake et al. realizan la optimización de vigas de hormigón pretensado por medio de algoritmos de optimización no lineal y el programa SAP2000. Se utiliza un método determinístico que, en palabras del autor, es dependiente de la experiencia del

usuario para definir una solución inicial de alta calidad y para escoger la trayectoria que debe seguir el algoritmo para alcanzar el diseño óptimo al problema<sup>[130]</sup>.

- (2008) Degertekin et al. optimizan un marco tridimensional de acero. En el proceso de optimización se minimiza el peso de la estructura, considerándose perfiles disponibles comercialmente e imponiéndose las restricciones establecidas en reglamento. La estructura se optimiza por Algoritmos Genéticos y *Tabu Search*, Los resultados obtenidos por ambos algoritmos son comparados, encontrándose que TS brindó una estructura óptima con un peso ligeramente inferior en comparación con los diseños hallados por AG<sup>[131]</sup>.
- (2009) Biondini et al. optimizan el diseño de elementos de hormigón armado, de tal manera que el daño por corrosión sea mínimo a lo largo de su vida útil. Para simular la difusión de los agentes agresivos y el subsecuente daño en la armadura de refuerzo, se utilizan simulaciones de Monte Carlo. Un resultado remarcable es que el daño por corrosión no solo es dependiente del recubrimiento sino también de la cantidad y disposición de la armadura de refuerzo<sup>[132]</sup>.
- (2009) En este trabajo, Atabay optimiza un marco tridimensional de hormigón armado cuyo sistema estructural se conforma por muros de carga. Se utilizan Algoritmos Genéticos para el proceso de optimización, durante el cual se minimiza el costo de los materiales requeridos para la construcción de los muros de carga. Para el análisis de la estructura se utiliza el programa GENOPT<sup>[133]</sup>.
- (2010) Malekly et al. proponen una metodología basada en una toma sistemática de decisiones para identificar las características del puente carretero que mejor se adapte a los requerimientos de diseño. Es un proceso de optimización en el aspecto de que se busca llegar al mejor diseño posible por medio del descarte de aquellos que presenten la menor sintonía con el problema en cuestión. No es un proceso determinístico ya que depende de la opinión y conocimiento de los expertos consultado para la toma de decisiones, sin embargo, tampoco es un proceso estocástico<sup>[134]</sup>.
- (2010) Martínez et al. realizan la optimización económica de pilas cortas de puentes, compuestas por secciones rectangulares huecas de hormigón armado. El proceso se realiza por medio de tres metaheurísticas distintas: Algoritmos Genéticos, *Ant Colony Optimization* y *Threshold Acceptance*. El costo del mejor óptimo encontrado presentó

una reducción del costo del 33% en comparación con el costo típico de esta clase de estructuras<sup>[135]</sup>.

- (2011) Martínez et al. realizan la optimización económica de tres pilas de puentes de 90 metros de altura, compuestas por una sección rectangular hueca de hormigón armado. Esta clase de estructuras son utilizadas para sustentar viaductos que cruzan valles profundo. El algoritmo metaheurístico utilizado fue *Ant Colony Optimization*<sup>[136]</sup>.
- (2012) En este trabajo, De Albuquerque et al. optimizan el diseño de un sistema de piso elaborado por medio de viguetas prefabricadas. Como variables de decisión se consideran las características de las viguetas y su disposición en planta. Se consideran los costos de manufactura, transporte y ejecución. La metaheurística utilizada es Algoritmos Genéticos<sup>[137]</sup>.
- (2015) Yeo et al. optimizan el diseño sustentable de una estructura de hormigón armado. En este caso, en lugar de minimizar el costo de la estructura, el proceso de optimización busca identificar el diseño que emita la mínima cantidad de CO2 producto de la manufactura de los materiales empleados en su construcción. Una conclusión remarcable del estudio es que los diseños que brindan una menor huella de CO2 son aquellos que poseen una mayor cantidad de acero de refuerzo, esto en comparación con los diseños óptimos obtenidos al minimizar el costo de la misma estructura<sup>[138]</sup>.
- (2016) Ashwini et al. realizan una muy breve revisión bibliográfica sobre las técnicas de optimización aplicadas al campo de la ingeniería estructural. Se indica que hoy en día existen una gran variedad de algoritmos de optimización capaces de resolver problemas complejos de manera efectiva y eficiente, siendo además tendencia el combinar programas enfocados en la optimización con aquellos pensados para el análisis estructural por medio del método de elementos finitos<sup>[139]</sup>.
- (2019) Hofmeister et al. presentan una estrategia de optimización para la actualización de modelos de elementos finitos. En estos procesos se busca calibrar la respuesta del modelo numérico de una estructura, de tal que la respuesta del modelo coincida con los resultados obtenidos al someter a la estructura real a pruebas de laboratorio. El proceso de optimización es de tipo determinístico. La estructura estudiada se trata de la hoja de una turbina eólica que ha sufrido daño estructural<sup>[107]</sup>.

- (2019) Negrin et al. realizan el proceso de optimización de estructuras tipo pórtico plano de un nivel y de hormigón armado, por medio de Algoritmos Genéticos y el algoritmo Nelder – Mead. El análisis de la estructura se realizó por medio del programa de elementos finitos SAP2000. Durante el proceso se buscó minimizar el costo de construcción de la estructura<sup>[140]</sup>.
- (2021) En este trabajo, Do et al. plantean el problema de identificar el diseño óptimo de marcos de acero, considerando los efectos de la incertidumbre en las características de los materiales empleados. En este caso, se busca que el diseño óptimo sea robusto contra las variaciones de las propiedades de los materiales. Para optimizar el diseño se utiliza un algoritmo basado en una búsqueda aleatoria<sup>[141]</sup>.
- (2021) Dillen et al. optimizan el diseño de una estructura existente, la cual es el techo del mercado de la ciudad belga de Gante. Este trabajo destaca debido a que se realiza el proceso de optimización, por medio de Algoritmos Genéticos, a una estructura real previamente construida. Gracias al proceso de optimización, se obtuvo un nuevo diseño que requería un 15% menos de material en comparación con el diseño obtenido por el despacho ingenieril encargado del proyecto<sup>[142]</sup>.
- (2021) Kaveh et al. optimizan el diseño de un marco de acero por medio de un algoritmo metaheurístico propuesto por el autor, el cual se basa en el ya conocido *Colliding Body Optimization*<sup>[143]</sup>.

### 1.5.3. Optimización sísmica de estructuras

- (2005) Zou et al. proponen un método determinístico para minimizar la cantidad de acero de refuerzo que requieren las estructuras aperticadas en 2D, de hormigón armado, para cumplir con los requerimientos de un diseño basado en desempeño. Las estructuras son evaluadas por medio de análisis estáticos no lineales (*Pushover*)<sup>[144]</sup>.
- (2008) Shook et al. utilizan algoritmos genéticos para optimizar el sistema de control de amortiguadores magneto – reológicos. En este trabajo se prueba el modelo de una estructura de 3 niveles y 9 metros de alto en una mesa vibradora para verificar los resultados<sup>[145]</sup>.
- (2009) Farhat et al. realizan la optimización del diseño de una estructura en 2D equipada con disipadores de tipo CRP, siendo consideradas como variable de decisión las áreas

transversales de los CRP's. En el problema solo se consideran 4 variables de decisión, lo cual se puede considerar como un número bajo. Los resultados obtenidos muestran que las mayores demandas se encontraban en el primer nivel de la estructura, siendo necesario instalar el CRP de mayor área transversal en dicho nivel. En los niveles 2 a 5 se utilizaron las áreas mínimas por lo que cabe pensar que no resultaba necesario instalar disipadores en estos. En este trabajo se realiza el proceso de optimización por medio de Algoritmos Genéticos, ejecutándose análisis dinámicos no lineales para verificar los modelos. Las estructuras propuestas fueron modeladas en el programa de elementos finitos Y-fiber 3D<sup>[146]</sup>.

- (2009) Balling et al. optimizan el diseño de una estructura equipada con disipadores de tipo CRP por medio de análisis dinámicos no lineales. Como variables de decisión se toman las áreas transversales de los disipadores, empleándose Algoritmos Genéticos para encontrar la solución óptima. Uno de sus resultados más remarcables fue que la solución óptima encontrada presentaba una distribución casi lineal en altura de las áreas transversales de los CRP's<sup>[11]</sup>.
- (2010) Kaveh et al. optimizan el diseño basado en desempeño de un marco plano de acero por medio del algoritmo *Ant Colony Optimization*. Los resultados obtenidos son comparados con aquellos obtenidos por Algoritmos Genéticos. En el proceso de optimización se buscó minimizar el peso de la estructura<sup>[147]</sup>.
- (2011) Hajirasouliha et al. optimizan el diseño sísmico de una armadura por medio de un algoritmo determinístico que considera una variación de la distribución de fuerzas sísmicas producto de la respuesta plástica de la estructura. Como variables de decisión se consideran las áreas transversales de los elementos y la topología de la armadura<sup>[148]</sup>.
- (2012) Ohsaki et al. optimizan los rigidizadores empleados en marcos de acero equipados con contravientos excéntricos. Las variables de decisión son la posición de los rigidizadores y el espesor de placa utilizado, en este trabajo se utiliza el algoritmo metaheurístico de *Tabu Search*. Para verificar las posibles soluciones se utiliza ABAQUS el cual es un programa de elementos finitos<sup>[149]</sup>.
- (2013) Hedayati et al. presentan un criterio multiobjetivo para la optimización del diseño sísmico de puentes equipados con aisladores de base. Se utilizan un análisis paramétrico para optimizar el diseño<sup>[150]</sup>.

- (2013) Kaveh et al. optimizan el diseño sísmico de marcos planos de acero por medio de dos algoritmos metaheurísticos: *Charge System Search* y *Harmony Search*. El objetivo es minimizar el peso del sistema estructural. Como variable de decisión se toman las áreas transversales de los perfiles utilizados, siendo éstos tomados de un catálogo comercial. Se utilizan dos tipos de análisis para verificar los modelos: dinámicos y estáticos<sup>[151]</sup>.
- (2014) Kaveh et al. realizan el proceso de optimización del diseño basado en desempeño de marcos planos de acero. En este trabajo se utiliza el algoritmo conocido como *Charged System Optimization*. Como variables de decisión se consideran los perfiles utilizados en la estructura y, durante el proceso de optimización, se minimiza el peso de la estructura<sup>[152]</sup>.
- (2014) Liu et al. determinan el diseño de reajuste óptimo de un marco plano de acero, considerando la variabilidad y la incertidumbre asociada a las conexiones del mismo. En este caso se utiliza un algoritmo conocido como *Robust Design Optimization*<sup>[153]</sup>.
- (2015) Gholizadeh optimiza el diseño basado en desempeño de marco planos de acero por medio de algoritmos metaheurísticos. El aporte innovador de este trabajo es el utilizar de manera conjunto el algoritmo conocido como *Firefly Algorithm* en conjunto con redes neuronales, de tal manera que se reduce ligeramente el costo computacional del proceso de optimización (reducción de tiempo de cómputo de entre un 11% a 4%). Para verificar los modelos se emplean análisis estáticos no lineales<sup>[154]</sup>.
- (2016) Papavasileiou et al. optimizan el diseño sísmico de estructuras tridimensionales conformadas por elementos compuestos. El objetivo de algoritmo es minimizar el costo total de la estructura. Para verificar los modelos se utilizan análisis estáticos no lineales. En este trabajo se utilizan Estrategias Evolutivas como algoritmo de optimización. Para obtener diseños realistas se agrupan los elementos en grupos, lo cual también permite reducir el número de variables de decisión del problema<sup>[155]</sup>.
- (2017) Zhang et al. optimizan el diseño de una torre de toma de gran altura, equipada con un amortiguador de masa sintonizada para resistir acciones sísmicas. Los modelos son verificados por medio del programa de elementos finitos ADYNA y se utiliza el algoritmo metaheurístico conocido como *Harmony Search*<sup>[156]</sup>.

- (2017) Léger et al. optimizan el diseño de una estructura tridimensional de hormigón armado con aisladores de base. En este trabajo se consideran las incertidumbres asociadas a las cargas aplicadas y propiedades de los materiales. Se utiliza un algoritmo determinístico para el proceso de optimización, siendo los modelos analizados por medio del programa SAP2000<sup>[157]</sup>.
- (2017) Kaveh et al. optimizan el diseño sísmico de marcos planos de acero considerando como variables de decisión el tipo de conexión empleada, es decir, si éstas son simples o rígidas. Se utilizan dos metaheurísticas: *Colliding Bodies Optimization* y *Particle Swarm Optimization*. Como conclusión remarcable se indica que es posible obtener mayores ahorros de material cuando se optimizan de manera simultánea tanto los perfiles estructurales empleados como sus conexiones, en lugar de ambos aspectos por separado<sup>[158]</sup>.
- (2018) Bekdaş et al. optimizan el diseño del amortiguador de masa sincronizada instalado en un edificio de 10 niveles. Las variables de diseño consideradas son la masa, el periodo y el coeficiente de amortiguamiento de la masa sincronizada. En este trabajo se utiliza un algoritmo metaheurístico basado en el denominado *Bat Algorithm*<sup>[159]</sup>.
- (2018) Mokarram et al. proponen un método para reducir el costo computacional de optimizar estructuras evaluadas por medio de análisis dinámicos no lineales. Por claros motivos, el usar estos análisis en la optimización de estructuras sometidas a un diseño basado en desempeño puede tomar un tiempo excesivamente alto, este trabajo busca reducir este inconveniente por medio de un algoritmo metaheurístico basado en *Particle Swarm Optimization* y Algoritmos Evolutivos<sup>[160]</sup>.
- (2018) Seo et al. optimizan la maniobra de refuerzo de una estructura de hormigón armado contra cargas sísmicas. Las variables de decisión son el número y la posición de las columnas a reforzar. En este trabajo se utiliza el algoritmo metaheurístico de *Ant Colony Optimization*. Los resultados indican que es posible cumplir con los requisitos de desempeño reforzando únicamente el 60% de las columnas de la estructura. Los modelos son evaluados por medio de análisis dinámicos no lineales empleando el programa de elementos finitos LS-DYNA<sup>[161]</sup>.
- (2019) Ontiveros et al. optimizan el procedimiento de rehabilitación de una estructura de hormigón armado por medio de disipadores de fricción, en este trabajo se utiliza el algoritmo metaheurístico llamado *Search Group Algorithm*. Como variables de decisión

se consideran la distribución de los amortiguadores en la estructura y su correspondiente fuerza de fricción<sup>[162]</sup>.

- (2019) Boscardin et al. realizan el proceso de optimización de un marco de hormigón armado. En este caso, los elementos de la estructura se agrupan de tal manera que se reduce el número de variables del problema y se genera una solución más realista. Como variables de decisión se toman las dimensiones de los elementos, las áreas de la armadura de refuerzo, la resistencia del hormigón y el número de grupos de elementos estructurales a emplear. Se utiliza el algoritmo conocido como *Harmony Search*<sup>[163]</sup>.
- (2019) Razmara et al. realizan la optimización de marcos planos por medio de un algoritmo metaheurístico basado en *Particle Swarm Optimization* y Algoritmos Genéticos. La estructura es sometida a un diseño basado en desempeño. Los modelos son verificados por medio de análisis estáticos y dinámicos no lineales, ejecutados en el programa de elementos finitos OpenSees, mientras que el proceso de optimización se realiza en Matlab<sup>[164]</sup>.
- (2019) Azizi et al. optimizan el sistema de control de actuadores para controlar la vibración de estructura tridimensional de acero. En palabras del autor, en este trabajo, el desempeño del sistema de control se define en función de la respuesta sísmica no lineal de la estructura. El sistema de control es optimizado por medio de un algoritmo metaheurístico basado en *Whale Optimization Algorithm*<sup>[165]</sup>.
- (2020) Fathali et al. realizan el proceso de optimización de una serie de pórticos planos de acero equipados con contravientos convencionales excéntricos. El problema es planteado como un diseño basado en desempeño y se utilizan análisis estáticos no lineales (*Pushover*) para evaluar la capacidad de la estructura. Durante el proceso se buscó minimizar el peso total de la estructura. Cuatro algoritmos metaheurísticos fueron utilizados: *Accelerated Water Evaporation*, *Particle Swarm Optimization*, *Colliding Bodies Optimization* y *Enhanced Colliding Bodies Optimization*<sup>[166]</sup>.
- (2020) Un método de diseño de disipadores de tipo CRP con carcasa metálica es propuesto por Pan et al. El método es determinístico y permite definir un diseño que cumpla con los criterios de rigidez y resistencia al pandeo global del elemento empleando un mínimo de material<sup>[30]</sup>.

- (2020) Abedini et al. realizan una optimización multiobjetivo de pórticos planos de acero, de 3 y 6 niveles, con disipadores de tipo CRP en configuración de Chevrón invertido. El tipo de optimización es multiobjetivo, minimizándose el peso de los disipadores y columnas, y a la vez maximizándose la energía disipada por la estructura. Las estructuras fueron evaluadas por medio de análisis dinámicos no lineales realizados en OpenSees. En este trabajo solo se estudian dos parámetros relacionados a los CRP's: el área transversal del núcleo y la longitud de su parte elástica. Dos algoritmos metaheurísticos son utilizados: *Enhanced Colliding Bodies Optimization* y *Salp Swarm Algorithm*. Los resultados obtenidos para el pórtico de 6 niveles no muestran un comportamiento plástico de todos los CRP's utilizados<sup>[167]</sup>.
  
- (2020) Raeesi et al. utilizan el algoritmo metaheurístico conocido como *Grasshopper Optimization Algorithm* para optimizar la respuesta de una clase especial de amortiguadores conocidos como MR (por sus siglas en inglés de *Magneto – Rheological*). Esta clase de amortiguadores utilizan fluidos magnéticos para controlar la vibración de las estructuras donde se instalan, siendo necesario establecer modelos matemáticos complejos que definan su comportamiento. En este trabajo, se utiliza el algoritmo metaheurístico para determinar los valores óptimos de los parámetros utilizados en dichos modelos matemáticos<sup>[168]</sup>.
  
- (2020) Kalemci et al. optimizan muros de retención de hormigón armado, con y sin llave de cortante, por medio del algoritmo conocido como *Gray Wolf Optimization*. En este trabajo se minimiza el peso de la estructura<sup>[169]</sup>.
  
- (2020) Xing et al. optimizan el diseño de un edificio de gran altura rigidizado con sistema *outrigger* y equipado con disipadores de tipo CRP. Los modelos son verificados por medio del programa ANSYS. Los autores además proponen ecuaciones para el diseño preliminar de esta clase de estructuras. En este trabajo no se utilizan algoritmos metaheurísticos, en cambio, se emplea un análisis paramétrico para definir el diseño óptimo del sistema estructural<sup>[170]</sup>.
  
- (2020) Das et al. optimizan el diseño del núcleo de un edificio de gran altura sometido a cargas laterales, rigidizado con sistema *outrigger* y equipado con disipadores conformados por una aleación con memoria de forma. En este trabajo se utiliza el algoritmo Kriging para optimizar el diseño. Este método utiliza funciones de probabilidad, con lo cual no se trata de un proceso determinístico<sup>[171]</sup>.

- (2020) Kaveh et al. optimizan el diseño de edificios de gran altura equipados con disipadores de masa sintonizada, por medio del ajuste de los parámetros que definen el comportamiento pasivo y activo de esta clase de dispositivos. En este trabajo se utiliza un algoritmo metaheurístico basado en el ya conocido *Chaotic Optimization Algorithm*<sup>[172]</sup>.
- (2020) Etedali et al. optimizan el diseño de una estructura equipada con aisladores de base con dispositivo restaurador. El algoritmo utilizado se basa en la metaheurística conocida como *Cuckoo Search*. Las posibles soluciones son verificadas por medio de análisis dinámicos no lineales. Las propiedades de los aisladores de base son consideradas como variables de decisión<sup>[173]</sup>.
- (2020) Rezazadeh et al. optimizan el diseño sísmico de estructuras tridimensionales de acero equipados con disipadores de tipo CRP. En este trabajo se buscan dos objetivos: maximizar la energía disipada por los CRP's y minimizar el peso total de la estructura. Se emplea un algoritmo metaheurístico conocido como *Vibrating Particles System Algorithm*. Para verificar los modelos se utilizan análisis dinámicos no lineales. Las variables de decisión son las áreas transversales de los elementos, tanto de los perfiles estructurales como de los CRP's. En este trabajo los disipadores son dispuestos en Chevrón, manteniéndose fija su distribución durante el proceso de optimización. Los modelos son analizados por medio del programa de elementos finitos OpenSees. Tres estructuras diferentes fueron optimizadas, las cuales tenían 6, 12 y 18 niveles. Los elementos de cada estructura fueron agrupados para reducir el número de variables de decisión, siendo los CRP's homogeneizados de tres en tres niveles. La áreas de los disipadores son decrecientes en altura y no presentan una distribución lineal<sup>[174]</sup>.
- (2020) En este trabajo Keykhosro et al. realizan la optimización de la forma de amortiguadores de deslizamiento, los cuales son elementos metálicos que disipan energía por medio un comportamiento histerético. La optimización de forma tiene como finalidad el maximizar la energía disipada por estos dispositivos. Para la verificación de los modelos se utilizó el programa de elementos finitos ABAQUS, siendo el algoritmo metaheurístico de *Tabu Search* el encargado de realiza el proceso de optimización<sup>[175]</sup>.

#### **1.5.4. Observaciones sobre la optimización en estructuras**

De la revisión bibliográfica realizada para la elaboración de esta sección, se presentan las siguientes observaciones:

- **Existe una gran cantidad de trabajos publicados pero muchos de ellos abordan problemas muy similares.** Como se puede observar, la gran mayoría de los trabajos de optimización están relacionados con el diseño de armaduras, vigas o estructuras aporticadas. Estos trabajos cada vez van introduciendo nuevos conceptos que vuelven ligeramente más complejo el problema, sin embargo, también existen casos en los que los investigadores solo se limitan a utilizar un algoritmo distinto a los empleados hasta el momento, realizando una aportación casi nula al campo de investigación.
- **Actualmente se utiliza una gran variedad de métodos de optimización.** Muchos de los métodos utilizados son algoritmos metaheurísticos, teniéndose una marcada preferencia por los Algoritmos Genéticos, sin embargo, también se observaron trabajos que utilizan otros algoritmos metaheurísticos más recientes. Adicionalmente, se identificaron trabajos que utilizan métodos determinísticos u algoritmos que se apoyan en el criterio del usuario.
- **Cada vez es más común combinar programas de análisis por elementos finitos con los algoritmos de optimización.** Debido al creciente interés por resolver problemas de optimización de manera realista, y al ser estos problemas de elevada complejidad, muchos trabajos recientes han recurrido a una variedad de programas de análisis por medio de elementos finitos, esto para verificar las posibles soluciones durante el proceso de optimización. De entre los programas más utilizados se pueden mencionar SAP2000, ABAQUS y OpenSees.
- **Hay un reducido número de trabajos relacionados con la optimización de estructuras con disipadores de tipo CRP.** Solo se localizaron tres trabajos relacionados con la optimización del diseño sísmico de estructuras con CRP's. En estos se consideran pocas variables de decisión, siendo usual variar las áreas transversales de los disipadores. Adicionalmente, en todos los trabajos revisados, la distribución de los CRP's en los marcos se mantuvo constante durante el proceso de optimización.

## CAPÍTULO 2

### ESTRUCTURA OBJETIVO DE ESTUDIO

#### 2.1. INTRODUCCIÓN

La revisión bibliográfica realizada en el capítulo anterior nos ha brindado un panorama general sobre los disipadores de energía sísmica de tipo CRP, la evaluación del desempeño sísmico de estructuras, los algoritmos metaheurísticos y sus aplicaciones en el ámbito de la ingeniería estructural y sísmica. Refiriéndose específicamente al tema que aquí nos atañe, es decir, identificar el diseño óptimo del sistema disipador para el reajuste del desempeño sísmico de marcos de hormigón, se ha observado que existen pocos trabajos relacionados con dicho problema, estando la mayoría de éstos enfocados a optimizar únicamente el área transversal de los disipadores.

Para subsanar tal deficiencia en este campo de la investigación, aquí se realiza la optimización del sistema disipador considerando como variables de decisión las áreas transversales de los disipadores, sus relaciones de área ( $\eta$ ) y longitud ( $\gamma$ ), y su distribución en el marco. Otro aspecto que diferencia este trabajo de los anteriormente publicados es que aquí todos los disipadores tuvieron una disposición en diagonal, siendo además sus características totalmente independientes de aquellas de los CRP's colocados en otros niveles y/o marcos. Al reducir los costos de implementación por medio de algoritmos metaheurísticos, este tipo de tecnologías de protección sísmica se vuelven más económicas y accesibles, con lo cual este trabajo puede contribuir a incrementar la fiabilidad de estructuras ubicadas en zonas de riesgo sísmico. En base a lo explicado anteriormente, quedan definidas las razones sociales y científico – técnicas que justifican la elaboración de este trabajo de investigación.

Para estudiar el proceso de optimización del diseño del sistema disipador que nos permita reajustar el desempeño sísmico de marcos de hormigón armado, es necesario en primera instancia definir una estructura con una respuesta sísmica deficiente. La estructura que fue sometida al proceso de reajuste es descrita en el presente capítulo, indicándose sus dimensiones como las consideraciones que dirigieron su proceso de diseño.

La estructura considerada en este trabajo es un marco de hormigón armado en 2D, regular tanto en altura como en planta. La estructura cuenta con 3 vanos de 8 metros de luz y 6 niveles, la altura de entrepiso es de 3 metros y la separación entre pórticos es de 8 metros. El uso de la edificación es para espacio de oficinas, por lo tanto, presenta una importancia normal. Al buscarse un diseño con un inadecuado comportamiento frente a sismo, solo las cargas gravitatorias y por viento serán consideradas en el proceso de diseño. La normativa de referencia serán las NTC<sup>[42]</sup> para el reglamento de construcción de la Ciudad de México. La Figura 46 muestra un esquema de la estructura.

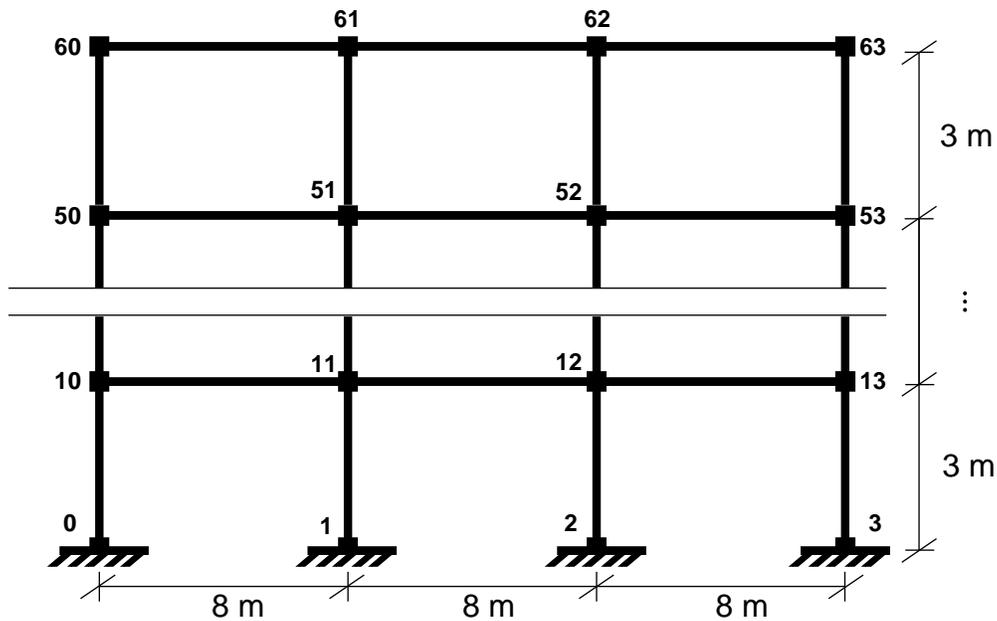


Figura 46. Modelo de la estructura analizada. Optimización aleatoria.

## 2.2. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

### 2.2.1. Factores de carga

Los factores de carga (factores de seguridad) son coeficientes de mayoración de cargas, en este trabajo se aplicaron aquellos establecidos por las NTC<sup>[42]</sup> para estructuras de

importancia normal. En la Tabla 8 se presentan los coeficientes correspondientes a los estados de diseño y accidental.

Tabla 8. Factores de carga.

<b>Tipo de carga</b>	<b>Factor de carga diseño</b>	<b>Factor de carga accidental</b>
Muerta (permanente)	1.3	1.1
Viva (variable)	1.5	1.1

### 2.2.2. Cargas gravitatorias

La carga muerta de entrepiso consideró el peso de la losa maciza más el peso de los demás elementos no estructurales, los cuales se describen a continuación. Para la losa de entrepiso y de azotea, se consideró un canto de 20 cm. En los entrepisos se consideró una capa de mortero de 5 mm de espesor y una baldosa cerámica de 1 cm de espesor. Para la azotea se consideró una capa de mortero de 1 cm de espesor y una capa formada por ladrillos con altura igual a 7 cm. Los pesos volumétricos de los materiales empleados se muestran en la Tabla 9. Los valores presentados fueron obtenidos del Catálogo de Elementos Constructivos del CTE<sup>[176]</sup>. Los valores resultantes de carga muerta se presentan en la Tabla 10.

La planta de la edificación es cuadrada, escogiéndose optimizar el marco interior de la estructura. Por lo anterior, el área tributaria de cada nivel tiene un ancho igual a 8 metros. Adicionalmente, se definió que la azotea tendría una pendiente  $m < 5\%$ . Con estos datos, se procedió a definir las cargas vivas actuantes en cada nivel siguiendo lo establecido por las NTC<sup>[42]</sup>. En la Tabla 10 se presentan los valores considerados para cargas vivas, siendo  $W_m$ ,  $W_a$  y  $W$  la carga máxima, carga instantánea y carga media, respectivamente.

Tabla 9. Pesos específicos de materiales considerados para carga muerta.

<b>Material</b>	<b>Peso específico, kg/m<sup>3</sup></b>
Hormigón armado	2500
Mortero de cemento	1900
Azulejo cerámico	2300
Ladrillo perforado LP de 1 pie	1120

Tabla 10. Cargas distribuidas consideradas en el modelo.

<b>Cargas vivas, <math>kN/m^2</math></b>			
Tipo de uso	$W_m$	$W_a$	$W$
Oficinas	2.5	1.8	1
Azotea $m < 5\%$	1	0.7	0.15
<b>Cargas muertas, <math>kN/m^2</math></b>			
Entrepiso			5.33
Azotea			6.04

### 2.2.3. Cargas horizontales de viento

Para definir las acciones por viento se siguió el método estático simplificado establecido en las NTC<sup>[42]</sup>. En dicho método, las presiones ejercidas por el viento sobre la fachada de la estructura dependen de la velocidad de diseño ( $V_D$ ), misma que se obtiene con la siguiente formula:

$$V_D = F_{TR} F_\alpha V_R \quad (54)$$

Donde  $F_{TR}$  es un factor correctivo que toma en cuenta las condiciones topográficas y de rugosidad del terreno aledaño a la estructura,  $F_\alpha$  es un factor que toma en cuenta la variación de la velocidad del viento en función de la altura y  $V_R$  es la velocidad regional del viento de la zona donde se ubica el edificio. Las NTC<sup>[42]</sup> definen tres zonas eólicas diferentes en la Ciudad de México. Con fines de diseño, se estableció que la edificación se ubicaría en zona eólica II y tendría una importancia de tipo B. Con lo cual  $V_R = 30 \text{ m/s}$ .

El coeficiente de variación con la altura ( $F_\alpha$ ) depende de la altura del edificio y de la rugosidad del terreno aledaño. Se consideró que la rugosidad correspondía a una zona urbana típica (R3, con lo cual  $\alpha = 0.156$  y  $\delta = 390$  metros). La altura total del edificio es igual a 18 metros, que es menor a  $\delta = 390$  metros por lo tanto el factor de variación con la altura ( $F_\alpha$ ) presenta la siguiente función:

$$F_\alpha = \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha \quad (55)$$

Donde  $z$  es la altura donde actúa una carga puntual producto de la acción del viento. En el caso de la topografía de la zona, se consideró que el terreno aledaño era plano (tipo T3). A los edificios ubicados en terrenos planos con rugosidad tipo R3 les corresponde un factor  $F_{TR} = 0.88$ . Al conocerse la velocidad de diseño ( $V_D$ ), es posible definir la presión actuante en cada uno de los niveles de la estructura. Esto se realiza con la siguiente ecuación:

$$p_z = 0.47 C_p V_D^2 \quad (56)$$

Donde  $C_p$  es el coeficiente local de presión, que depende de la forma de la estructura. En el caso de muros verticales, el coeficiente  $C_p$  es igual a 0.8 cuando ésta se encuentra a barlovento, mientras que al estar en sotavento  $C_p = -0.4$ . En el último caso, las NTC<sup>[42]</sup> establecen que se considerará una succión constante en toda la altura de la pared, misma que se calculará para un nivel  $z$  igual a la altura media del edificio. En este caso, la altura media es igual a 9 metros. Finalmente, para definir la fuerza actuante en cada nivel, se multiplica la presión por el área tributaria ( $A_T = 8 \text{ m} \times 3 \text{ m} = 24 \text{ m}^2$ ).

$$F = A_T p_z \quad (57)$$

En la Tabla 11 se muestran las fuerzas horizontales por viento aplicadas a la estructura, tanto para barlovento como sotavento.

Tabla 11. Fuerzas producidas por el viento en la estructura.

Nivel	F barlovento, kN	F sotavento, kN
6	7.6	-3.0
5	7.1	-3.0
4	6.7	-3.0
3	6.1	-3.0
2	5.4	-3.0
1	4.3	-3.0

En la Tabla 12 se muestran resumidas las cargas consideradas en cada entrepiso de la estructura analizada, las cuales fueron mayoradas para el caso de diseño. Adicionalmente, en la Tabla 13 se muestran las cargas de área aplicadas a las losas de cada nivel. Atendiendo a las NTC<sup>[42]</sup>, se utilizó un factor de seguridad igual a 1.4 para mayorar las cargas de área.

Tabla 12. Resumen de las cargas aplicadas.

Piso	Altura, m	Ancho, m	Cm, kN/m	Sbc, kN/m	Fb, KN	Fs, kN
6	3	8	62.816	12	7.6	-3.0
5	3	8	55.432	30	7.1	-3.0
4	3	8	55.432	30	6.7	-3.0
3	3	8	55.432	30	6.1	-3.0
2	3	8	55.432	30	5.4	-3.0
1	3	8	55.432	30	4.3	-3.0

Tabla 13. Cargas de área consideradas para el diseño de losas macizas.

Elemento	Carga de área, kN/m <sup>2</sup>	Factor de seguridad
Losa entrepiso	7.83	1.4
Losa azotea	7.04	1.4

#### 2.2.4. Solicitaciones de los elementos estructurales

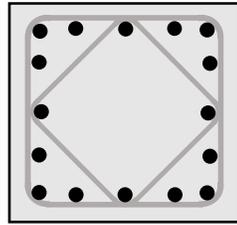
Habiendo determinado las cargas actuantes, se procedió a diseñar la estructura por medio del programa SAP2000<sup>[177]</sup>. El peso propio de los elementos estructurales fue considerado en este paso. Las solicitaciones resultantes del análisis lineal se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14. Solicitaciones de diseño de los elementos columna y viga.

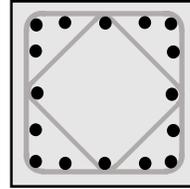
Elementos	Nivel	Nu, kN	Mu, mkN	Vu, kN
Columna	1 – 3	4048.6	234.5	148.6
	4 – 6	1985.0	204.0	131.2
Viga	1 - 6	-	196.5 (CL)	0.0
			-507.5 (Ext)	355.0

#### 2.2.5. Diseño de los elementos estructurales

Con las solicitaciones presentadas en la Tabla 14, se procedió a diseñar los elementos columna y viga del marco analizado siguiendo los requisitos y consideraciones presentadas en las NTC<sup>[42]</sup>. Para las columnas y las vigas se consideró un hormigón con resistencia a compresión ( $f'c$ ) igual a 30 MPa. El refuerzo longitudinal y transversal estaba conformado por acero con un esfuerzo de fluencia ( $f_y$ ) igual a 420 MPa. Los resultados del proceso de diseño se muestran a continuación por medio del esquema de las secciones. En la Figura 47 se muestran las secciones transversales para los elementos columnas mientras en la Figura 48 se hace lo propio para el elemento viga en la sección de empotramiento.



**Columna de 60 x 60 cm**  
**16 # 8 (in/8)**  
**E#3@6 cm**  
**Rec de 2.5 cm**



**Columna de 50 x 50 cm**  
**16 # 8 (in/8)**  
**E#3@6 cm**  
**Rec de 2.5 cm**

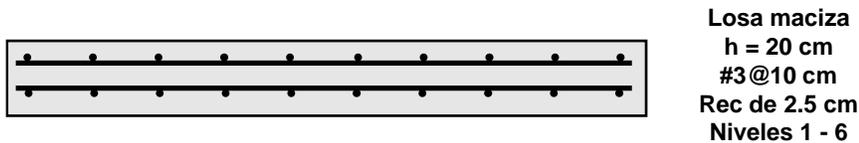
Figura 47. Sección transversal de los elementos columna.



**Viga de 40 x 50 cm**  
**As (sup) = 7 # 8 (in/8)**  
**As (inf) = 3 # 4 (in/8)**  
**E#3@6 cm**  
**Rec de 2.5 cm**

Figura 48. Sección transversal de los elementos viga en empotramiento.

Se empleó una losa maciza de canto  $h$  igual a 20 cm, tanto para los entrepisos como para la azotea. Al igual que los demás elementos estructurales considerados, las losas se diseñaron con un hormigón con  $f'c = 30$  MPa. La Figura 49 muestra el esquema de la sección transversal de losa maciza. Se consideró un ancho efectivo de la losa igual a 2 metros.



**Losa maciza**  
 **$h = 20$  cm**  
**#3@10 cm**  
**Rec de 2.5 cm**  
**Niveles 1 - 6**

Figura 49. Sección transversal de elementos losa.

Habiéndose definido los materiales y dimensiones de los elementos de la estructura, se procedió a su modelado en los programas SAP2000<sup>[177]</sup> y OpenSees<sup>[178]</sup>. Estos modelos fueron posteriormente utilizados para evaluar la estructura por medio del Método del Espectro de Capacidad<sup>[39]</sup>. Siguiendo lo establecido en las NTC<sup>[42]</sup>, en ambos programas se tomó en cuenta la fisuración de los elementos, reduciendo la rigidez de los elementos en un 70% y en un 50% para las columnas y vigas, respectivamente. Las consideraciones particulares empleadas en cada programa se muestran a continuación.

## 2.3. MODELADO DE LA ESTRUCTURA EN OPENSEES

### 2.3.1. OpenSees

OpenSees (del inglés, *Open System for Earthquake Engineering Simulation*<sup>[178]</sup>) es un programa de elementos finitos y licencia libre que permite analizar estructuras y modelos geotécnicos bajo cargas gravitatorias y dinámicas. Esta herramienta tiene sus orígenes en la tesis doctoral de Francis McKenna<sup>[179]</sup>. Hoy en día, gracias a las aportaciones de investigadores de diferentes universidades y al patrocinio y desarrollo del programa por parte del PEER (del inglés, *Pacific Earthquake Engineering Research Center*) de los Estados Unidos de Norteamérica, OpenSees cuenta con un gran abanico de comandos para definir materiales, elementos y procedimientos de análisis. A continuación, se presentan los pasos empleados para modelar la estructura en este programa.

A pesar de que el código de OpenSees fue definido originalmente en lenguaje C++, los usuarios deben de combinar el uso de comandos preestablecidos, los cuales llaman procedimientos para la definición y análisis del modelo, con instrucciones en TCL (del inglés, *Tool Command Language*) para el uso del programa. Por este motivo, es necesario contar con un conocimiento fundamental del lenguaje TCL para un manejo básico de OpenSees.

Al ser OpenSees un programa de licencia libre, éste se encuentra en continuo desarrollo y algunas de las estructuras de sus comandos pueden variar con el paso del tiempo. Sin embargo, en la página en internet del programa<sup>[180]</sup> es posible encontrar información actualizada sobre las modificaciones que han tenido lugar en el manejo de OpenSees. Debido a lo anterior, se recomienda recurrir a dicha página oficial de manera frecuente.

Para modelar y analizar un sistema estructural, el usuario debe definir tres diferentes conjuntos de elementos a OpenSees. Estos conjuntos son: *ModelBuilder*, *Analysis* y *Recorder*, siendo estos comunicados por el objeto *Domain*. La Figura 50 muestra un esquema simplificado de estos elementos.

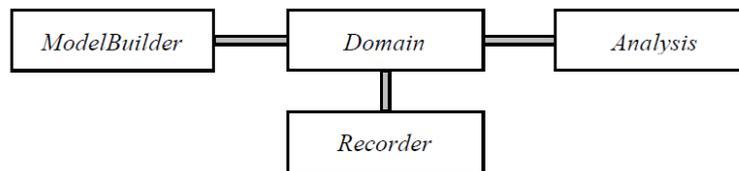


Figura 50. Ambiente de OpenSees.

- **ModelBuilder.** Es la parte del programa donde se definen los elementos para construir el modelo, es decir, define nodos, restricciones, masas, materiales, secciones, elementos, patrones de carga, etc. Una vez creado, el modelo se almacena en el objeto *Domain* y éste, a su vez, lo provee a los objetos *Analysis* y *Recorder*.
- **Analysis.** Determina el estado del modelo para cada instante de tiempo, *t*. Este se compone por diferentes objetos que definen el tipo de análisis que realizará el programa.
- **Recorder.** Este objeto crea y guarda el registro de los diferentes estados del modelo durante su análisis.

En la Figura 51 muestra la interfaz del programa. Como ya se mencionó, OpenSees es un programa que utiliza líneas de código para la creación y análisis de los modelos a estudiar, esta característica hace que el programa se apoye fuertemente en editores de texto. Si se desea conocer más sobre el programa, es posible revisar su sitio web <sup>[180]</sup> para revisar ejemplos, siendo además posible localizar guías en internet<sup>[7]</sup>.

```

OpenSees -- Open System For Earthquake Engineering Simulation
Pacific Earthquake Engineering Research Center
Version 3.2.2 64-Bit

(c) Copyright 1999-2016 The Regents of the University of California
All Rights Reserved
(Copyright and Disclaimer @ http://www.berkeley.edu/OpenSees/copyright.html)

OpenSees >

```

Figura 51. Interfaz de OpenSees.

### 2.3.2. Definición del material: hormigón

Los elementos de hormigón armado constan de dos tipos de materiales, el hormigón y el acero de refuerzo. Debido a que las propiedades del hormigón confinado son distintas a aquellas que presenta el hormigón sin confinar, dos modelos constitutivos fueron empleados para modelar este material. Siguiendo las recomendaciones de la referencia indicada<sup>[42]</sup>, la resistencia a tracción de ambos hormigones se definió igual a un 10% de su resistencia a compresión.

Para modelar el comportamiento del hormigón confinado se utilizó el modelo elastoplástico presentado por las NTC<sup>[42]</sup>, el cual se basa a su vez en el modelo presentado por Mander et al.<sup>[181]</sup>. Adicionalmente, las NTC brindan las ecuaciones para definir el comportamiento el hormigón bajo la acción de cargas cíclicas. En la Figura 52 se muestra un esquema de la relación esfuerzo – deformación empleada para el hormigón.

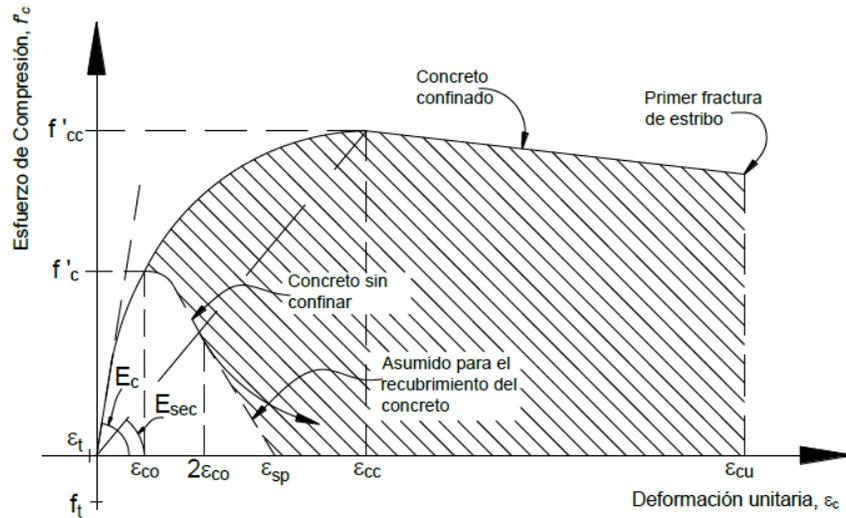


Figura 52. Esquema esfuerzo – deformación del hormigón a compresión. Tomada de [42].

Con fines comparativos, se determinó la resistencia del hormigón confinado siguiendo lo establecido por el Código Modelo<sup>[182]</sup>. Las resistencias a compresión obtenidas por medio de ambas normativas se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15. Valores de  $f'_{cc}$  obtenidos por las NTC y el Código Modelo.

Elemento	$f'_{cc}$ por las NTC, MPa	$f'_{cc}$ por Código Modelo, MPa
Columna 60x60	41.0	36.4
Columna 50x50	43.5	37.3
Viga 40x50	39.8	37.1

En las Figuras 53 - 55 se muestran las curvas esfuerzo – deformación teóricas del hormigón confinado y sin confinar, para los elementos columna y viga, respectivamente.

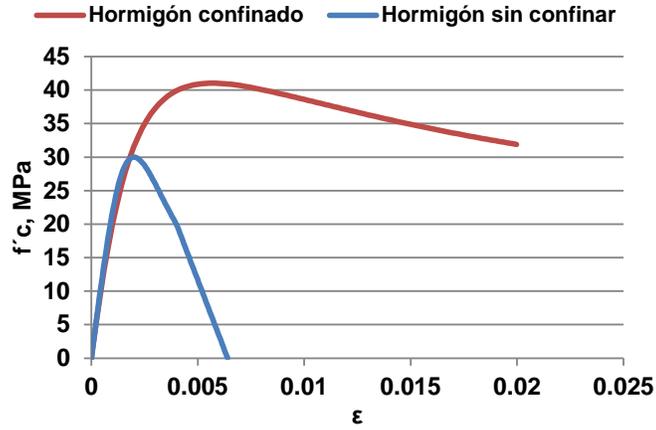


Figura 53. Curva esfuerzo – deformación teórica del hormigón para la sección Columna 60x60.

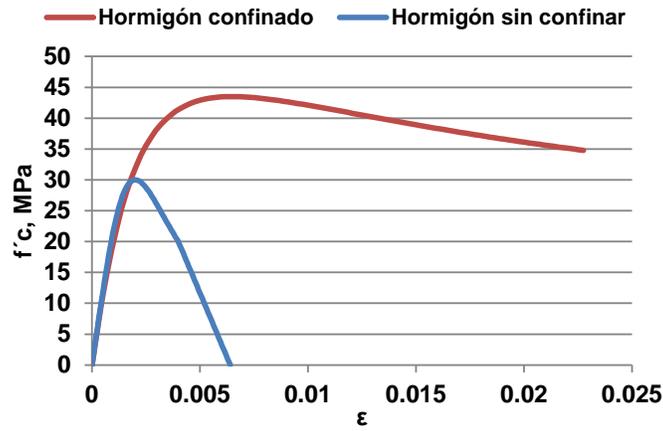


Figura 54. Curva esfuerzo – deformación teórica del hormigón para la sección Columna 50x50.

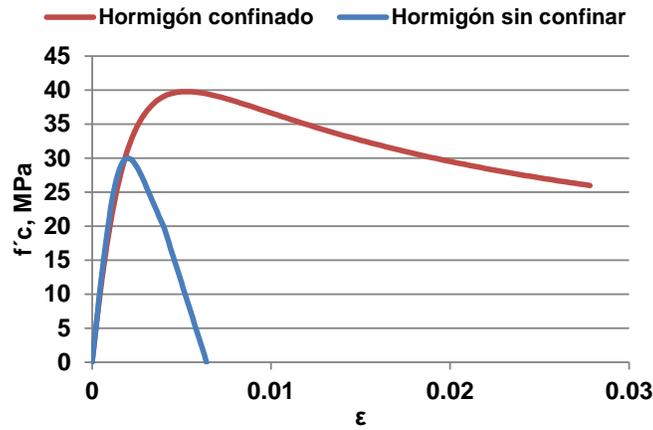


Figura 55. Curva esfuerzo – deformación teórica del hormigón para la sección Viga 40x50.

El módulo de elasticidad del hormigón se determinó empleando la fórmula establecida en las NTC<sup>[42]</sup> para hormigones con agregado grueso calizo.

$$E_c = 4400\sqrt{f'_c} = 4400\sqrt{30 \text{ MPa}} = 24\,100 \text{ MPa} \quad (58)$$

Para modelar ambos hormigones, el confinado y sin confinar, se utilizó el material denominado *Concrete02* de la librería de OpenSees<sup>[180]</sup>. Este material permite considerar una ligera resistencia a tracción definida por un modelo bilineal (obsérvese Figura 56).

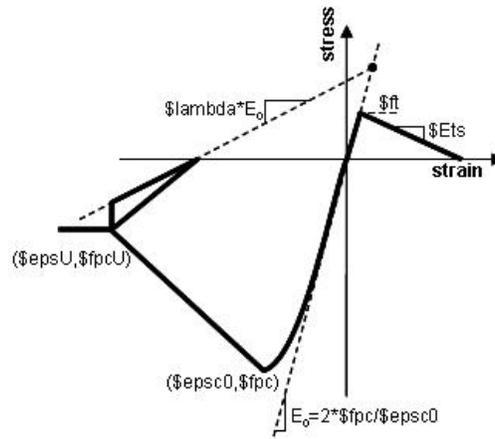


Figura 56. Modelo esfuerzo deformación material *Concrete02*. Tomada de <sup>[180]</sup>.

### 2.3.3. Definición del material: Acero de refuerzo

Para modelar el acero longitudinal de los elementos, se empleó el material *Steel02* de la librería de OpenSees<sup>[180]</sup>. En la Figura 57 se muestra la curva esfuerzo – deformación típica de este material.

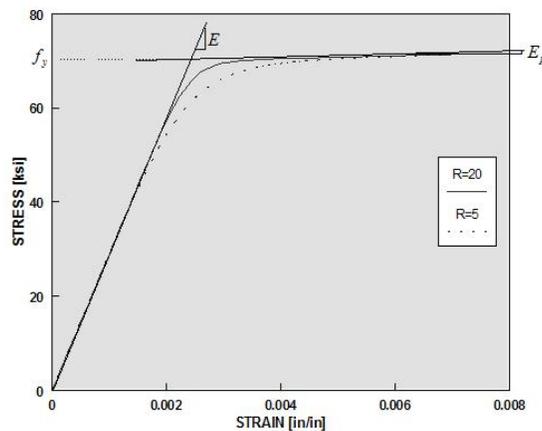


Figura 57. Modelo esfuerzo deformación material *Steel02*. Tomada de <sup>[180]</sup>.

El material *Steel02* fue desarrollado por Filippou et al.<sup>[183]</sup> basándose en el modelo propuesto por Menegotto et al.<sup>[184]</sup>. La principal diferencia entre ambos modelos radica en que Filippou et al. toman en cuenta el efecto del endurecimiento isotrópico por deformación del acero. Dicha modificación permite considerar la variación en la forma de la curva esfuerzo – deformación del material al ser sometido a cargas cíclicas. En la Figura 58 se muestra, a modo de ejemplo, la respuesta de este material. Mayor información sobre los parámetros que definen el comportamiento del material se puede encontrar en el manual de usuario de OpenSees<sup>[180]</sup>.

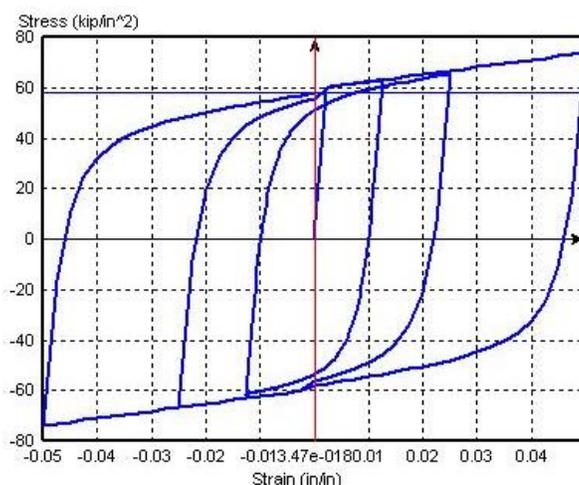


Figura 58. Curva esfuerzo deformación del material *Steel02* bajo cargas cíclicas a compresión y tensión. Tomada de <sup>[180]</sup>.

Como se observa en la Figura 58, el modelo considera un módulo de elasticidad para la rama plástica de valor constante, siendo el efecto de endurecimiento por deformación relevante solo para grandes deformaciones<sup>[183]</sup>.

Es importante indicar que el endurecimiento por deformación cobra especial relevancia en casos de carga cíclica. Esto se debe a que las fisuras que aparecen en el elemento permanente abiertas cuando ocurren inversiones de momento, con lo cual el comportamiento de la sección queda gobernado por el refuerzo longitudinal. En los casos de análisis estáticos que aplican únicamente cargas monótonas, el efecto de endurecimiento por deformación pierde relevancia<sup>[185]</sup>.

Las NTC<sup>[42]</sup> brindan los siguientes valores para definir el comportamiento del material cuando se realicen análisis no lineales: esfuerzo de fluencia real ( $f_{y,real}$ ) igual a 457 MPa, módulo de elasticidad ( $E_s$ ) de 200 000 MPa, deformación última ( $\epsilon_u$ ) de 0.11 y módulo de elasticidad post fluencia ( $E_p$ ) igual a 2.5% del módulo de elasticidad original ( $E_s$ ).

### 2.3.4. Elementos en OpenSees

Para modelar el comportamiento a flexión no lineal de los elementos estructurales, existen dos opciones: usar modelos de plasticidad concentrada o modelos con plasticidad distribuida<sup>[186]</sup>. En los primeros, la respuesta a flexión del elemento es modelada por medio de resortes rotacionales, de longitud nula, colocados en sus extremos. Esta aproximación, sencilla y ampliamente usada en evaluaciones de capacidad estructural, presenta la desventaja de que el comportamiento de los resortes rotacionales es definido para una interacción axil – momento determinada, y ésta no se ve alterada por las solicitaciones que se presentan en el elemento durante el análisis. Por lo tanto, los elementos que utilizan los modelos de plasticidad concentrada requieren de una calibración que tome en cuenta las cargas axiales y momentos flectores esperados<sup>[187]</sup>.

Por otra parte, los modelos de plasticidad distribuida permiten un comportamiento plástico a lo largo de todo el elemento. En estos modelos, la respuesta a flexión se considera por medio de la discretización de la sección del elemento en fibras o por medio de modelos de esfuerzo plástico resultante<sup>[187]</sup>. Adicionalmente, los elementos de plasticidad distribuida pueden estar basados en planteamiento de fuerza o de desplazamiento. La principal ventaja que presentan los modelos basados en fuerza es que permiten simular el comportamiento del miembro de un marco usando un solo elemento, a diferencia que los elementos basados en desplazamiento, que requieren múltiples elementos para modelar la respuesta de un solo miembro estructural<sup>[188]</sup>.

Existen también modelos que combinan parte de ambos enfoques de rótulas plásticas, es decir, la plasticidad puede desarrollarse en unas zonas aisladas del elemento cuya longitud es distinta a cero. Sin embargo, aún no está del todo claro la relación entre la respuesta de la sección del elemento, la longitud de la zona plástica, o rótula, y el nivel de respuesta a flexión del elemento<sup>[189]</sup>.

Para modelar los elementos viga y columna en OpenSees, se empleó el elemento finito denominado como *Beam with hinges element*<sup>[180]</sup>. Este es un elemento de plasticidad distribuida que permite la aparición de rótulas plásticas en cualquier región confinada del elemento entre  $[0, L]$ <sup>[190]</sup>. El elemento sigue una formulación basado en fuerza, siendo necesario indicar el método a seguir para determinar la relación entre las deformaciones del elemento y sus secciones. Denominándose como  $\mathbf{v}$  y  $\mathbf{e}$  a las deformaciones del elemento y de la sección, respectivamente, ambas se relacionan por medio de la siguiente expresión deducida de aplicar el principio de los trabajos virtuales<sup>[187]</sup>:

$$\mathbf{v} = \int_0^L \mathbf{b}^T \mathbf{e} dx \quad (59)$$

Donde  $\mathbf{b}$  es la matriz que contiene las funciones que relacionan las fuerzas de la sección con las fuerzas básicas del elemento. En la determinación de  $\mathbf{v}$  se realiza una discretización del elemento, por lo tanto, la relación es evaluada por medio de la siguiente integración numérica:

$$\mathbf{v} = \sum_{i=1}^{N_p} (\mathbf{b}^T \mathbf{e}|_{x=\xi_i}) \omega_i \quad (60)$$

Donde  $\xi$  y  $\omega$  son las posiciones y los pesos asociados a los  $N_p$  puntos de integración considerados. La forma en que se definen estos parámetros se denomina como métodos de integración; y OpenSees ofrece una variedad de estos métodos los cuales tienen sus propias consideraciones y exactitudes asociadas<sup>[190]</sup>.

En la modelación de los elementos estructurales se empleó la integración modificada Gauss – Radau<sup>[187]</sup>, la cual considera 4 puntos de integración para determinar el estado del elemento. En este método, dos puntos de integración son colocados en los extremos del elemento, mientras que los dos restantes son considerados fuera de las rótulas plásticas, tal como se muestra en la Figura 59.

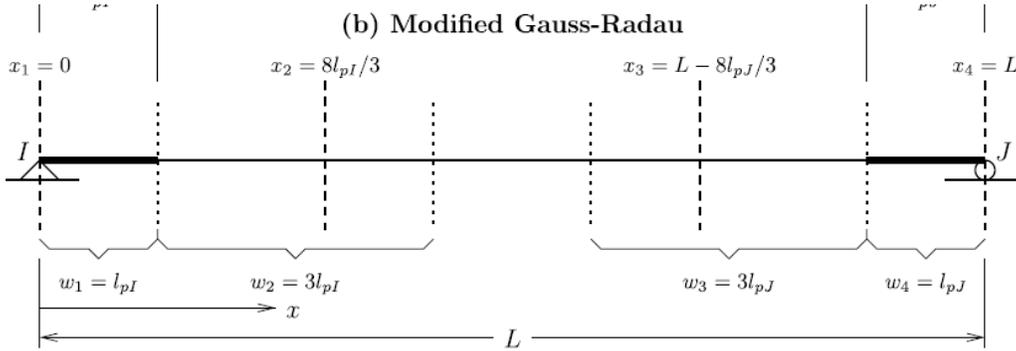


Figura 59. Localización de las secciones de integración al usar el método de integración modificado Gauss – Radau. Tomada de<sup>[189]</sup>.

Como se puede observar, la posición y peso de los cuatro puntos de integración considerados es la siguientes:

$$\xi = \mathbf{x} = \{0, 8l_{pI}/3, L - 8l_{pJ}/3, L\} \quad (61)$$

$$\omega = \{l_{pI}, 3l_{pI}, 3l_{pJ}, l_{pJ}\} \quad (62)$$

Es importante indicar que en el método modificado Gauss – Radau se obtiene una representación exacta de la curvatura lineal aun cuando  $4l_{pI} + 4l_{pJ} > L$ , debido a que una integral definida solo es aditiva sobre límites de integración<sup>[187]</sup>.

Debido a que en este método el comportamiento plástico se encuentra confinado a los extremos del elemento, se da origen a un diagrama momento – rotación bilineal, tal como se muestra en la Figura 60.

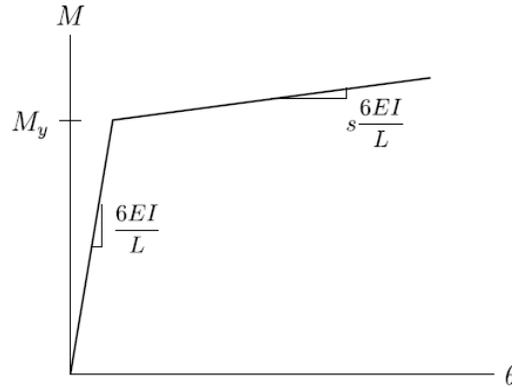


Figura 60. Diagrama momento – rotación producido por la integración modificada Gauss – Radau. Tomada de <sup>[189]</sup>.

Siguiendo lo recomendado por la referencia indicada<sup>[189]</sup>, la longitud de la rótula en ambos extremos ( $l_{pI} = l_{pJ}$ ) se definió como una fracción ( $\beta$ ) de la longitud del elemento ( $L$ ).

$$l_{pI} = l_{pJ} = \beta L \quad (63)$$

Para calibrar el modelo con plasticidad distribuida, Scott et al.<sup>[189]</sup> proponen buscar que las rigideces post fluencia de los diagramas momento – curvatura ( $\alpha$ ) y momento – rotación ( $S$ ) sean iguales. El parámetro  $S$  puede ser expresado como función de la rigidez post fluencia del diagrama momento – curvatura y el radio entre la longitud plástica y la longitud del elemento ( $\beta$ ), tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$S = \frac{\alpha}{\alpha + (1 - \alpha) \cdot 6\beta} \quad (64)$$

Tomando el parámetro  $\beta = 1/6$  se consigue que la rigidez post fluencia de ambos diagramas resulten iguales ( $S = \alpha$ )<sup>[189]</sup> sin importar el valor que tenga el parámetro  $\alpha$ , tal como se observa de la Figura 61. Por tal motivo, al definir el objeto *Beam with hinges element*

se indicó considerar una longitud de rótula plástica en cada extremo igual a  $1/6$  la longitud total del elemento.

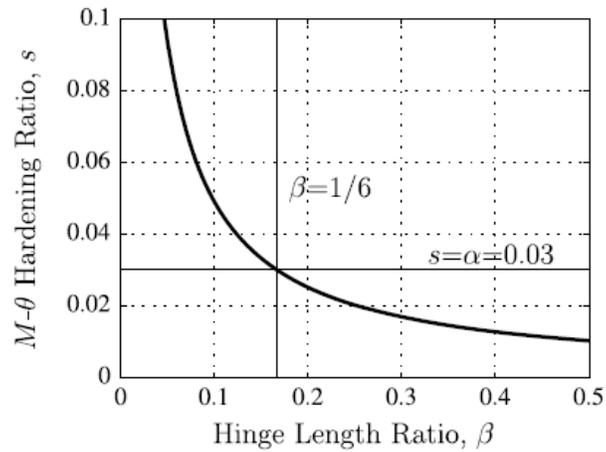


Figura 61. Radio de endurecimiento del diagrama momento – rotación en función de  $\beta$ . Tomada de [189].

### 2.3.5. Nudos rígidos

El modelo elaborado fue realizado con elementos tipo barra, en esta clase de modelos se ignoran a priori las dimensiones reales de los elementos estructurales. En la realidad, dichas dimensiones crean un traslape que brinda una rigidez adicional a las conexiones viga columna. El no tomar en cuenta esta rigidez adicional provocará una sobreestimación de las deformaciones de la estructura<sup>[191]</sup>. Por tal motivo, el modelo generado considera elementos estructurales con elevada rigidez que sirven de ligadura entre las columnas y las vigas, tal como se muestra en la Figura 62.

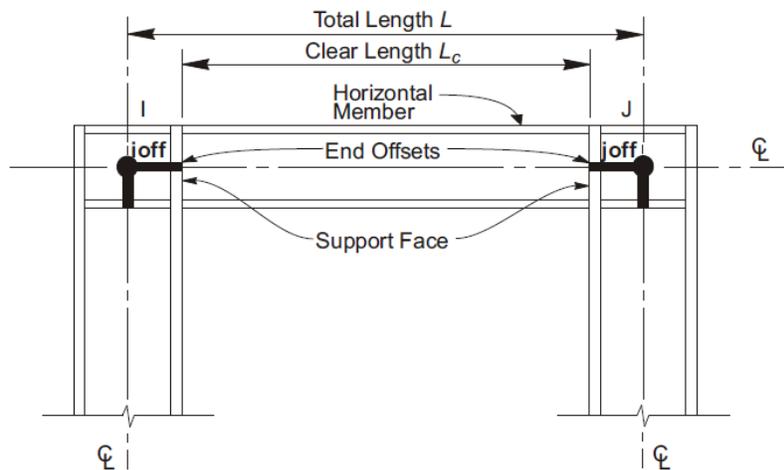


Figura 62. Esquema de nudos rígidos, tomada de [191].

## 2.4. MODELADO DE LA ESTRUCTURA EN SAP2000

Para modelar la estructura en SAP2000<sup>[177]</sup> se utilizaron rótulas de plasticidad concentrada. Tanto el FEMA – 356<sup>[192]</sup> como el ASCE 41 – 17<sup>[5]</sup> brindan recomendaciones para modelar el comportamiento de las rótulas plásticas, sin embargo, debido a la mayor actualidad del ASCE 41 – 17, en este trabajo se emplearon las indicaciones mostradas en sus tablas 10 – 7 y 10 – 8 (mostradas en la Figura 63), las cuales presentan los parámetros de las curvas momento – rotación del elemento en función de su grado de sollicitación y confinamiento transversal. En la Figura 64 se muestra un esquema de los diagramas propuestos por el ASCE 41 – 17.

Conditions	Modeling Parameters <sup>a</sup>			Acceptance Criteria <sup>a</sup>				
	Plastic Rotation Angle (radians)		Residual Strength Ratio	Plastic Rotation Angle (radians)				
	a	b		Performance Level				
				IO	LS	CP		
Condition i. Beams controlled by flexure <sup>b</sup>								
$\frac{v-v'}{f_{bal}}$	Transverse reinforcement <sup>c</sup>	$\frac{v'}{b_w d \sqrt{f_{cE}}}$						
≤0.0	C	≤3 (0.25)	0.025	0.05	0.2	0.010	0.025	0.05
≤0.0	C	≥6 (0.5)	0.02	0.04	0.2	0.005	0.02	0.04
≥0.5	C	≤3 (0.25)	0.02	0.03	0.2	0.005	0.02	0.03
≥0.5	C	≥6 (0.5)	0.015	0.02	0.2	0.005	0.015	0.02
≤0.0	NC	≤3 (0.25)	0.02	0.03	0.2	0.005	0.02	0.03
≤0.0	NC	≥6 (0.5)	0.01	0.015	0.2	0.0015	0.01	0.015
≥0.5	NC	≤3 (0.25)	0.01	0.015	0.2	0.005	0.01	0.015
≥0.5	NC	≥6 (0.5)	0.005	0.01	0.2	0.0015	0.005	0.01

Modeling Parameters	Acceptance Criteria		
	Plastic Rotation Angle (radians)		
	Performance Level		
Plastic Rotation Angles, a and b (radians)			
Residual Strength Ratio, c	IO	LS	CP
Columns not controlled by inadequate development or splicing along the clear height <sup>a</sup>			
$a = \left( 0.042 - 0.043 \frac{N_{UD}}{A_g f'_{cE}} + 0.63 \rho_t - 0.023 \frac{V_{yE}}{V_{CclOE}} \right) \geq 0.0$	0.15 a	0.5 b <sup>b</sup>	0.7 b <sup>b</sup>
For $\frac{N_{UD}}{A_g f'_{cE}} \leq 0.5$	≤ 0.005		
$b = \frac{0.5}{5 + \frac{N_{UD}}{0.8 A_g f'_{cE}} \frac{1}{\rho_t} \frac{f'_{cE}}{f_{yIE}}} - 0.01 \geq a^a$			
$c = 0.24 - 0.4 \frac{N_{UD}}{A_g f'_{cE}} \geq 0.0$			

Figura 63. Parámetros de las curvas momento – rotación para elementos de hormigón. Tomada de

[5].

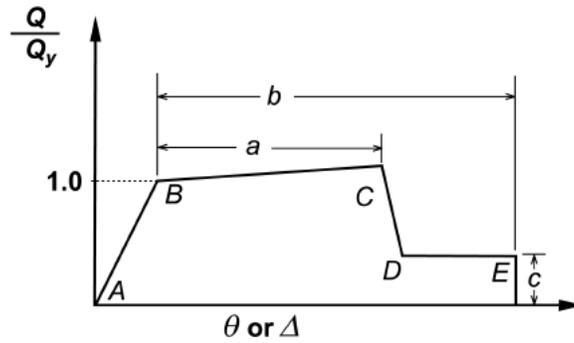


Figura 64. Diagrama de relación momento – rotación para elementos de hormigón. Tomada de [5].

Obsérvese de la Figura 64 que el diagrama propuesto por el ASCE 41 – 17 considera un descenso brusco de la resistencia de la sección en el punto E. Siguiendo las recomendaciones del manual de usuario del programa<sup>[191]</sup>, se consideró una disminución gradual hasta alcanzar una resistencia residual igual al 20%. Los parámetros del diagrama momento – rotación de las rótulas plásticas introducidas en SAP2000 se presentan en la Tabla 16, adicionalmente, en las Figuras 65 y 66 se muestran los diagramas empleados para las vigas y columnas, respectivamente.

Tabla 16. Parámetros de los diagramas momento – rotación según el ASCE 41 – 17.

Elemento	a, radianes	b, radianes	c (% de resistencia residual)
Vigas	0.015	0.020	0.20
Columnas	0.015	0.025	0.20

De manera similar a OpenSees, se consideraron nudos rígidos en el solape de los elementos del marco.

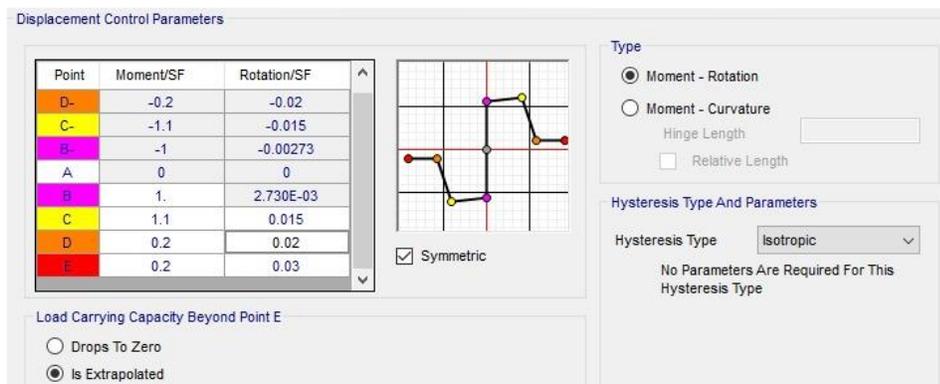


Figura 65. Parámetros de la rótula plástica de los elementos viga.

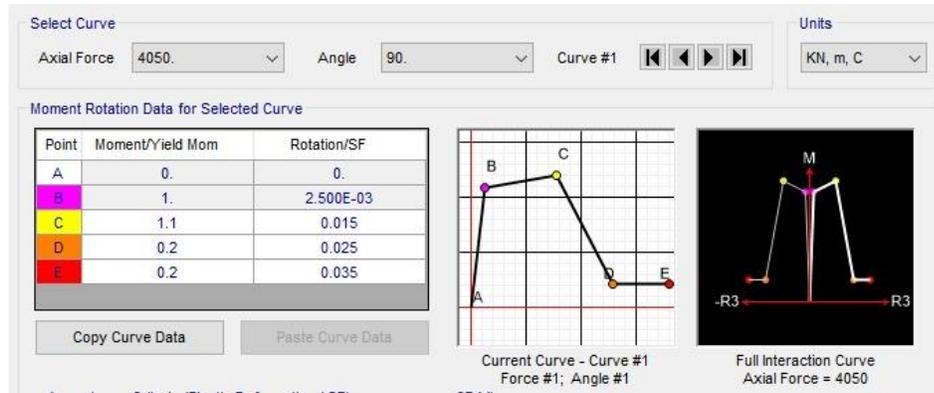


Figura 66. Parámetros de la rótula plástica de los elementos columna.

## 2.5. COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA DE LOS MODELOS

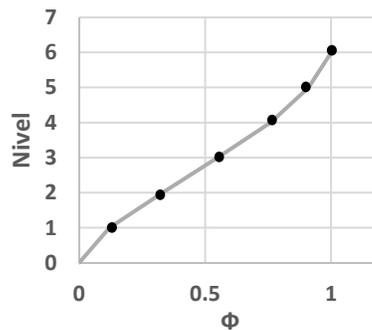
### 2.5.1. Análisis modal de la estructura

Se realizó el análisis modal de la estructura por medio de los programas OpenSees y SAP2000. Los periodos fundamentales obtenidos se presentan en la Tabla 17. Del análisis modal realizado en OpenSees se obtuvo el primer modo de vibrar normalizado de la estructura ( $\phi$ ).

Tabla 17. Resultados del análisis modal de la estructura sin CRP's.

Modelo	T, s
OpenSees	1.18
SAP2000	1.25

$$\phi^T = \{0.12 \ 0.33 \ 0.55 \ 0.76 \ 0.91 \ 1.0\}$$



## 2.5.2. Curva de capacidad de la estructura

Para realizar el análisis estático no lineal (*Pushover*) se siguieron las recomendaciones establecidas en la ATC – 40<sup>[39]</sup>. Las cargas laterales aplicadas fueron proporcionales al modo fundamental de vibrar de la estructura, lo cual es adecuado debido a que las estructuras regulares y de baja altura presentan una respuesta fuertemente influenciada por su primer modo de vibrar<sup>[24]</sup>. En los análisis se ignoran los efectos de la interacción suelo – estructura y los efectos P – Delta son tomados en cuenta en cada paso.

En la Figura 67 se presenta la comparación entre las curvas de capacidad obtenidas usando los programas SAP2000 y OpenSees. El cortante basal se normalizó con respecto al peso total de la estructura ( $W = 8952.8 \text{ kN}$ ).

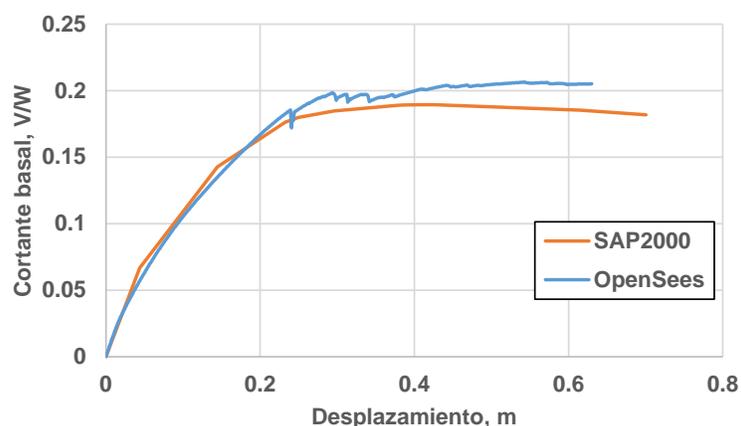


Figura 67. Comparación de las curvas de capacidad obtenidas con SAP2000 y OpenSees.

## 2.6. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DE LA ESTRUCTURA

Para realizar la evaluación del desempeño sísmico de la estructura se consideró que ésta se encontraba ubicada en la Ciudad de México, más concretamente, en la posición definida por las siguientes coordenadas geográficas (Latitud: 19.40, Longitud: -99.10). La ubicación donde se desplanta la estructura corresponde a la zona geotécnica tipo III o zona del lago, y presenta un periodo del suelo igual a 3.8 segundos. Para realizar la evaluación no se tomó en cuenta ni los efectos de la interacción dinámica suelo – estructura ni de licuefacción, debido a que se considera que éstos solo dificultarían la interpretación de los resultados obtenidos.

Debido a la ubicación considerada de la estructura a reforzar, se emplearon los espectros de respuesta brindados por el SASID<sup>[46]</sup>. En concordancia, la reducción espectral se realizó por medio del coeficiente  $\beta$ , determinado por medio de la ecuación (43), empleando el amortiguamiento viscoso efectivo  $\beta_{eff}$ . Para amplificar la respuesta de la estructura, el espectro elástico de respuesta se incrementó en un 30%. El espectro utilizado en la evaluación del desempeño sísmico de la estructura se muestra en la Figura 68.

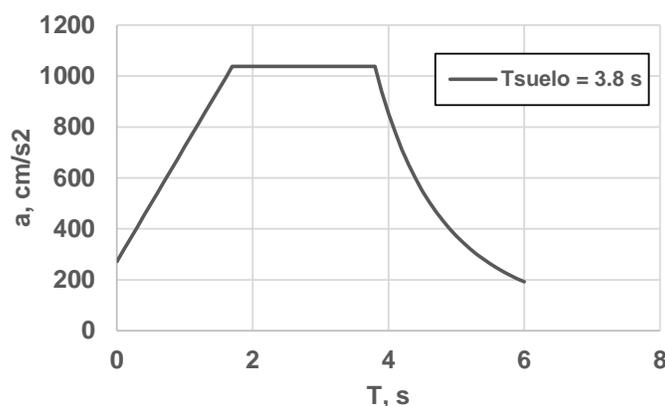


Figura 68. Espectro de respuesta elástica empleado para la evaluación de desempeño.

En la evaluación del desempeño sísmico de la estructura se tuvieron las siguientes consideraciones:

- La estructura analizada es un edificio existente promedio, adicionalmente, se consideran sismos de larga duración debido a que la Ciudad de México se encuentra una distancia relativamente grande de las principales fuentes de sismos en México. Al no encontrarse reforzada aún por medio de un sistema de disipadores, el comportamiento estructural que le corresponde es de tipo C, según lo mostrado en la Tabla 2. Obsérvese que el caso de la estructura reforzada, el comportamiento estructural a considerar sería el tipo B ya que los disipadores serían los elementos encargados de resistir a las cargas laterales.
- Por otra parte, en este estudio no se considera la presencia de contenidos en el edificio, por lo tanto, el desempeño global del mismo depende únicamente del nivel de desempeño de los elementos estructurales. Solo se analizó el desempeño objetivo denominado como Seguridad de Vida.
- Para representar la demanda sísmica se emplearon los espectros de respuesta elástica brindados por el SASID. Estos espectros proceden de sismos de diseño y tienen periodos de retorno asociados mayores a 250 años<sup>[42]</sup>.
- Para los valores límite de aceptabilidad global del edificio solo se consideraron las distorsiones de entrepiso máximas. Para diseño, las NTC<sup>[42]</sup> establecen que los edificios cuyo sistema estructural este conformado por marcos momento – resistente, no deben presentar una distorsión de entrepiso mayor a 0.015<sup>[42]</sup>.

- Para los valores límite de aceptabilidad de elementos se consideraron las rotaciones inelásticas de los mismos. Los valores respuesta límite para las rotaciones en vigas y columnas se obtuvieron en concordancia a lo especificado por el ASCE 41 – 17 en sus tablas 10 – 7 y 10 – 8, respectivamente.

Los valores límite considerados, para distorsiones de entrepiso y rotaciones plásticas en elementos, se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18. Valores límite de las respuestas consideradas.

Respuesta	Niveles de desempeño: Seguridad de Vida
Distorsión de entrepiso máxima	0.015
Rotación de vigas	0.015
Rotación columnas; niveles 1-3	0.012
Rotación columnas; niveles 4-6	0.0136

Siguiendo lo establecido por la ATC – 40<sup>[39]</sup>, se determinó el punto de desempeño de la estructura bajo la demanda sísmica considerada. El espectro de capacidad y el espectro de demanda reducido se graficaron de manera conjunta en la Figura 69.

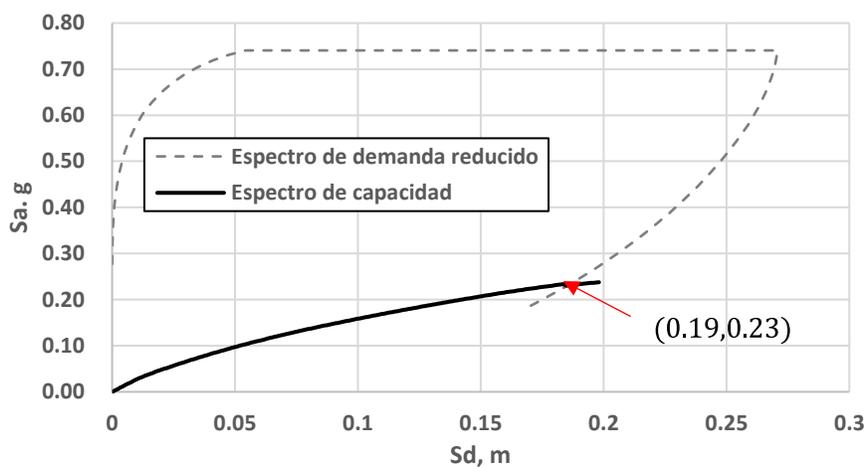


Figura 69. Comparación entre los diferentes espectros de demanda reducido y el espectro de capacidad.

Los resultados obtenidos de la evaluación del desempeño sísmico se muestran en la Tabla 19. Se presentan el amortiguamiento efectivo, las coordenadas del punto de desempeño y el valor máximo de las distorsiones de entrepiso y rotaciones en elementos asociados.

Tabla 19. Resultado de las evaluaciones del desempeño sísmico realizadas.

$\beta_{eff}, \%$	$a_{pi}, g$	$d_{pi}, m$	Máy. Distorsión	Máy. Rot. Vigas	Máy. Rot. Cols. 1-3	Máy. Rot. Cols. 4-6
10.2	0.23	0.19	0.019	0.020	0.012	0.005

Se observa que la estructura presenta valores de distorsión de entrepiso y rotaciones plásticas, en vigas, mayores a los límites establecidos, por tal motivo se comienza con el proceso de refuerzo por medio de disipadores de tipo CRP.

## CAPÍTULO 3

### DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE REFUERZO

#### 3.1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo es optimizar la adecuación del desempeño sísmico, por medio de CRP's, de una estructura existente. Para obtener un punto de referencia, de manera previa al proceso de optimización, se planteó un diseño de la estructura disipadora empleando el método propuesto por Guerrero et al.<sup>[22]</sup>, esto debido a que permite considerar la participación de la estructura principal en la toma de fuerzas sísmicas. El diseño obtenido fue considerado como caso de referencia y se denominó como M0. El proceso de diseño se describe a continuación.

##### **3.1.1. Selección y escalado de los registros sísmicos**

El método propuesto por Guerrero et al.<sup>[22]</sup> requiere del uso de acelerogramas para evaluar la respuesta del Oscilador Dual Equivalente (ODE). En primera instancia, los acelerogramas pueden ser de sismos reales o artificiales, en este caso, se utilizaron sismos reales tomados de la base de datos de la Red Acelerografica del Instituto de Ingeniería de la UNAM (RAII – UNAM)<sup>[193]</sup>. Para guardar una relación con las demandas sísmicas esperadas, se emplearon sismos registrados por estaciones ubicadas a un radio máximo de 7 km de las coordenadas donde se considera ubicado el edificio analizado. En la Figura 70 se muestra un mapa con la ubicación del inmueble y de las estaciones que registraron los sismos empleados.

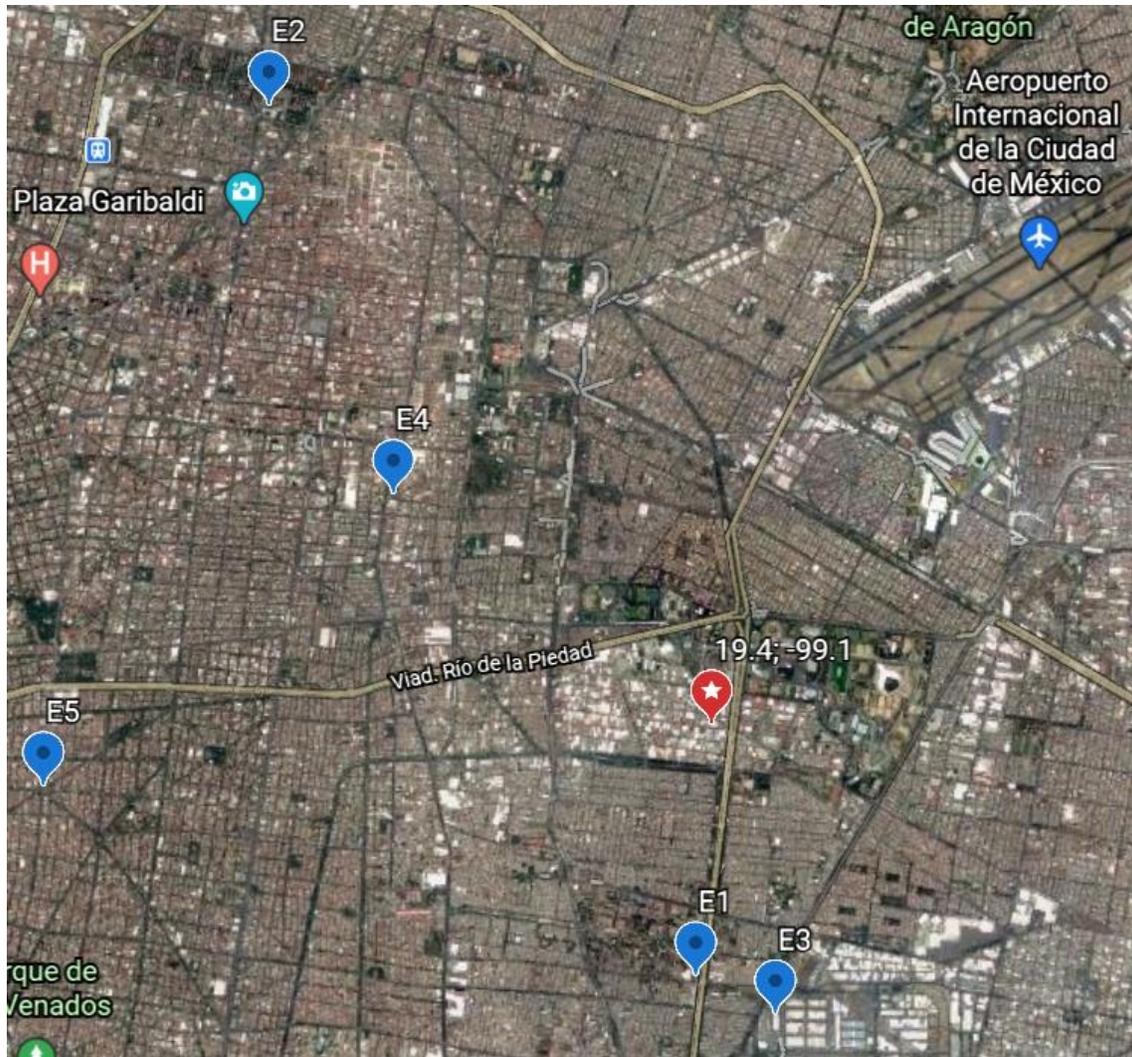


Figura 70. Ubicación del inmueble y de las estaciones donde se registraron los sismos empleados.  
Imagen tomada de Google Earth.

Para emplear los registros almacenados en la Red Acelerográfica es necesario realizar un procesamiento en el que se filtre el ruido y se corrija su línea base. Este proceso se realizó con ayuda de los programas Degtra<sup>[194]</sup> y SeismoSignal<sup>[195]</sup>, teniéndose cuidado de no filtrar frecuencias cercanas a la frecuencia natural del suelo, de tal manera que el espectro de respuesta no se viera afectado. Cuando no se realiza el procesamiento de las señales en bruto, las velocidades y desplazamientos obtenidos de la integración de la aceleración se ven distorsionadas y amplificadas, tal como se muestra en la Figura 71.

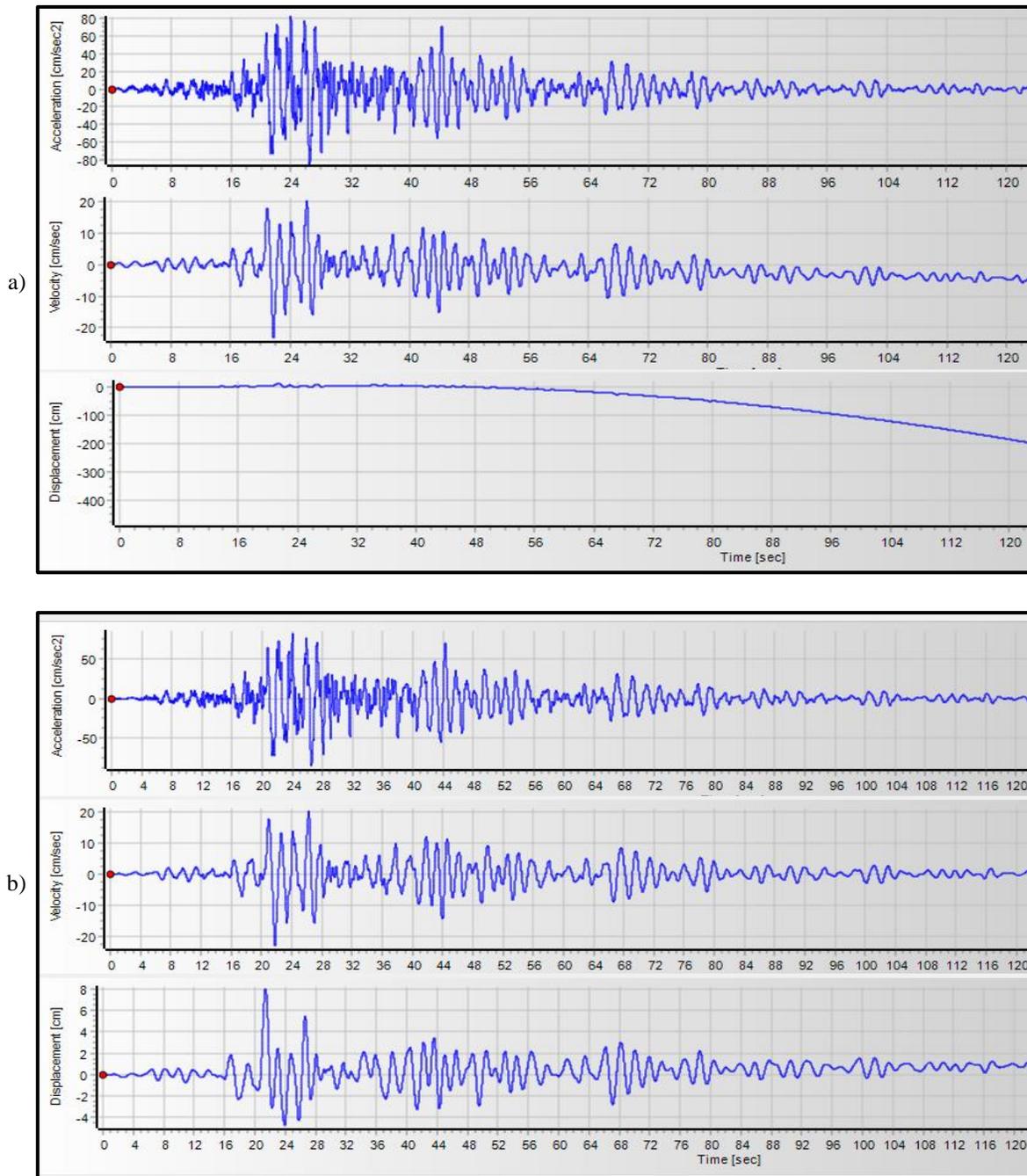


Figura 71. a) Registro sin procesar, b) registro procesado.

En concordancia con las NTC<sup>[42]</sup>, los registros empleados fueron escalados de tal manera que el promedio de sus espectros de respuesta fuera mayor al espectro de respuesta elástico del sitio en el intervalo  $0.2T - 1.3T$ , donde  $T$  es el periodo fundamental de la estructura. En este punto del proceso de diseño,  $T$  es un valor desconocido, pero se sabe que debe de ser menor a 1.2 segundos debido a la rigidización que brindan los CRP's. Tomando

en cuenta lo anterior, se utilizó un valor  $T = 0.9$  s para definir el intervalo de escalado. En la Figura 72 se muestran los espectros escalados comparados con el espectro elástico.

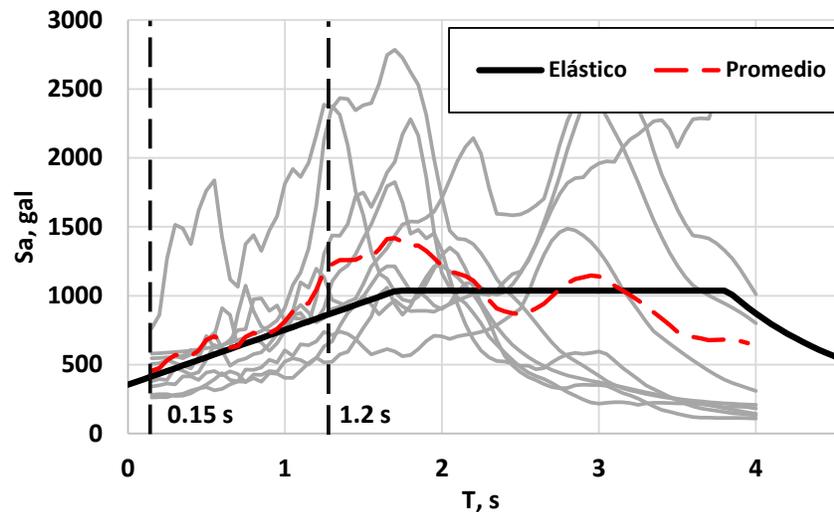


Figura 72. Valor medio de los espectros de respuesta escalados.

Los ID de los registros, con sus respectivos factores de escalado, se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20. Registros con sus respectivos factores de escalado.

Registro	Estación	Factor de escalado
CDAF8509.191	E1	6
CCCL1709.191	E2	8
CDAO8509.191	E3	8.5
CDAO9509.141	E3	13.5
DFVG8904.251	E4	8
SCT19909.301	E5	9
SCT21203.201	E5	10
SCT21404.181	E5	12.5
SCT29509.141	E5	8

### 3.1.2. Respuesta del oscilador dual equivalente

Para evaluar la respuesta del ODE se consideró una distorsión de entrepiso límite de 0.015 para el nivel de desempeño de Seguridad de Vida. Las características de los CRP's eran las siguientes:  $\eta = 0.35$ ,  $\gamma = 0.2$ ,  $f_y = 350$  MPa,  $f_{y,real} = 385$  MPa y  $E = 200$  GPa. Para cumplir con el desplazamiento límite fue necesario considerar un factor de participación mínimo del sistema disipador  $b_2 = 0.40$ , con lo cual, el periodo fundamental de la estructura con disipadores debe ser igual a 0.56 s.

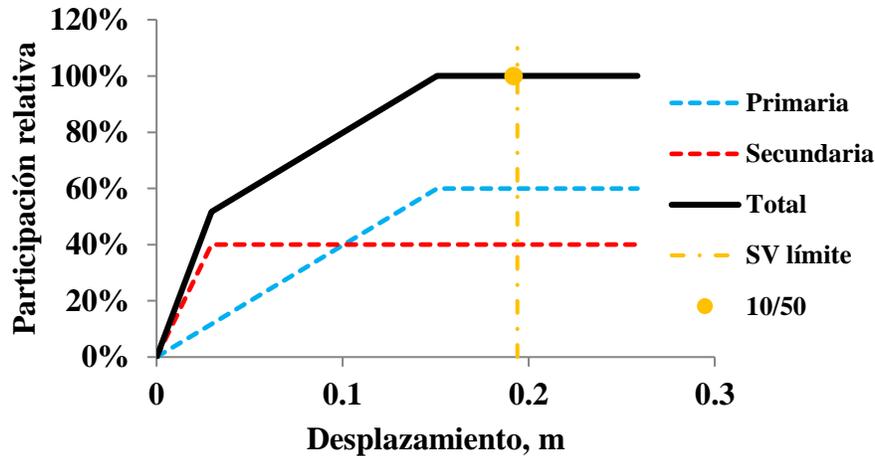


Figura 73. Respuesta del ODE con respecto al desplazamiento máximo.

En la Figura 73 se muestra graficada la respuesta media del ODE más una desviación estándar y el desplazamiento máximo permitido para el nivel de desempeño de Seguridad de Vida, el cual fue obtenido por Priestley<sup>[40]</sup>. Adicionalmente, en la Tabla 21 se muestran los desplazamientos máximos obtenidos para cada uno de los registros sísmicos.

Tabla 21. Desplazamiento máximo presentado por el ODE para cada registro.

Registro	Desplazamiento máximo, cm
CDAF8509.191	11.1
CCCL1709.191	11.9
CDAO8509.191	14.9
CDAO9509.141	9.7
DFVG8904.251	12.8
SCT19909.301	3.3
SCT21203.201	3.1
SCT21404.181	1.7
SCT29509.141	12.7

Se definió una configuración de CRP's en la que se disponían dos disipadores en cada nivel, uno a cada lado del eje de simetría vertical de la estructura, tal como se muestra en la Figura 74.

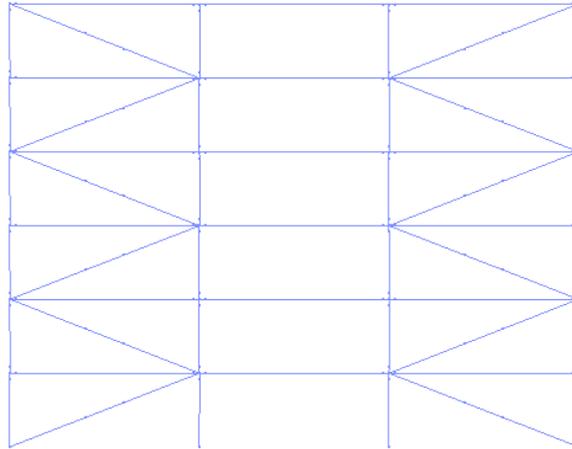


Figura 74. Configuración de los CRP's en la estructura.

La estructura con la configuración de CRP's mostrada fue sometida a un análisis estático elástico bajo una serie de cargas horizontales proporcionales a la masa actuante en cada nivel. De los resultados se obtuvieron los esfuerzos axiales actuantes en los disipadores, mismos que fueron normalizados con respecto al axil del primer nivel. El vector resultante fue utilizado para definir las áreas de los CRP's de los pisos superiores con respecto al área del disipador en la primera planta. En la Tabla 22 se muestran las áreas empleadas.

Tabla 22. Áreas de los CRP's para cada nivel de la estructura

Nivel	Axil normalizado	$A_c, cm^2$
1	1.0	55
2	0.83	45
3	0.66	35
4	0.50	25
5	0.33	15
6	0.16	5

### 3.2. MODELADO DE LOS CRP'S EN OPENSEES

Debido a que la sección resistente de los CRP's resulta ser únicamente la del elemento metálico interior, recordando que ni la carcasa ni el mortero toman esfuerzos del núcleo, estos elementos se modelaron empleando 3 subelementos: dos para las conexiones y uno para el núcleo.

Los elementos metálicos de arriostramiento convencionales suelen fallar por pandeo cuando son sometidos a cargas grandes de axiles de compresión. Esto se debe a las pequeñas

imperfecciones y deformaciones que les impiden ser totalmente rectos. Para representar un fallo por pandeo, estos elementos suelen modelarse con una ligera imperfección en el centro de luz<sup>[196]</sup>. Debido a que los CRP's están diseñados para deformarse inelásticamente, tanto a cargas de tensión como de compresión, para modelarlos en OpenSees basta con ignorar la imperfección inicial habitual en los contravientos convencionales.

OpenSees cuenta con una amplia variedad de modelos constitutivos para materiales metálicos como lo son *Steel01*, *Steel02*, *SteelMPF*, etc.<sup>[180]</sup>; sin embargo, Feng et al.<sup>[197]</sup> indican que no se presentan diferencias significativas cuando se utiliza uno u otro material para modelar los núcleos de los disipadores. En este caso se decidió utilizar el modelo denominado *Steel02*, cuyas características fueron explicadas con anterioridad.

Los CRP's considerados presentan todos las mismas relaciones  $\eta = 0.35$  y  $\gamma = 0.2$ , adicionalmente, se presenta una luz de vano de 8 metros y una altura de entrepiso contante en altura de 3 metros. En la Figura 75 se muestra un esquema del disipador considerado para la primera planta.

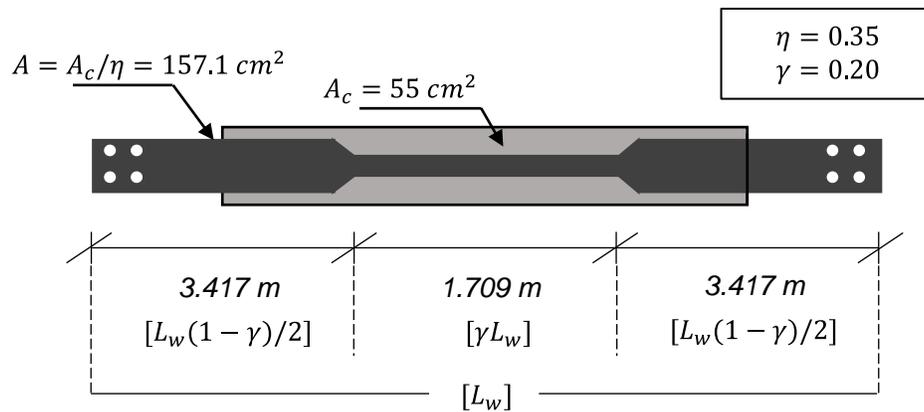


Figura 75. CRP empleado en la primera planta de la estructura.

$$L_w = \sqrt{(3 \text{ m})^2 + (8 \text{ m})^2} = 8.544 \text{ m}$$

$$L_c = 0.2 L_w = 0.2 (8.544 \text{ m}) = 1.709 \text{ m}$$

La deformación última de los disipadores se estimó por medio de Tremblay et al.<sup>[23]</sup>. En la ecuación que ellos presentan, para determinar la deformación última del núcleo, se emplean factores del *National Building Code of Canada*<sup>[198]</sup>. Como la estructura se destina para oficinas, se toma un factor de importancia  $I_E = 1.0$ , factor de ductilidad  $R_d = 4$  (estructuras con CRP's), factor de sobrerresistencia  $R_o = 1.2$ , factor de sobrerresistencia debido al endurecimiento por deformación  $R_{sh} = 1.1$ , relación entre el esfuerzo de fluencia real y el nominal del material  $R_{yield} = 1.1$ .

Aplicando (9):

$$\delta_{bf} = \frac{\phi F_y}{E} L_w [\gamma + \eta (1 - \gamma)]$$

$$\delta_{bf} = \frac{0.9(350 \text{ MPa})}{200\,000 \text{ MPa}} (8.544 \text{ m}) [0.2 + 0.35 (1 - 0.2)] = 0.00646 \text{ m}$$

Con lo que la deformación última del núcleo es igual a (8):

$$\varepsilon_{cu} = \left[ \frac{R_d R_o}{I_E} \delta_{bf} - \eta (1 - \gamma) R_{sh} R_{yield} L_w \left( \frac{F_y}{E} \right) \right] \frac{1}{\gamma L_w}$$

$$\varepsilon_{cu} = \left[ \frac{4 (1.2)}{1.0} (0.00646 \text{ m}) - 0.35 (1 - 0.2) (1.1) (1.1) (8.544 \text{ m}) \left( \frac{350 \text{ MPa}}{200\,000 \text{ MPa}} \right) \right] \frac{1}{1.709 \text{ m}}$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.015 = 1.5\%$$

### 3.3. MODELADO DE LOS CRP'S EN SAP2000

Para modelar los CRP's en SAP2000 se utilizaron elementos tipo link, considerando como modelo constitutivo el propuesto por Wen<sup>[199]</sup>, el cual es un modelo uniaxial plástico. Un esquema de la respuesta del modelo se muestra en la Figura 76. Se observa que el modelo se define por la carga de plastificación ( $P_y$ ), denominada en la Figura 76 como *yield*, por un coeficiente que define la transición entre la respuesta elástica y plástica (*exp*), y una rigidez inicial ( $K_{CRP}$ ), denominada en la Figura 76 como *k*, y de postfluencia.

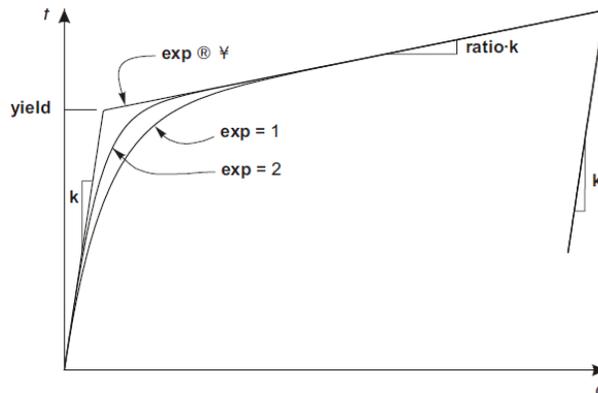


Figura 76. Propiedades del modelo plástico propuesto por Wen. Tomada de <sup>[191]</sup>.

La relación fuerza – deformación ( $f$ ), en su intervalo plástico, se define por medio de la siguiente expresión:

$$f = ratio \cdot k \cdot d + (1 - ratio) \cdot yield \cdot z \quad (65)$$

Donde *ratio* es la relación entre la rigidez postfluencia y la inicial; y *z* es una variable histerética interna, existente para  $|z| \leq 1$ . De manera inicial, *z* presenta un valor igual a cero ( $z_0 = 0$ ) y cambia de acuerdo a la siguiente ecuación diferencial<sup>191</sup>:

$$\dot{z} = \frac{k}{yield} \begin{cases} \dot{d}(1 - |z|^{exp}) & \dot{d} \cdot z > 0 \\ \dot{d} & \text{otro} \end{cases} \quad (66)$$

En cada nivel de la estructura se utilizan CRP's con áreas distintas, por lo tanto, sus rigideces ( $K_{CRP}$ ) y fuerzas de plastificación ( $P_y$ ) son diferentes entre sí. A continuación, se muestra el cálculo de las propiedades de los CRP's del primer nivel, los restantes 5 elementos se definieron de manera análoga. La rigidez de los CRP's se obtiene por (5):

$$K_{CRP} = f_k \frac{A_c E}{L_w}$$

El factor de forma  $f_k$  se obtiene por (6) de Tremblay et al.<sup>[23]</sup>:

$$f_k = \frac{1}{\gamma + \eta(1 - \gamma)}$$

$$f_k = \frac{1}{0.2 + 0.35(1 - 0.2)} = 2.08$$

Por lo tanto, la rigidez del CRP del primer nivel es igual a:

$$K_{CRP} = (2.08) \frac{(55 \times 10^{-4} \text{ m}^2)(200 \times 10^6 \text{ kPa})}{8.544 \text{ m}} = 267\,790 \text{ kN/m}$$

Considerando  $f_{yCRP} = 385 \text{ MPa}$  como el valor del esfuerzo de fluencia real del núcleo, se tiene la siguiente carga de plastificación:

$$P_y = f_{yCRP} \cdot A_c = 385 \times 10^3 \text{ kN} \cdot 55 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 2\,117.5 \text{ kN}$$

Para todos elementos se consideró un exponente igual a 25 y una rigidez postfluencia igual al 2% de la rigidez inicial. Es importante indicar que no es posible definir una deformación de última en este modelo. En la Figura 77 se muestra la estructura modelada en SAP2000.

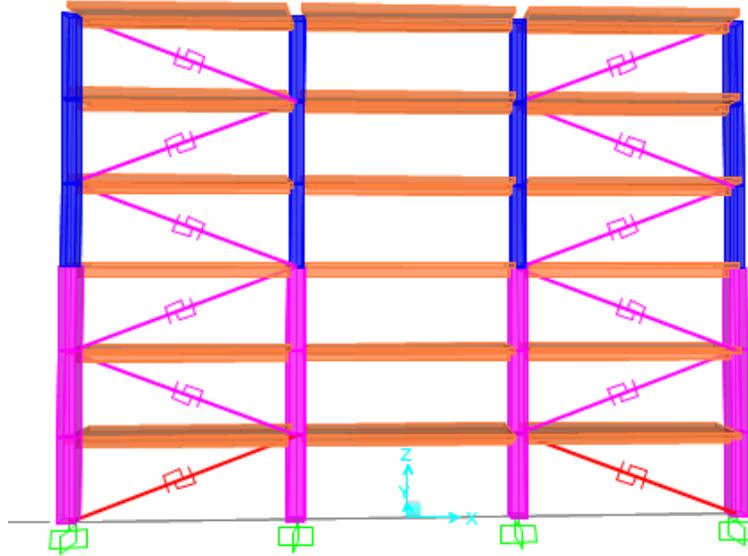


Figura 77. M0 modelada en SAP2000.

### 3.4. COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA DE LOS MODELOS CON CRP'S

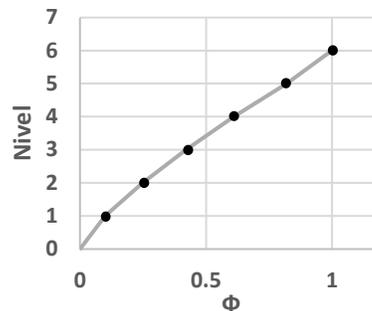
#### 3.4.1. Análisis modal de la estructura con CRP's

En la Tabla 23 se presenta un resumen de los periodos fundamentales obtenidos por medio de los programas OpenSees y SAP2000. Del análisis modal realizado en OpenSees se obtuvo el primer modo de vibrar normalizado de la estructura ( $\phi$ ).

Tabla 23. Resultados del análisis modal de los modelos con y sin CRP's.

Modelo	T, s	
	Sin CRP's	Con CRP's
OpenSees	1.18	0.56
SAP2000	1.25	0.57

$$\phi^T = \{0.10 \ 0.25 \ 0.42 \ 0.61 \ 0.82 \ 1.0\}$$



### 3.4.2. Curva de capacidad de la estructura con CRP's

En la Figura 78 se presentan las curvas obtenidas del análisis estático no lineal de la estructura con CRP's, usando los programas SAP2000 y OpenSees. Debido a que no se define una deformación última en el modelo de Wen, la curva que brinda SAP2000 alcanza un desplazamiento de 0.5 m, con fines comparativos se muestra hasta 0.27 m. Obsérvese que, a pesar de esta diferencia, ambas curvas son idénticas en su rama elástica y en la parte inicial de la plástica, presentándose, en la curva de OpenSees, caídas en la resistencia lateral a medida que los disipadores alcanzan su deformación última. A manera de comparación, en la Figura 79 se muestran de manera conjunta las curvas de capacidad de los modelos con y sin CRP's, obtenidas por OpenSees.

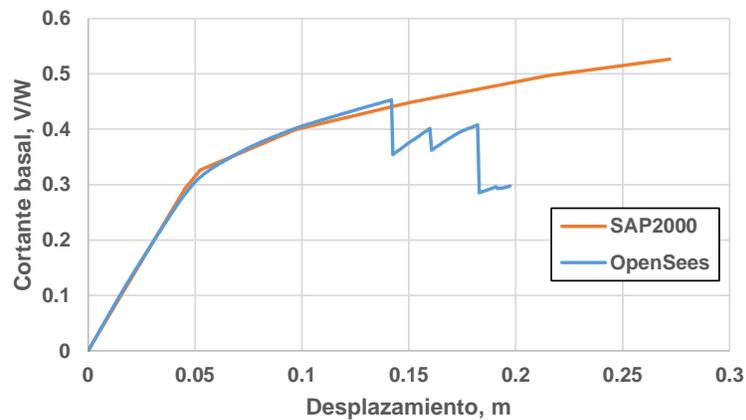


Figura 78. Comparación de las curvas de capacidad obtenidas con SAP2000 y OpenSees del diseño M0.

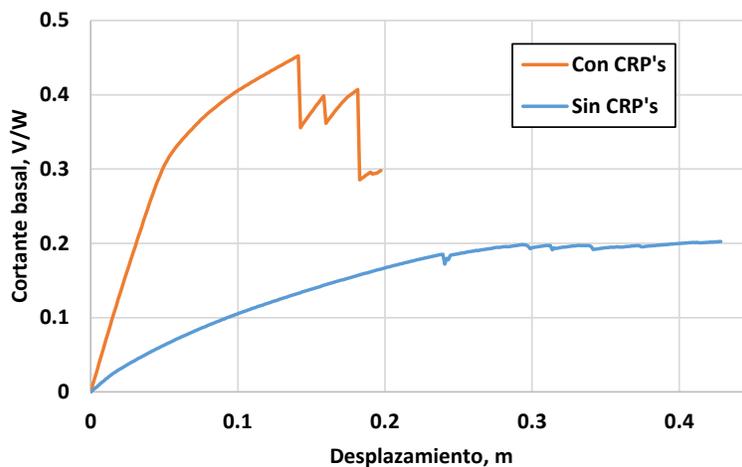


Figura 79. Curvas de capacidad de los modelos con y sin CRP's.

### 3.5. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DE LA ESTRUCTURA CON CRP'S

La estructura reforzada con CRP's se sometió a una evaluación de su desempeño sísmico. El espectro utilizado fue el mismo al usado en la evaluación de la estructura sin reforzar, el cual se muestra en la Figura 68. Se conservan los mismos valores límite de distorsiones de entrepiso y rotaciones plásticas en elementos, los cuales se muestran en la Tabla 18. Debido a que la estructura resistente está conformada por los CRP's, mismos que no presentan daño o degradación alguna, se considera un comportamiento estructural tipo B. Las características de los tipos estructurales se muestran en la Tabla 2.

Siguiendo lo establecido por la ATC – 40<sup>[39]</sup>, se determinó el punto de desempeño de la estructura reforzada bajo la demanda sísmica considerada. La evaluación se realizó empleando los resultados que brindó el programa OpenSees. El espectro de capacidad y el espectro de demanda reducido se graficaron de manera conjunta en la Figura 80.

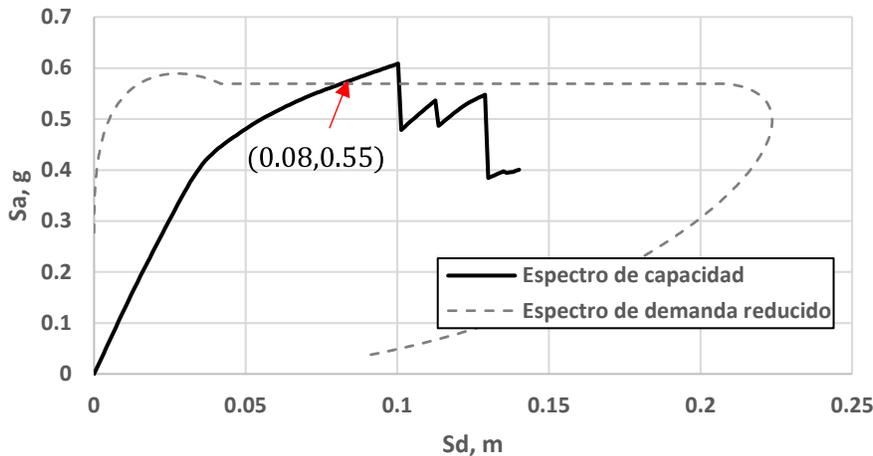


Figura 80. Punto de desempeño del diseño M0.

Los resultados obtenidos de la evaluación del desempeño sísmico se muestran en la Tabla 24. Se presentan el amortiguamiento efectivo, las coordenadas del punto de desempeño y el valor máximo de las distorsiones de entrepiso y rotaciones en elementos asociados.

Tabla 24. Resultado de las evaluaciones del desempeño sísmico realizadas.

$\beta_{eff}, \%$	$a_{pi}, g$	$d_{pi}, m$	Máx. Distorsión	Máx. Rot. Vigas	Máx. Rot. Cols. 1-3	Máx. Rot. Cols. 4-6
17.2	0.55	0.08	0.009	0.009	0.002	0.004

Comparando los resultados obtenidos de la evaluación de las estructuras, con y sin CRP's, (mostrados en las Tablas 24 y 19, respectivamente) se observa que la adición de los disipadores incrementa el amortiguamiento efectivo ( $\beta_{eff}$ ) un 7% con respecto a la estructura sin reforzar. Debido a la mayor rigidez de la estructura reforzada, su punto de desempeño se presenta en la meseta del espectro de demanda reducido. Adicionalmente, hay una reducción de la distorsión de entrepiso y de las rotaciones plásticas, sin embargo, los valores obtenidos se encuentran alejados de los límites fijados, con lo cual, cabe pensar que estructuras menos rígidas pueden satisfacer los objetivos de desempeño establecidos.

### 3.6. COSTE DE LA SUBESTRUCTURA DISIPADORA

Balling et al.<sup>[11]</sup> indican que el costo del subsistema disipador se ve muy influenciado por el área transversal del núcleo, esto se debe a que las columnas y conexiones deben ser lo suficientemente fuertes como para permanecer en un intervalo elástico cuando los CRP's plastifican, por lo tanto, si el área del núcleo aumenta, también lo hace su resistencia y el costo del refuerzo. Por su parte, Guerrero et al.<sup>[31]</sup> realizaron una evaluación de los costos generados por estructuras con CRP's a lo largo de su vida útil. Ellos consideraron que el costo del subsistema disipador era proporcional al peso del núcleo de los CRP's, con lo cual, también se basaron indirectamente en el área de los núcleos.

En concordancia con las anteriores investigaciones, en este trabajo se utilizó el peso del núcleo de los disipadores para estimar el costo del subsistema disipador. Cabe destacar que, en regiones cuyo costo de mano de obra resulte elevado, el costo de instalación de los CRP's puede jugar un rol determinante en el costo del refuerzo, sin embargo, en este trabajo no se toma en cuenta dicho aspecto, cabiendo la posibilidad de considerarlo en trabajos futuros. Considerando un acero con peso específico  $\gamma_s = 7860 \text{ kg/m}^3$ , el peso del subsistema disipador ( $W_{sd}$ ) es igual a:

$$W_{sd} = \gamma_s \cdot L_w \cdot \sum A_{ci} \left[ \gamma + \frac{1 - \gamma}{\eta} \right] \quad (67)$$

En este caso, el peso total de la estructura de refuerzo propuesta es igual a  $W_{sd} = 6009 \text{ kg}$  de acero. Habiéndose definido, evaluado y estimado el costo de la estructura de refuerzo de referencia, se plantea el problema de encontrar la subestructura disipadora que permita satisfacer los objetivos de desempeño establecidos optimizando la cantidad de material empleado. El proceso de optimización se presenta en el siguiente capítulo y, para realizarlo, se recurrió a algoritmo metaheurísticos, considerándose como variables el número, posición, configuración y disposición de los CRP's.

## CAPÍTULO 4

### OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DISIPADOR

#### 4.1. INTRODUCCIÓN

Para optimizar la estructura disipadora se emplearon métodos metaheurísticos, los cuales brindan soluciones aproximadas a problemas cuya complejidad imposibilita obtener una solución determinista en un periodo de tiempo razonable. Cuatro algoritmos de búsqueda fueron considerados: Búsqueda aleatoria (BA), Búsqueda Local (BL), *Simulated Annealing* (SA) y *Simulated Annealing* considerando M0 como solución inicial. A continuación, se brinda un breve resumen de lo presentado en este capítulo.

En primer lugar, se plantea el problema de optimización, esto por medio de la descripción del objeto a optimizar, de las variables y parámetros considerados, de la definición de la función objetivo y de las restricciones del problema. Posteriormente se define el espacio de soluciones y se determina su tamaño, esto para justificar el uso de una MH en la optimización del problema. El espacio de soluciones engloba las posibles combinaciones que se pueden generar con todos los valores de todas las variables consideradas en el problema. Si el espacio de soluciones es demasiado grande como para revisar cada una de las combinaciones posibles, entonces se justifica el uso de técnicas MH's.

El primer algoritmo de búsqueda aplicado consistió en una Búsqueda Aleatoria (BA) en el espacio de soluciones. En este proceso se generaron diferentes candidatas a solución por medio de un proceso aleatorio, se verificó si cumplían las restricciones del problema (p. ej. distorsiones y rotaciones plásticas máximas < valores límite); en caso de cumplir, se almacenaron los datos de la solución como el peso del sistema disipador, el periodo fundamental, etc. El objetivo de BA no es encontrar la combinación de variables que nos

brinde la solución óptima del problema, sino identificar las características de las soluciones factibles generadas bajo las restricciones y variables consideradas.

La MH escogida para optimizar el problema fue *Simulated Annealing* (SA). Esta MH utiliza un algoritmo de Búsqueda Local (BL) en el proceso de optimización. Para identificar las ventajas de SA, se decidió aplicar en primera instancia el algoritmo de BL sin permitir la degradación de soluciones. Los diseños óptimos obtenidos por BL y SA se comparan más adelante. Debido a que una solución inicial de alta calidad puede mejorar el desempeño de los algoritmos de búsqueda, se decidió correr SA considerando al diseño M0 (presentado en el capítulo 3) como primera solución. Los resultados de este algoritmo de búsqueda se comparan con los obtenidos por los primeros dos.

#### **4.1.1. Objeto de optimización**

El objeto sometido al proceso de optimización es la subestructura disipadora, conformada por CRP's, que permita a la estructura principal alcanzar los objetivos de desempeño establecidos en la Tabla 18 ("Valores límite de las respuestas consideradas").

#### **4.1.2. Variables de decisión y parámetros del problema**

Como se mencionó antes, las variables del problema son los valores que son susceptibles de ser modificados durante el proceso de optimización, mientras que los parámetros son características requeridas para definir el problema pero que son mantenidas inalteradas. En este caso, se consideraron como parámetros las características de la estructura principal, es decir, las dimensiones y armaduras de refuerzo de los elementos viga y columna, además de los materiales empleados en ellos. Por otra parte, se consideraron como variables de decisión la disposición y configuración de los CRP's, las relaciones de longitud y áreas de sus núcleos ( $\gamma$  y  $\eta$ , respectivamente), y el área transversal de los mismos ( $A_c$ ). El material empleado en los núcleos de los disipadores se consideró como parámetro en este problema. Obsérvese que es posible plantear el problema de optimizar tanto la estructura principal como el subsistema disipador de manera simultánea, sin embargo, esto se encuentra fuera del alcance del presente trabajo y se propone como una futura línea de investigación.

Los valores de las variables consideradas en el problema fueron almacenados en un arreglo matricial (mostrado en la Figura 81 y denominada de aquí en adelante como matriz de diseño, MD) de dimensión  $N \times 4$ , donde  $N$  es el número de marcos que posee el modelo analizado. En la MD se encuentra toda la información necesaria para definir el subsistema disipador candidato a solución, es decir, indica la existencia y orientación del CRP en el

marco  $i$ , la relación de longitud y de áreas del dissipador ( $\gamma_i$  y  $\eta_i$ , respectivamente) y el área transversal del núcleo ( $A_{ci}$ ).

$$MD = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & \dots & C_i & \dots & C_N \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \dots & \lambda_i & \dots & \lambda_N \\ A_{c1} & A_{c2} & \dots & A_{ci} & \dots & A_{cN} \\ \eta_1 & \eta_2 & \dots & \eta_i & \dots & \eta_N \end{bmatrix}$$

Figura 81. Configuración de la matriz de diseño.

Siguiendo las recomendaciones enunciadas por Ruiz<sup>[6]</sup>, se impuso la simetría vertical de la rigidez aportada por el sistema dissipador. Esto se consiguió definiendo los CRP's en los vanos uno y tres siempre con las mismas características, aunque con orientaciones contrarias. Tres configuraciones diferentes de los CRP's fueron consideradas: la primera implica que no existe CRP en el marco  $i$  y las restantes dos considera que sí existe un CRP en el marco, pero con una orientación hacia la izquierda o hacia la derecha. En la Figura 82 se muestran de manera esquemática las configuraciones mostradas.

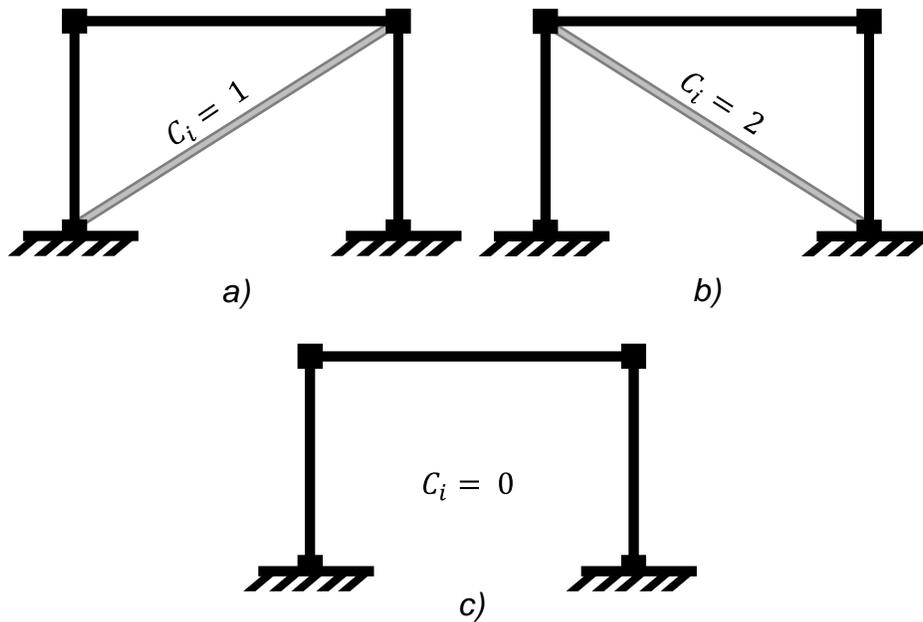


Figura 82. Configuraciones posibles en el proceso de optimización: a) CRP de izquierda a derecha; b) CRP de derecha a izquierda; y c) que no hay CRP en el marco.

El resto de las variables consideradas ( $\gamma_i$ ,  $A_{ci}$  y  $\eta_i$ ) definen la rigidez y la deformación última del disipador. En la Figura 83 se muestra un esquema del modelo paramétrico de los CRP's empleados en el presente trabajo.

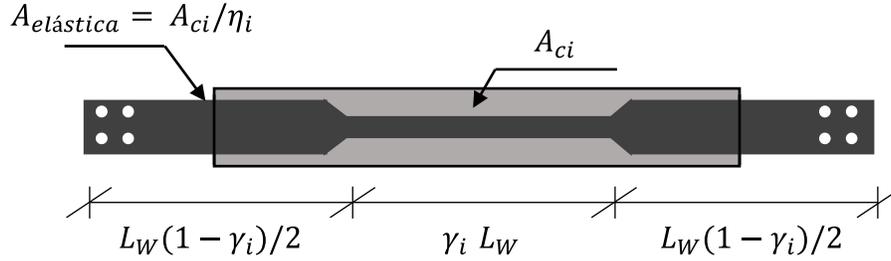


Figura 83. Esquema del modelo paramétrico de los CRP's empleado.

#### 4.1.3. Función objetivo

La función objetivo  $f(\mathbf{x})$  es la expresión matemática que cuantifica la calidad de las soluciones propuestas. Debido a que se busca minimizar la cantidad de material empleado en el diseño del subsistema disipador, la función objetivo de este problema es una ecuación idéntica a aquella presentada en la sección 3.6 (“Coste de la subestructura disipadora”), considerando ésta que el número de disipadores cambia durante el proceso de optimización y que cada uno puede presentar relaciones geométricas distintas.

$$f(\mathbf{x}) = W_{sd(MD)} = \gamma_s \cdot L_w \cdot \sum A_{ci} \left[ \gamma_i + \frac{1 - \gamma_i}{\eta_i} \right] \quad (68)$$

#### 4.1.4. Restricciones del problema

Las restricciones del problema son aquellas condiciones que deben de cumplir las candidatas a solución para ser consideradas como factibles. Las restricciones que se tomaron en cuenta para este problema son los valores límite de la distorsión de entrepiso y de las rotaciones plásticas de los elementos viga y columna. Para evaluar la factibilidad de las soluciones propuestas se utilizó el Método del Espectro de Capacidad, comparándose las respectivas respuestas presentadas por la estructura, al alcanzar el punto de desempeño, con los valores máximos considerados. Los valores máximos de las respuestas estructurales fueron presentados anteriormente en la Tabla 18 (“Valores límite de las respuestas consideradas”).

#### 4.1.5. Tamaño del espacio de soluciones

En este trabajo se consideró un espacio de soluciones formado únicamente por variables discretas. La variable  $C_i$ , que define la configuración de los CRP's, está conformada por tres valores: 0, 1 y 2. Se consideró que  $\gamma$  podía variar de 0.15 a 0.85, con incrementos de 0.05, el intervalo se definió siguiendo lo reportado por Aguaguña et al.<sup>[25]</sup> y para permitir considerar CRP's de núcleo corto<sup>[16,18,26]</sup>. Por otra parte, la variable  $\eta$  presenta valores de entre 0.3 a 0.7, con incrementos de 0.1, el intervalo se definió basándose en Tremblay et al.<sup>[23]</sup> y Hoveidae et al.<sup>[18]</sup>. Por último, para el área transversal del núcleo ( $A_c$ ) se consideraron valores entre 5 a 200  $cm^2$ , con incrementos de 5  $cm^2$ .

$$\mathbf{C} = \{0, 1, 2\}$$

$$\boldsymbol{\gamma} = \{0.15, 0.20, 0.25 \dots 0.85\}$$

$$\boldsymbol{\eta} = \{0.3, 0.4, 0.5 \dots 0.7\}$$

$$\mathbf{A} = \{5, 10, 15 \dots 200\} [cm^2]$$

El tamaño del espacio de soluciones es igual a las diferentes matrices de diseño que se pueden formar con los valores antes enlistados, y es dependiente del número de variables consideradas, de la cantidad de valores que éstas pueden tomar y del orden en que se pueden presentar. Debido a que se permite la repetición de valores en cada fila de la matriz e importa además el orden en que éstos se presentan, el tamaño del espacio de soluciones es igual al producto de todas las variaciones de cada variable. La variación de un conjunto de  $m$  elementos arreglados en  $n$  posiciones diferentes es igual a:

$$VR_{m,n} = m^n \quad (69)$$

La matriz de diseño cuenta en total con 18 posiciones para cada variable, sin embargo, debido a la condición de simetría con respecto al eje vertical del marco, el valor de posiciones reales es igual a 12. Adicionalmente, para valores de  $C_i = 0$ , las soluciones son indistintas para cualquier valor de  $\gamma_i$ ,  $\eta_i$  y  $A_i$ , por lo tanto la cardinalidad de  $\mathbf{C}$  debe tomarse igual a 2. En base a lo anterior, el tamaño del espacio de soluciones ( $TES$ ) es igual a:

$$TES = VR_{C,12} \cdot VR_{\gamma,12} \cdot VR_{\eta,12} \cdot VR_{A,12} \quad (70)$$

$$TES = VR_{2,12} \cdot VR_{15,12} \cdot VR_{5,12} \cdot VR_{40,12}$$

$$TES = 2^{12} \cdot 15^{12} \cdot 5^{12} \cdot 40^{12}$$

$$TES = 2.177 \times 10^{45} \text{ posibles soluciones}$$

Debido al tamaño del espacio de soluciones, se justifica el uso de técnicas metaheurísticas para resolver el problema de optimización presentado

## 4.2. BÚSQUEDA ALEATORIA EN EL ESPACIO DE SOLUCIONES

### 4.2.1. Descripción de BA

La Búsqueda Aleatoria (BA o *Random walk* en inglés) en el espacio de soluciones permite realizar un reconocimiento de las características de las soluciones factibles. Para realizar la BA se empleó el programa Matlab<sup>[200]</sup> en conjunto con el programa de elementos finitos OpenSees. El programa OpenSees se destinó al análisis estructural de las posibles soluciones debido a que permite definir de manera sencilla los modelos de elementos finitos (MEF). En la Figura 84 se muestra el pseudo código empleado para realizar BA.

---

```

Iniciar Matlab
  Definir variables del problema
  Para i = 1 hasta N posibles soluciones
    Generar aleatoriamente posible solución x
    Guardar parámetros de x
    LLamar OpenSees
      Crear x en MEF
      Obtener curva de capacidad
      Guardar registros de respuestas
    Cerrar OpenSees
      Leer registros
      Aplicar método del espectro de capacidad
      Realizar comprobaciones
    Si cumple comprobaciones
      Guardar resultados
    Fin
    i = i + 1
  Fin
Regresar resultados obtenidos
Fin

```

---

Figura 84. Pseudo código utilizado en el paseo aleatorio.

#### 4.2.2. Resultados obtenidos por BA

En total se generaron 30,000 posibles soluciones aleatorias, de las cuales, poco más de 9,000 verificaban las restricciones establecidas, es decir, la creación de soluciones aleatorias presenta una factibilidad del 30%. Para cada una de esas 9,000 soluciones se registró el peso del sistema disipador ( $W_{sd}$ ), el periodo fundamental ( $T$ ), el amortiguamiento efectivo obtenido ( $\beta_{eff}$ ) y el número de disipadores empleados. En la Figura 85 se muestran los valores de  $W_{sd}$  de las 9,000 soluciones obtenidas. Se observa que el rango de  $W_{sd}$  varía de entre 3,500 – 30,000 kg de acero. En comparación, la solución obtenida por el método de Guerrero et al.<sup>[22]</sup> presentaba un valor de  $W_{sd} = 6009$  kg de acero. Es importante indicar que estos resultados no son definitivos, ya que posteriormente se aplicaron técnicas metaheurísticas para la optimización del problema.

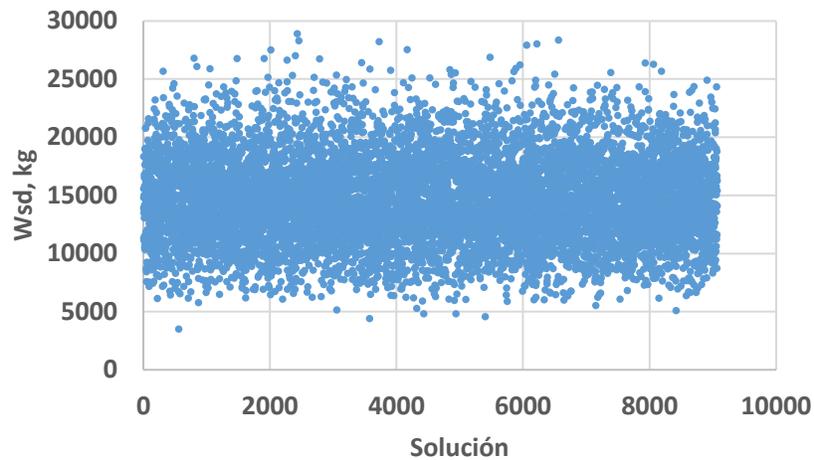


Figura 85. Resultados del paseo aleatorio.

Debido a que usar un número elevado de disipadores puede encarecer el proceso de reajuste, se estudió cómo se relacionaban el valor de  $W_{sd}$  con el número de disipadores empleados en la solución. En la Figura 86 se muestran graficados ambos valores con la respectiva frontera de Pareto, para facilitar su interpretación, los valores de  $W_{sd}$  se graficaron hasta un valor de 10,000 kg. Se observa que la frontera de Pareto está formada por dos soluciones, las cuales emplearon 6 y 7 disipadores. Mientras que es posible cumplir las restricciones con un mínimo de 6 disipadores, hay soluciones que emplean una menor cantidad de material a pesar de contar con un mayor número de estos dispositivos. Con fines comparativos, se marca la posición que le corresponde al modelo M0 por medio de una estrella de color verde.

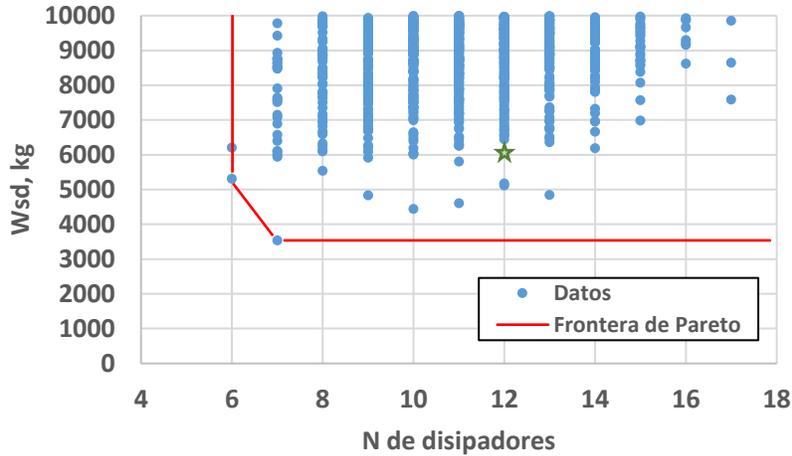


Figura 86. Frontera de Pareto de los datos obtenidos.

En las Figuras 87 y 88 se muestran graficadas las frecuencias absolutas de los valores de  $W_{sd}$  y del número de disipadores empleados, respectivamente, obtenidos en por BA. Se observa que las soluciones más comunes emplean valores de  $W_{sd}$  entre 10,000 a 24,000 kg de acero, mientras que la cantidad de disipadores más comunes son de entre 10 a 16 elementos.

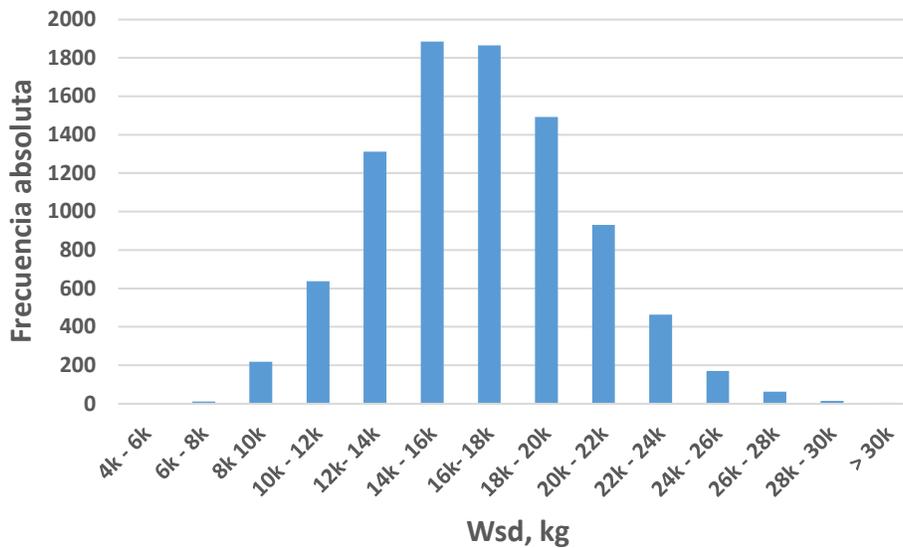


Figura 87. Valores de  $W_{sd}$  ordenados de menor a mayor.

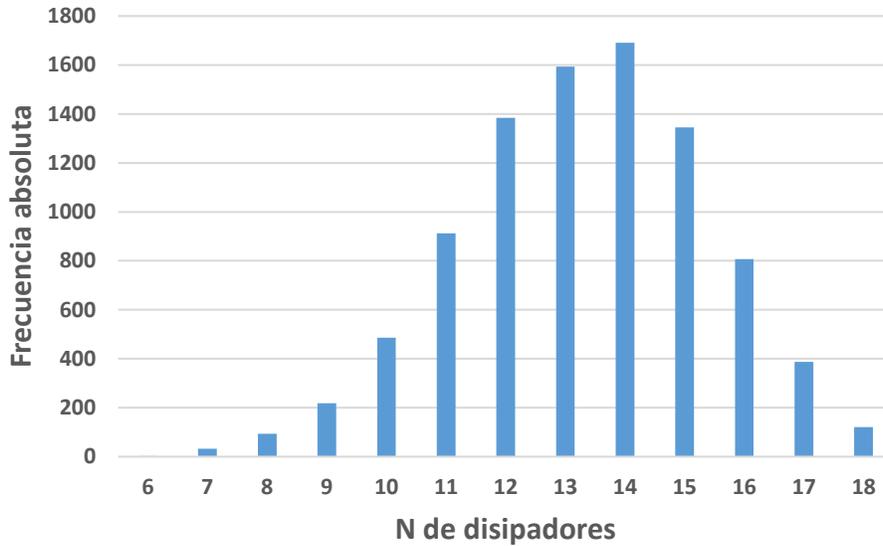


Figura 88. Valores del número de disipadores empleados, ordenados de menor a mayor.

En las Figuras 89 y 90 se muestran graficados los valores de  $W_{sd}$  y del amortiguamiento efectivo ( $\beta_{eff}$ ) en función del periodo fundamental ( $T$ ) de las soluciones obtenidas, respectivamente. Con estos datos se generó una línea de tendencia para identificar la relación entre las variables. En ambos casos, las líneas de tendencia de tipo exponencial fueron las que brindaron los mayores valores de coeficiente de determinación ( $R^2$ ). Asimismo, se observa que los valores obtenidos se encuentran por debajo de 0.60, con lo cual, se concluye que existe una pobre relación entre las variables en ambos casos. Con fines comparativos, en ambas figuras se muestra la posición correspondiente al modelo M0 por medio de una estrella verde.

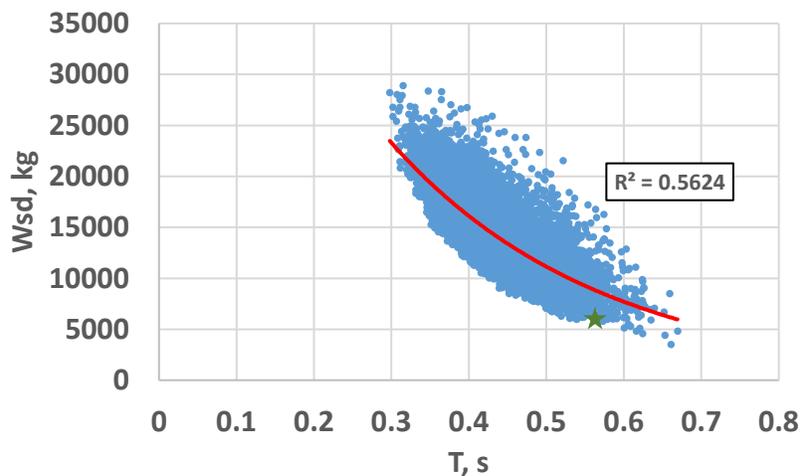


Figura 89. Valores de  $W_{sd}$  en función del periodo fundamental  $T$ .

De manera adicional, se observa que el periodo fundamental más grande obtenido era de aproximadamente 0.65 segundos, valor muy cercano al  $T = 0.56$  segundos, obtenido por medio del método de Guerrero et al.<sup>[22]</sup>. Nótese también que el amortiguamiento efectivo ( $\beta_{eff}$ ) llega a presentar valores máximos cercanos al 20%.

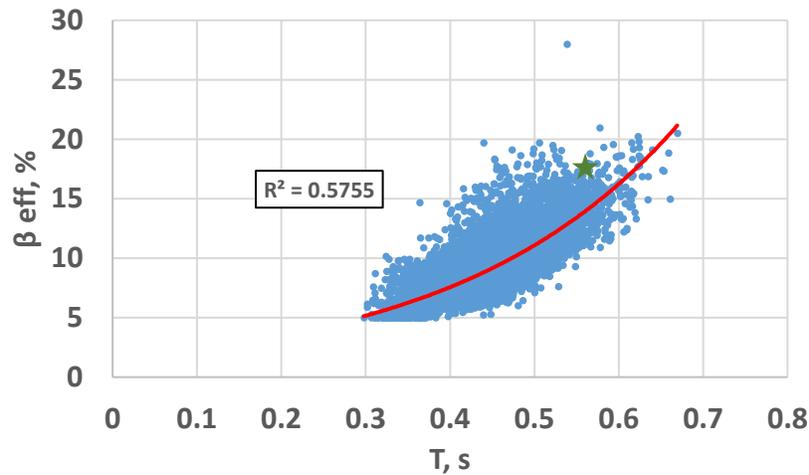


Figura 90. Valores de  $\beta_{eff}$  en función del periodo fundamental  $T$ .

### 4.3. OPTIMIZACIÓN POR BÚSQUEDA LOCAL

#### 4.3.1. Descripción de BL

La Búsqueda Local (BL) es un algoritmo que explora en las inmediaciones de la solución actual  $\mathbf{x}$ , con la intención de localizar alguna otra de mejor calidad. El algoritmo comienza generando una solución inicial factible de manera aleatoria. Las subsecuentes posibles soluciones investigadas ( $\mathbf{x}'$ ) son generadas modificando en algún grado la solución actual  $\mathbf{x}$ . Cuando se encuentra una solución  $\mathbf{x}'$  de mejor calidad que la solución actual  $\mathbf{x}$ , la primera reemplaza a la segunda como modelo base para generar nuevas soluciones. Cada vez que  $\mathbf{x}$  es reemplazada, se permiten generar hasta un número  $N_{m\acute{a}x}$  de posibles soluciones  $\mathbf{x}'$ , si no se encuentra una solución de mejor calidad, el algoritmo se detiene. Este proceso de búsqueda presenta la ventaja de que se conservan las variables cuyos valores brinden calidad a las soluciones, sin embargo, no tiene ningún mecanismo que le permita salir de óptimos locales. Para subsanar este problema, el algoritmo de búsqueda se reinicia un número  $r_{m\acute{a}x}$  de veces. En la Figura 91 se muestra el pseudo – código empleado para BL.

---

```

Iniciar
  Definir variables del problema
  Generar aleatoriamente solución  $x$ 
  Para  $r = 1$  hasta  $r_{m\acute{a}x}$  (hasta realizar  $r_{m\acute{a}x}$  reinicios)
    Mientras  $N \leq N_{m\acute{a}x}$  (hasta revisar  $N_{m\acute{a}x}$  posibles soluciones)
      Procedimiento Generación de  $x'$  a partir de MD( $x$ )
        Si  $f(x') < f(x)$  & cumple restricciones
           $x = x'$ 
          MD( $x$ ) = MD( $x'$ )
           $N = 1$ 
          Si no
             $N = N + 1$ 
          Fin
        Fin
       $r = r + 1$ 
    Fin
  Regresar resultados registrados
Fin

```

---

Figura 91. Pseudo – código empleado para BL.

En cada paso de la búsqueda,  $x'$  se genera de manera aleatoria modificando hasta un porcentaje  $pV$  de elementos de la MD de la solución actual  $x$ , siendo  $pV$  un valor constante a lo largo del proceso de optimización. Como se mencionó antes, la MD cuenta en realidad con 12 columnas, por lo que su número de elementos es igual a  $12 \cdot 4$  variables = 48 elementos. Para cada nueva  $x'$  se modifican hasta un número  $m$  de elementos, de tal forma que:

$$m \leq pV \cdot 48 \text{ elementos}$$

Una vez definido el número de parámetros a modificar, éstos eran seleccionados de la MD( $x$ ) de manera aleatoria, pudiendo escogerse cualquiera de las 4 variables definidas ( $C, \gamma, A_n$  ó  $\eta$ ). La modificación de la variable seleccionada solo permitía cambiar a valores en la vecindad inmediata del valor actual, la dirección tomada era escogida de manera aleatoria. En este proceso, si no existía el nuevo valor, no se realizaba ninguna modificación al parámetro. Para ejemplificar esto, consideremos el caso en el que se debe modificar un valor  $C_i$  de la MD. Anteriormente se ha definido que  $C_i$  puede tomar tres valores:

$$C = \{0, 1, 2\}$$

Si  $C_i = 0$  y el movimiento a realizar indica que se debe de tomar el siguiente valor de  $C$ , entonces:

$$C_i = 1$$

En el caso contrario, que se deba tomar el valor anterior de  $C$ , entonces  $C_i$  conserva su valor ya que no existe un elemento anterior en el vector  $C$  que permita dicho movimiento.

$$C_i = 0$$

Es importante indicar que no existe movimiento que permita a  $C_i$  cambiar de 0 a 2, ya que solo se pueden tomar valores en la vecindad inmediata de la actual posición del vector de la variable correspondiente. En la Figura 92 se muestra el pseudo – código de la generación de posibles soluciones en el entorno de  $x$ .

---

```

Procedimiento Generación de  $x'$  a partir de MD( $x$ )
  Obtener aleatoriamente  $m \leq pV \cdot 48$ 
  Mientras  $i \leq m$  (hasta modificar m variables)
    Seleccionar aleatoriamente variable  $i$  de MD( $x$ )
     $C =$  valor aleatorio  $\in \{0,1\}$ 
    Si  $C = 0$ 
      Tomar valor en la posición anterior del vector de la variable correspondiente
    Sino
      Tomar valor en la posición siguiente del vector de la variable correspondiente
    Fin
  Fin
  Regresar MD( $x'$ )
Fin

```

---

Figura 92. Pseudo – código empleado para generar la matriz de diseño de  $x'$ .

#### 4.3.2. Calibración de BL

Se observa que se tienen tres factores que afectan al algoritmo de búsqueda: el número de reinicios realizados, el número de posibles soluciones  $x'$  que se generan por cada vecindad y el porcentaje máximo de elementos de la MD que se pueden modificar ( $pV$ ). Para estudiar cómo cada uno de estos afecta el desempeño del algoritmo, se realizaron múltiples corridas variando los valores de cada factor.

En las corridas de prueba se consideraron 1, 5, 10 y 15 reinicios, pudiéndose crear 100, 250 y 500 posibles soluciones  $x'$  para cada solución  $x$  encontrada, asimismo, el valor de  $pV$  se tomó igual a 0.10, 0.20 y 0.30. En las Figuras 93 y 94 se muestran graficados los

valores de  $W_{sd}$  y los tiempos obtenidos, respectivamente, para cada una de las combinaciones consideradas.

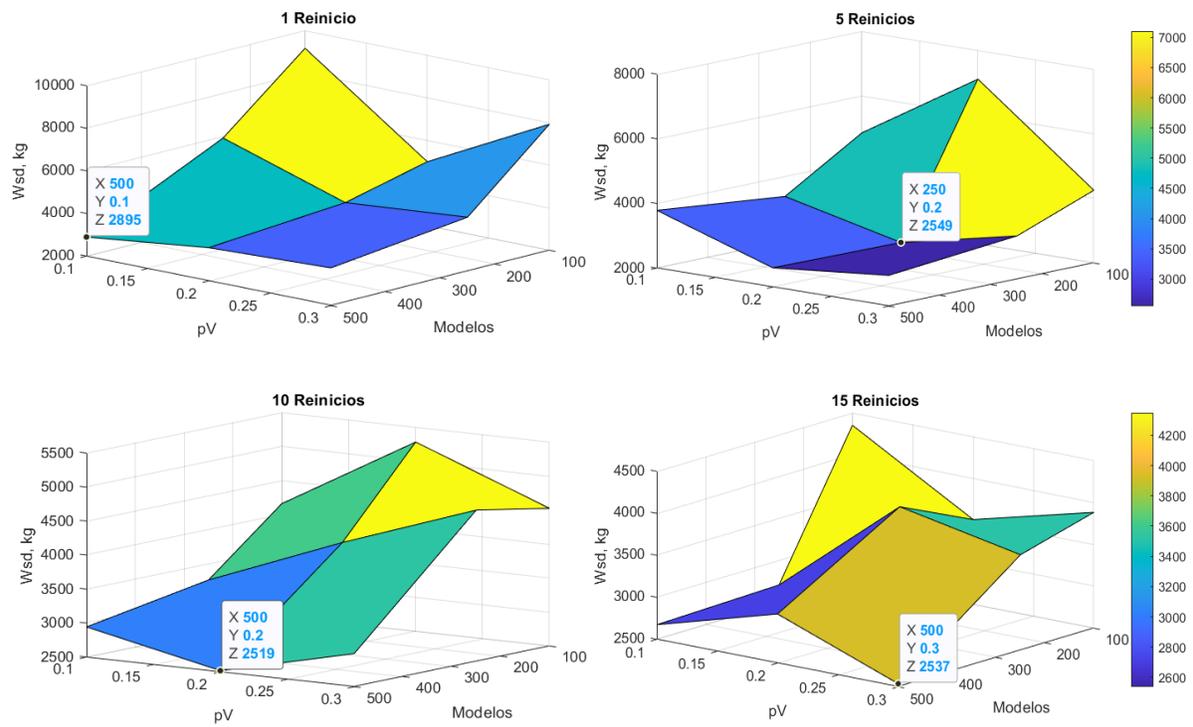


Figura 93. Valores de  $W_{sd}$  obtenidos por BL con los diferentes factores considerados.

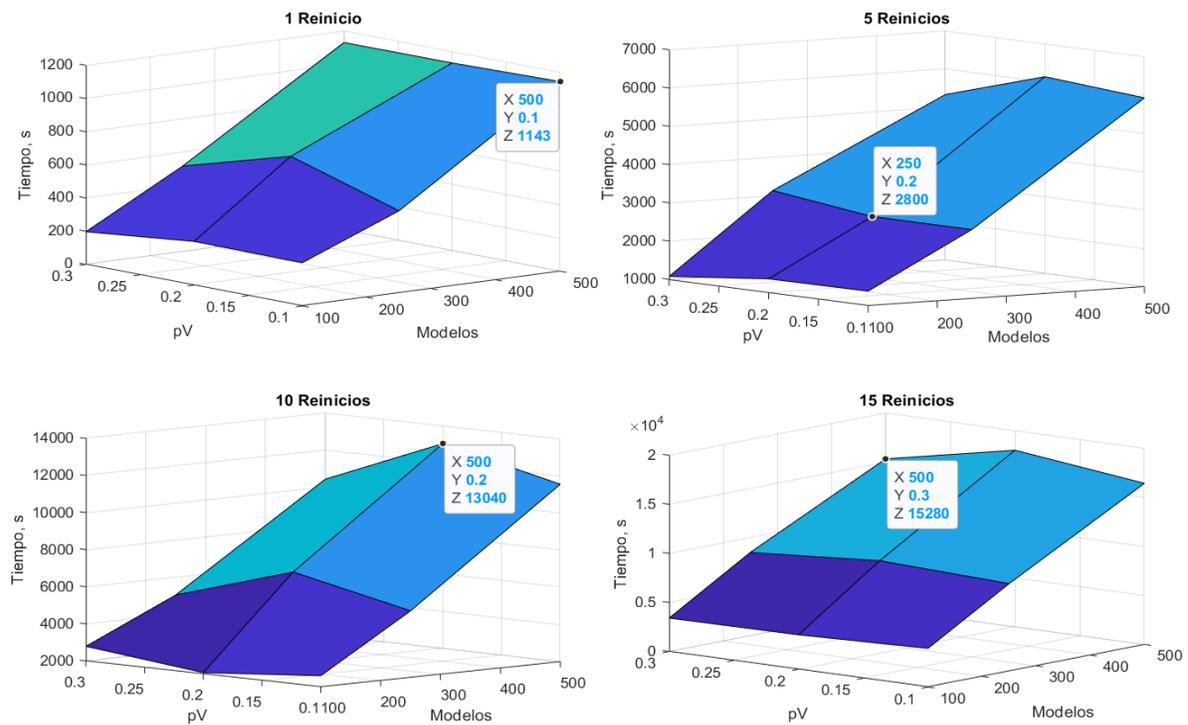


Figura 94. Tiempos obtenidos por BL con los diferentes factores considerados.

De la Figura 93 se observa que los valores de  $W_{sd}$  se ven afectados por el número de reinicios permitidos y las posibles soluciones  $x'$  visitadas. De manera general, las corridas que permitían 5, 10 y 15 reinicios obtuvieron valores de  $W_{sd}$  muy similares entre sí (aprox. 2,500 kg de acero). Se observa que el valor de la función objetivo disminuye a medida que se incrementa el número de posibles soluciones  $x'$  visitadas. Finalmente, parece ser que la influencia del valor de  $pV$  en los resultados obtenidos es muy poca.

De la Figura 94 se observa que el tiempo de cómputo es inversamente proporcional tanto al número de reinicios permitidos como de las posibles soluciones  $x'$  visitadas, requiriéndose 1,000 segundos, aproximadamente, por cada reinicio cuando se permite la generación de 500 posibles soluciones por vecindad. Asimismo, se observa que el valor de  $pV$  no afecta la duración de la MH.

Basándose en los resultados obtenidos, se decidió correr la BL con un valor de  $pV = 0.20$ , visitándose 500 posibles soluciones  $x'$  por cada solución  $x$  encontrada y permitiéndose 10 reinicios.

### 4.3.3. Resultados obtenidos con BL

BL se corrió un total de 5 veces para realizar una comparación de los resultados, los cuales son mostrados a continuación. En la Figura 95 se muestran graficados los valores de  $W_{sd}$  obtenidos para cada solución  $x$  encontrada durante la primera corrida de BL. La gráfica da una idea de la trayectoria seguida por el algoritmo de búsqueda, así como el número de soluciones encontradas por corrida.

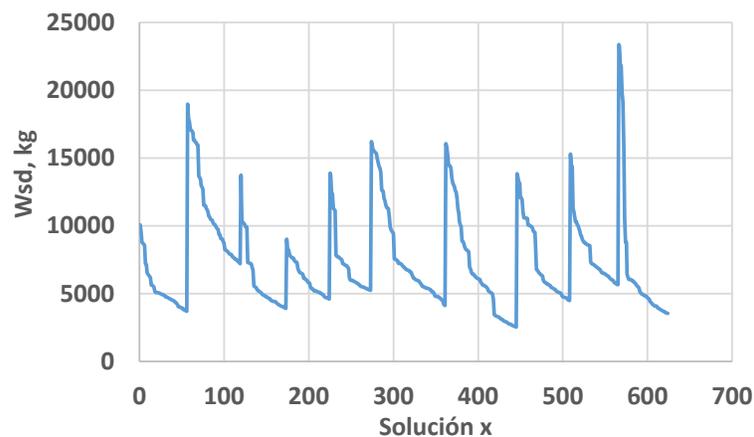


Figura 95. Trayectoria seguida por BL en la primera corrida del algoritmo.

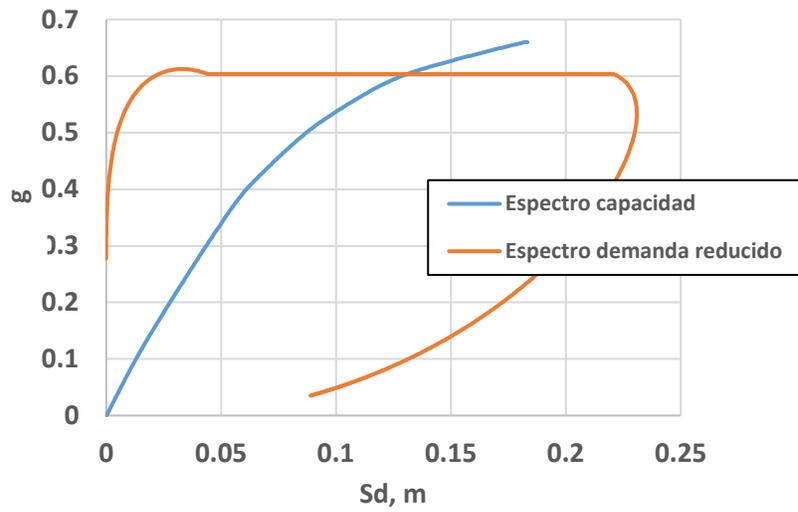
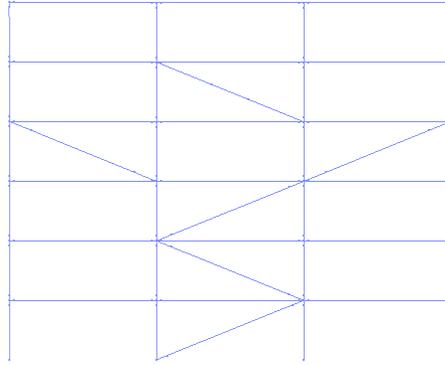
Las trayectorias seguidas por el resto de las corridas no son mostradas debido a que presentan una forma similar y no brindan información adicional. Las 5 estructuras obtenidas de cada una de las corridas se denominaron con el sufijo “BL”. Los datos de interés de cada una de las soluciones encontradas con BL se muestran en la Tabla 25.

Tabla 25. Datos de interés de las estructuras optimizadas por BL.

<b>Modelo</b>	<b><math>W_{sd}, kg</math></b>	<b><math>T, s</math></b>	<b><math>\beta_{eff}, \%</math></b>
M0	6,009	0.56	17.2
BL1	2,533	0.70	15.3
BL2	3,155	0.68	14.2
BL3	2,668	0.72	18.7
BL4	3,118	0.64	13.5
BL5	2,255	0.71	16.8

De la Tabla 25 se observa que con BL se obtienen soluciones mejores a aquellas encontradas por medio de la búsqueda aleatoria, empleando, la mejor de ellas, un valor de  $W_{sd} = 2,255$  kg de acero en el sistema disipador. Por otra parte, se observa que solo la solución BL3 presenta un amortiguamiento viscoso efectivo ( $\beta_{eff} = 18.7 \%$ ) mayor que M0 ( $\beta_{eff} = 17.2 \%$ ).

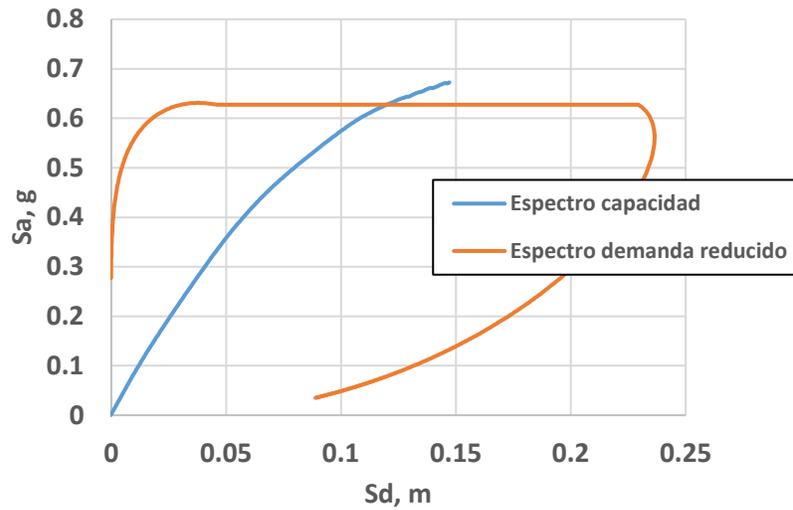
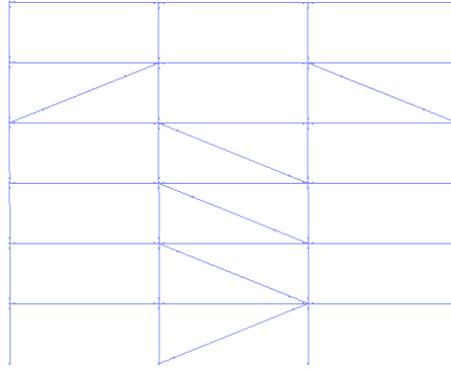
A continuación, en las Figuras 96 – 100, se muestran las estructuras obtenidas por medio de BL, con sus respectivos espectros de capacidad y los puntos de desempeño alcanzados. Obsérvese la inclinación que presentan las soluciones optimizadas por eliminar los CRP's en el último nivel, lo cual fue realizado por todas las soluciones con excepción de BL3.



Datos de BL1		
$W_{sd} =$	2,533	Kg
$T =$	0.70	s
$\beta_{eff} =$	15.3	%

Punto de desempeño de BL1		
dpi =	0.13	m
api =	0.60	g

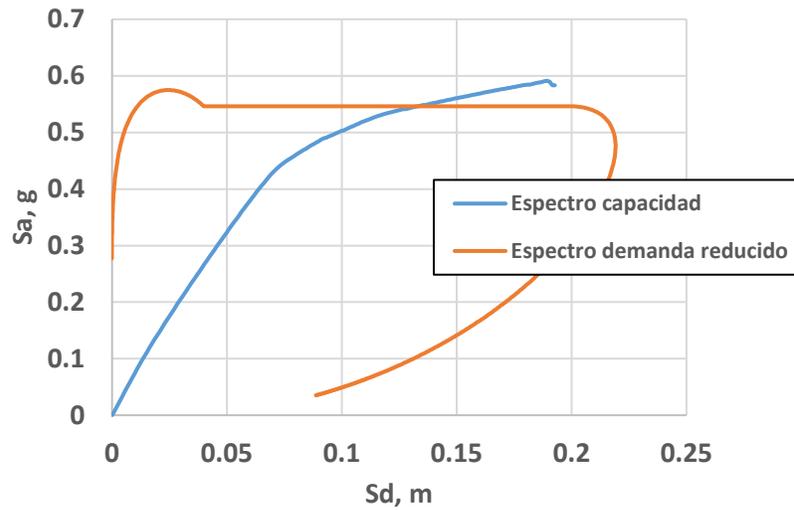
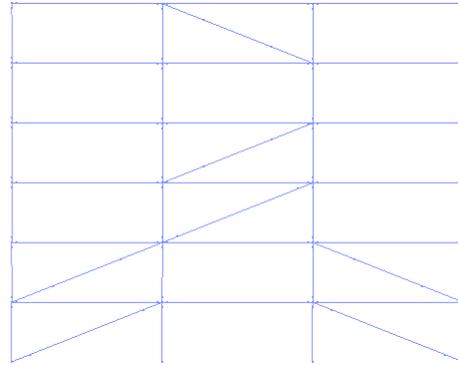
Figura 96. Solución BL1 obtenida por BL, a) estructura optimizada; b) punto de desempeño, el cual es la intersección entre el espectro de capacidad y el espectro de demanda reducido.



Datos de BL2		
$W_{sd} =$	3,155	Kg
$T =$	0.68	s
$\beta_{eff} =$	14.2	%

Punto de desempeño de BL2		
$d_{pi} =$	0.12	m
$a_{pi} =$	0.63	g

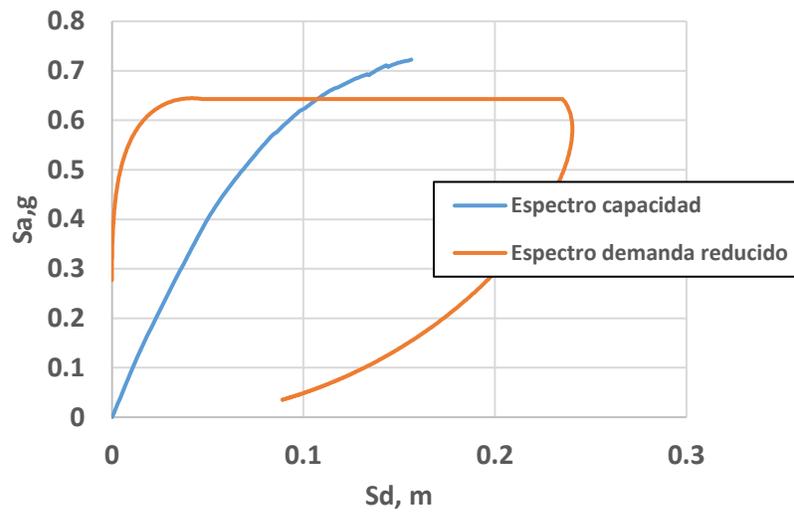
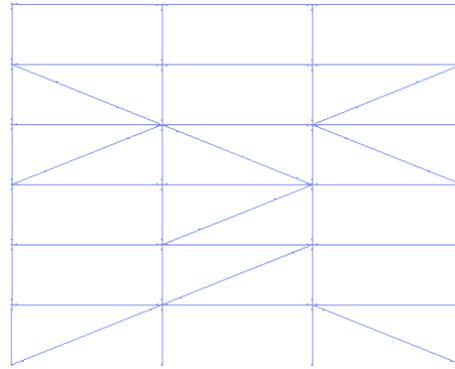
Figura 97. Solución BL2 obtenida por BL. a) estructura optimizada; b) punto de desempeño, el cual es la intersección entre el espectro de capacidad y el espectro de demanda reducido.



Datos de BL3	
$W_{sd} =$	2,668 Kg
$T =$	0.72 s
$\beta_{eff} =$	18.7 %

Punto de desempeño de BL3	
dpi =	0.13 m
api =	0.55 g

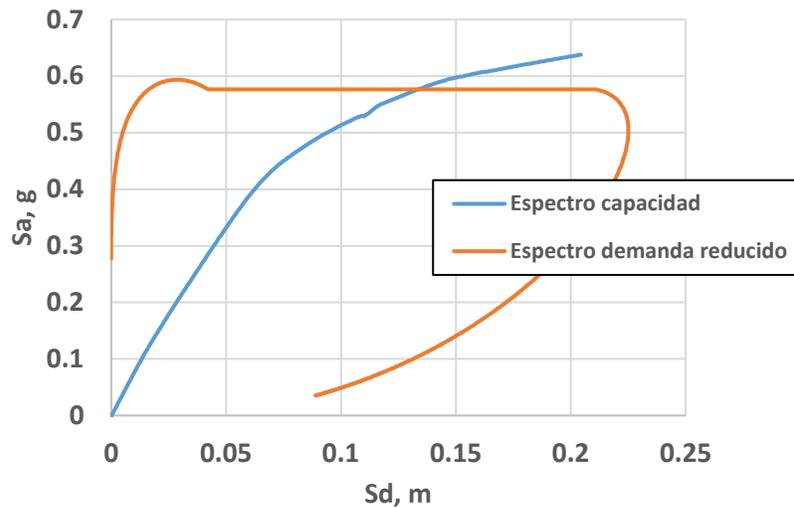
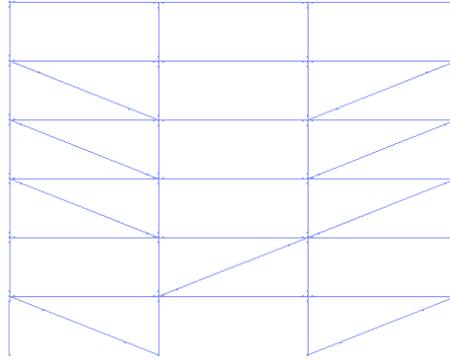
Figura 98. Solución BL3 obtenida por BL. a) estructura optimizada; b) punto de desempeño, el cual es la intersección entre el espectro de capacidad y el espectro de demanda reducido.



Datos de BL4	
$W_{sd} =$	3,118 Kg
$T =$	0.64 s
$\beta_{eff} =$	13.5 %

Punto de desempeño de BL4		
dpi =	0.11	m
api =	0.64	g

Figura 99. Solución BL4 obtenida por BL. a) estructura optimizada; b) punto de desempeño, el cual es la intersección entre el espectro de capacidad y el espectro de demanda reducido.



Datos de BL5		
$W_{sd} =$	2,255	Kg
$T =$	0.71	s
$\beta_{eff} =$	16.8	%

Punto de desempeño de BL5		
dpi =	0.13	m
api =	0.58	g

Figura 100. Solución BL5 obtenida por BL. a) estructura optimizada; b) punto de desempeño, el cual es la intersección entre el espectro de capacidad y el espectro de demanda reducido.

En las Figuras 101 y 102 se muestran graficadas las frecuencias absolutas de los valores de las relaciones de longitudes ( $\gamma$ ) y de áreas ( $\eta$ ) de los disipadores, respectivamente. Se observa que las soluciones se decantan por usar CRP's con núcleos largos (valores  $\gamma$  grandes), esto a pesar de que se ha reportado que los CRP's de núcleo corto son capaces de disipar mayores cantidades de energía. Por otra parte, se observa que solo aparecen valores altos de  $\eta$  en las soluciones obtenidas.

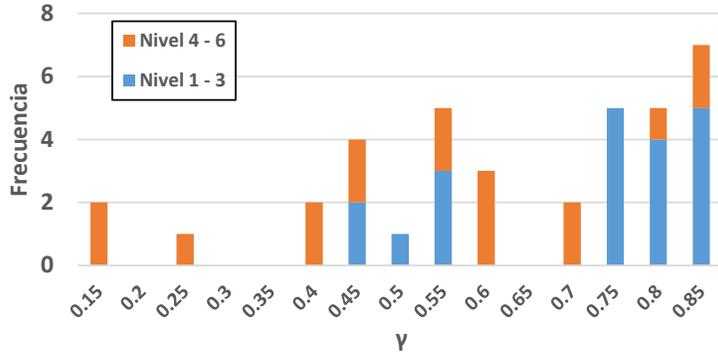


Figura 101. Frecuencias absolutas de los valores de la relación  $\gamma$ , datos obtenidos por BL.

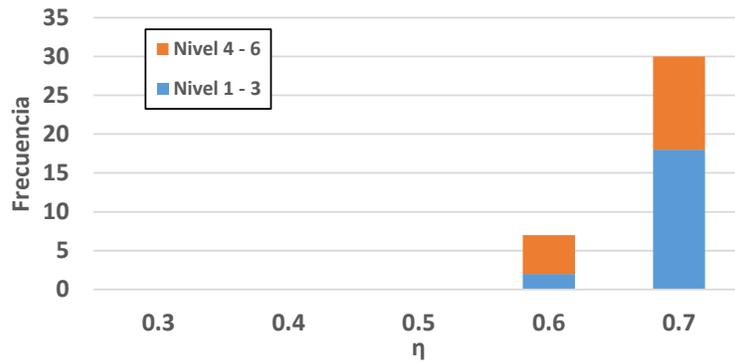


Figura 102. Frecuencias absolutas de los valores de la relación  $\eta$ , datos obtenidos por BL.

En la Figura 103 se muestran las rigideces laterales que brinda el sistema disipador en cada una de las estructuras obtenidas por BL. Con fines comparativos, se muestra la rigidez lateral de la estructura de referencia M0 por medio de una línea roja. Se observa que, a pesar de que M0 tiene una distribución lineal de las rigideces en altura, las soluciones obtenidas por BL presentan una distribución muy irregular.

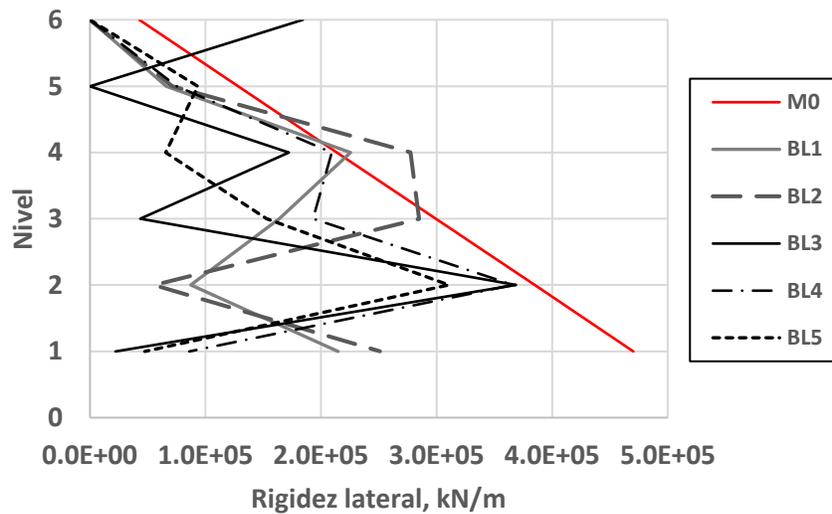


Figura 103. Rigideces laterales aportadas por el sistema disipador en M0 y las soluciones obtenidas por BL.

En la Figura 104 se muestran comparados los espectros de capacidad de la solución de referencia M0 (en línea roja) con el de las estructuras obtenidas por medio de BL. Se observa que los espectros de capacidad presentan diferencias entre sí, mientras en unos es identificable el punto de plastificación de la estructura, en otros este punto se convierte en una zona de transición suave entre el comportamiento elástico y plástico. Otro punto importante para resaltar es que, en las estructuras obtenidas por medio de BL, no es identificable el punto en el que plastifica el sistema disipador y la estructura principal permanece elástica. Tampoco se observan caídas en la resistencia lateral que indicarían la falla de alguno de los CRP's.

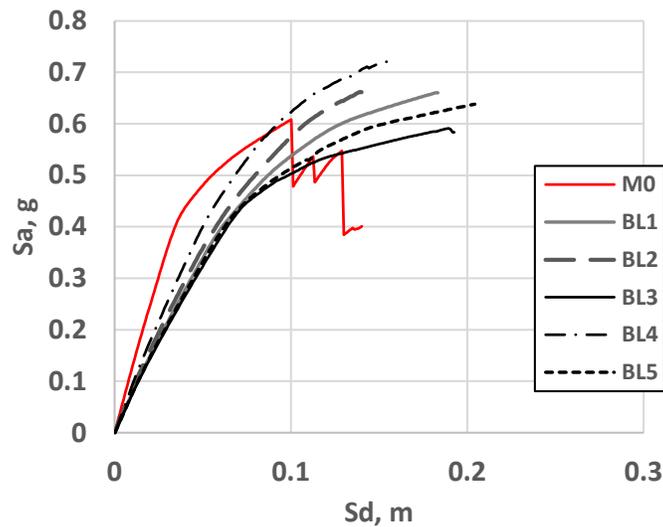


Figura 104. Espectros de capacidad de M0 y de las soluciones obtenidas con BL.

En la Figura 105 se muestran las distorsiones de entrepiso máximas registradas cuando se alcanza el punto de desempeño, de la solución de referencia M0 (en línea roja) y las obtenidas por medio de BL. El valor límite de 0.015 se encuentra marcado por la línea punteada roja. Se observa que las soluciones obtenidas por medio de BL presentan valores muy cercanos al establecido por la restricción, mientras que M0 presenta distorsiones de menor magnitud.

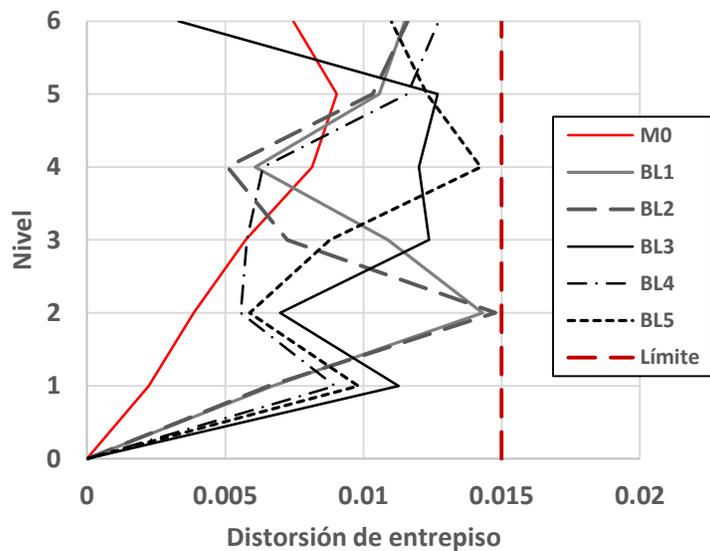


Figura 105. Distorsiones de entreciso máximas de M0 y de las soluciones obtenidas con BL.

En las Figuras 106 y 107 se muestran las gráficas de barras que representan las rotaciones plásticas, de los elementos viga y columna, respectivamente, registradas al alcanzar el punto de desempeño de las soluciones presentadas. Nuevamente, se observa que las respuestas de las soluciones obtenidas por BL se acercan mucha más a las rotaciones límite que aquellas presentadas por M0.

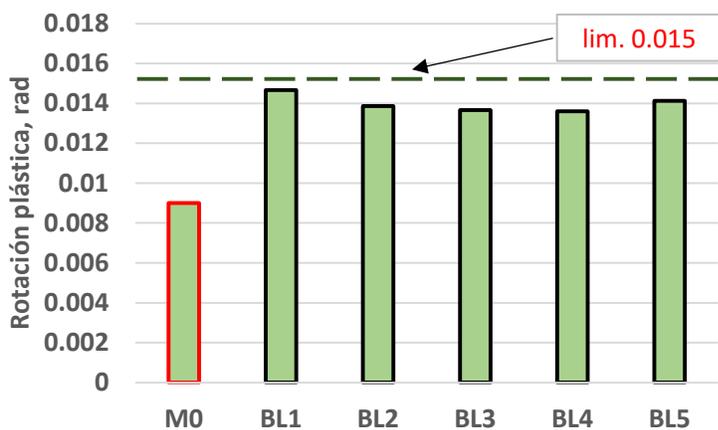


Figura 106. Rotaciones plásticas máximas en elementos viga de M0 y de las soluciones obtenidas con BL.

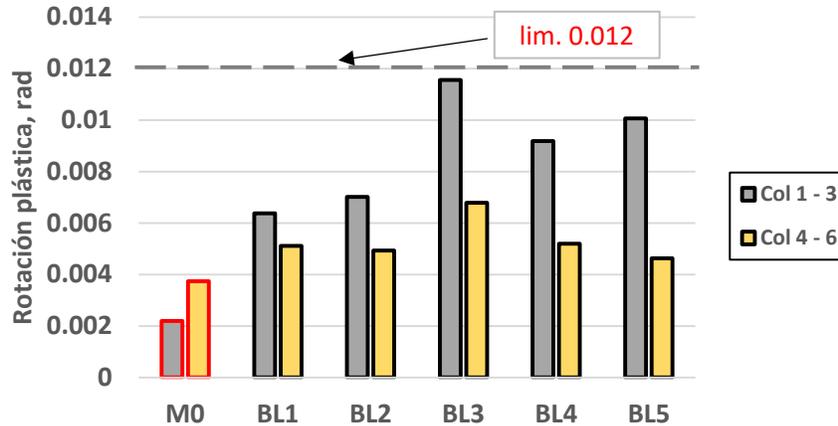


Figura 107. Rotaciones plásticas máximas en elementos columna de M0 y de las soluciones obtenidas con BL.

## 4.4. SIMULATED ANNEALING

### 4.4.1. Descripción de SA

Como se explicó anteriormente, SA es una MH que permite aceptar soluciones peores en función de la degradación de la función objetivo y de la temperatura actual del proceso. La probabilidad de aceptación de soluciones peores viene dada por la distribución de Boltzmann. En este caso, las candidatas a solución son generadas por el mismo algoritmo utilizado en BL.

En la Figura 108 se muestra el pseudo – código utilizado para SA. Se observa que se requiere de la definición de la temperatura inicial del proceso, de la temperatura final, de la longitud de la cadena de Márkov y del programa de enfriamiento. En lo referente a la temperatura final, se definió a priori como el 1% del valor de la temperatura inicial. Adicionalmente, se decidió utilizar un programa de enfriamiento con decrecimiento geométrico. La calibración de los restantes parámetros se muestra en la siguiente sección.

---

```

Iniciar
  Generar solución inicial  $\mathbf{x}$  aleatoriamente
  Determinar temperatura inicial  $T_0$ 
  Mientras  $T > T_{final}$  (Mientras no se cumpla el criterio de parada)
    Para  $i = 1$  hasta  $i_{max}$  ( $i_{max}$  es la longitud de la cadena de Márkov)
      Procedimiento Generación de  $\mathbf{x}'$  a partir de MD( $\mathbf{x}$ )
        si  $f(\mathbf{x}') < f(\mathbf{x})$  & cumple restricciones
           $\mathbf{x} = \mathbf{x}'$ 
          MD( $\mathbf{x}$ ) = MD( $\mathbf{x}'$ )
        Si no
          Rand = número aleatorio  $\in \{0,1\}$ 
          si Rand  $< e^{-\frac{[f(\mathbf{x}') - f(\mathbf{x})]}{T}}$  & cumple restricciones
             $\mathbf{x} = \mathbf{x}'$ 
            MD( $\mathbf{x}$ ) = MD( $\mathbf{x}'$ )
          Fin
        Fin
       $i = i + 1$ 
    Fin
     $T = K \cdot T$  (Al finalizar la cadena de Márkov se actualiza la temperatura)
  Fin
Regresar mejor solución encontrada
Fin

```

---

Figura 108. Pseudo – código empleado en SA.

#### 4.4.2. Calibración de SA

A continuación se describe el proceso por el cual se establecieron los valores de los demás parámetros del algoritmo, comenzando por el programa de enfriamiento. El coeficiente  $K$ , que define el decrecimiento geométrico de la temperatura, se definió tomando en cuenta el número de cadenas de Márkov que era capaz de crear. Considerando que la temperatura final ( $T_{final}$ ) es igual a un porcentaje  $\alpha$  de la temperatura inicial ( $T_0$ ), el número de cadenas de Márkov ( $\tau$ ) que permite el coeficiente  $K$  es mayor o igual a:

$$\tau \geq \text{Log}_K(\alpha) + 1 \quad (71)$$

En la Tabla 26 se muestran el número de cadenas de Márkov que generan diferentes valores de  $K$ , considerando el valor de  $\alpha = 0.01$ .

Tabla 26. Cadenas de Márkov generadas por diferentes valores del coeficiente  $K$ .

<b>Coeficiente de enfriamiento (<math>K</math>)</b>	<b>0.70</b>	<b>0.75</b>	<b>0.80</b>	<b>0.85</b>	<b>0.90</b>	<b>0.95</b>
Número de cadenas de Márkov ( $\tau$ )	14	18	22	29	45	91

Como se observa, un valor de  $K = 0.95$  requiere de 91 cadenas de Márkov para cumplir con el criterio de parada, si la longitud de las cadenas es grande, ese programa de enfriamiento podría ser demasiado lento. Asimismo, los valores de  $K$  igual a 0.70 y 0.75 requieren de un valor similar de cadenas de Márkov para alcanzar la temperatura final. Tomando en cuenta lo anterior, se decidió estudiar los resultados que se obtenían con  $K$  igual a 0.70, 0.80, 0.85 y 0.90.

Se consideró que el valor de la temperatura inicial era igual a una fracción del valor de la función objetivo para la solución inicial. El problema recae en determinar la fracción que permita un buen desempeño de la MH, si el valor es muy grande, el algoritmo degenera en una búsqueda aleatoria; en cambio, si es muy pequeño, muy pocas soluciones de peor calidad serán aceptadas. Debido a que la mayor temperatura del proceso se presenta en la primer cadena de Márkov, es lógico utilizar ésta para calibrar la tasa de aceptación y rechazo de soluciones degradadas en todo el proceso de búsqueda. En este trabajo se propone calibrar dicha tasa de la siguiente manera:

1) El valor de la función objetivo de la solución inicial ( $f(\mathbf{x})_o$ ) de la MH se estima por medio de la información obtenida a través de la BA. Siendo  $\bar{x}$  y  $s$ , la media y la desviación estándar de los valores de  $f(\mathbf{x})$  obtenidos de la BA, respectivamente, el valor de  $f(\mathbf{x})_o$  se estima igual a:

$$f(\mathbf{x})_o = \bar{x} + s \quad (72)$$

2) Para conocer cuáles son los cambios de valor de la función objetivo ( $\Delta f(\mathbf{x})$ ) que se permiten por medio de nuestro algoritmo de búsqueda y las restricciones consideradas, se corre la primer cadena de Márkov de SA considerando una temperatura muy alta, esto permite que el algoritmo degenera a una BA y que cualquier solución factible sea aceptada. Como nos interesa definir la tasa de aceptación y rechazo de las soluciones de peor calidad, se registran las degradaciones de la función objetivo ( $\Delta f(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}') - f(\mathbf{x}) > 0$ ) que se presentaron en la primera cadena de Márkov.

3) Se realiza el acumulado de los valores de  $\Delta f(\mathbf{x}) > 0$ , del valor más pequeño al más grande, hasta alcanzar el porcentaje de aceptación que nos interesa. El valor que nos permite obtener el porcentaje acumulado deseado se denomina  $\Delta$ .

4) Debido a que se genera un número aleatorio entre 0 y 1, por medio de una distribución uniforme, para definir si una solución degradada es aceptada o no, se debe de considerar un valor de la distribución de Boltzmann lo suficientemente como para garantizar una elevada probabilidad de aceptar las soluciones degradadas que se presenten. En este caso se consideró la esperanza matemática ( $E(x)$ ) más una desviación estándar ( $DE$ ) de la distribución uniforme para definir ese valor:

$$E(x) + DE = \frac{1 - 0}{2} + \sqrt{\frac{1 - 0}{12}} = 0.789 \quad (73)$$

5) La temperatura inicial estimada ( $T_o$ ) que nos permitirá obtener la tasa de aceptación y rechazo de soluciones peores, se obtiene por medio de la siguiente expresión:

$$0.789 = e^{-\frac{\Delta}{T_o}} \quad (74)$$

Despejando  $T_o$ :

$$T_o = -\frac{\Delta}{\ln(0.789)} \quad (75)$$

6) La fracción de la temperatura inicial estimada que nos permitirá obtener la tasa de aceptación y rechazo de soluciones peores se obtiene dividiendo  $T_o$  entre  $f(\mathbf{x})_o$  (obtenido en el inciso 1).

A manera de ejemplo, se aplican los pasos descritos anteriormente para determinar las fracciones de temperatura inicial que nos permitan obtener diferentes tasas de aceptación deseadas.

1) Valor estimado de la temperatura inicial ( $f(\mathbf{x})_o$ ):

$$f(\mathbf{x})_o = 14670 + 3640 = 18310$$

2) En la Figura 109 se muestra el acumulado de los valores obtenidos de  $\Delta f(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}') - f(\mathbf{x}) > 0$  al correr la primer cadena de Márkov de SA con una temperatura inicial

muy alta, como se indica, solo se consideraron valores positivos, es decir, aquellos incrementos originados por una degradación de la función objetivo.

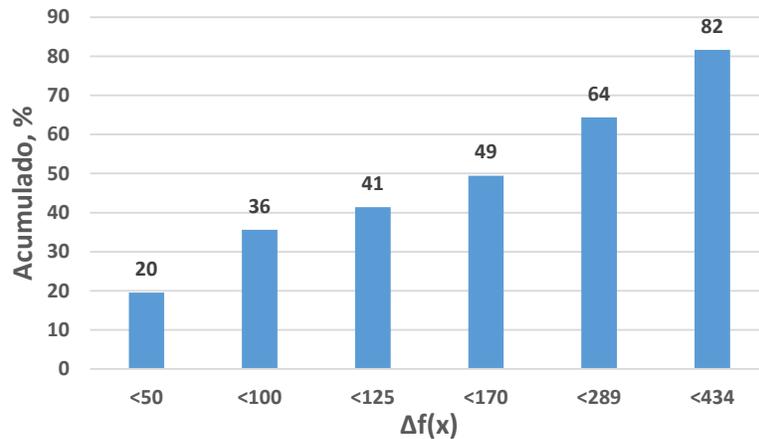


Figura 109. Porcentaje acumulado de los valores de  $\Delta f(x)$  para diferentes intervalos.

3) Para probar la validez de lo aquí propuesto, se toman diferentes valores de  $\Delta$ , los cuales se muestran en la Tabla 27.

Tabla 27. Valores de  $\Delta$  para diferentes tasas de aceptación de soluciones degradadas.

Tasa de aceptación	$\Delta$
20%	50
35%	100
50%	170
65%	289
80%	434

4), 5) y 6) En la Tabla 28 se muestran los valores de  $T_o$  y la fracción de la temperatura inicial estimada para obtener la tasa de aceptación deseada.

Tabla 28. Valores de  $\Delta$  para diferentes tasas de aceptación de soluciones degradadas.

Tasa de aceptación	$T_o$	$T_o/f(x)_o$
20%	211	0.0115
35%	422	0.023
50%	717	0.040
65%	1219	0.066
80%	1831	0.100

Para cada fracción de la temperatura inicial obtenida ( $T_o/f(\mathbf{x})_o$ ) se realizaron 6 corridas de la primer cadena de Márkov. De los datos obtenidos se contaron los incrementos de la función objetivo presentados y cuáles de esos fueron aceptados. Los resultados se muestran en la Tabla 29. Se observa que, a excepción del caso que estima un 80% de aceptación, las tasas reales presentan valores cercanos a las estimadas, con lo cual, se tiene una forma de definir los valores de las temperaturas iniciales de manera preliminar.

Tabla 29. Comparación entre las tasas de aceptación estimadas y reales obtenidas.

Tasa de aceptación estimada	Tasa de aceptación real obtenida por corrida, %						Media	D.E.
	1	2	3	4	5	6		
20%	21.9	26.3	26.3	32.7	34.1	26.3	27.9%	4.6%
35%	47.1	52.0	44.4	39.9	31.4	35.9	41.8%	7.6%
50%	46.4	46.4	55.7	44.9	51.9	53.5	49.8%	4.5%
65%	64.6	57.9	64.3	58.2	47.1	59.1	58.5%	6.4%
80%	51.9	67.3	56.7	69.3	75.2	71.6	65.3%	9.1%

En este trabajo se decidió calibrar SA considerando una tasa de aceptación en la primera cadena de Márkov de entre 50% y 65%, por lo tanto, la relación entre las temperaturas iniciales y el valor de la función objetivo de la solución inicial era igual a 0.1, 0.066 y 0.04. Adicionalmente, se tomaron tres valores como longitud de cada cadena de Márkov (LCM), los cuales eran 100, 150 y 200 soluciones revisadas por cadena. En las Figuras 110 y 111 se muestran los valores de  $W_{sd}$  y los tiempos obtenidos, respectivamente, para cada una de las combinaciones consideradas.

De la Figura 110 se puede observar que SA permite conseguir valores de  $W_{sd}$  menores a los obtenidos por BL, siendo los mejores mínimos alcanzados al utilizar coeficientes de enfriamiento  $K$  altos. Adicionalmente, se observa poca influencia de la relación entre la temperatura inicial y el valor de la función objetivo para la solución inicial ( $T_o/f(\mathbf{x})_o$ ). Por último, se obtuvieron mejores resultados al emplear una cadena de Márkov con una longitud de 200 posibles soluciones revisadas.

De la Figura 111 se observa que el tiempo que requiere el algoritmo de SA en finalizar se ve poco influenciado por la relación  $T_o/f(\mathbf{x})_o$ , teniéndose como tiempos máximos desde 6 horas hasta 12 horas por corrida, esto para un coeficiente de enfriamiento  $K = 0.9$  y una LCM de 100 y 200 posibles soluciones revisadas, respectivamente.

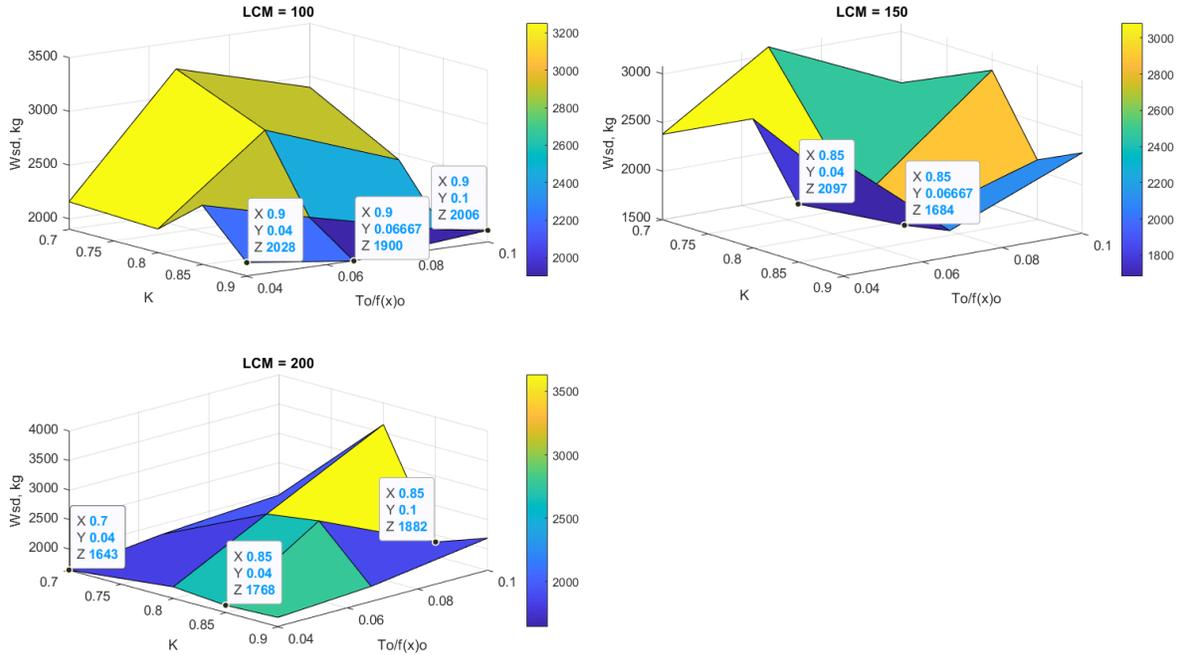


Figura 110. Valores de  $W_{sd}$  obtenidos por SA con los diferentes factores considerados.

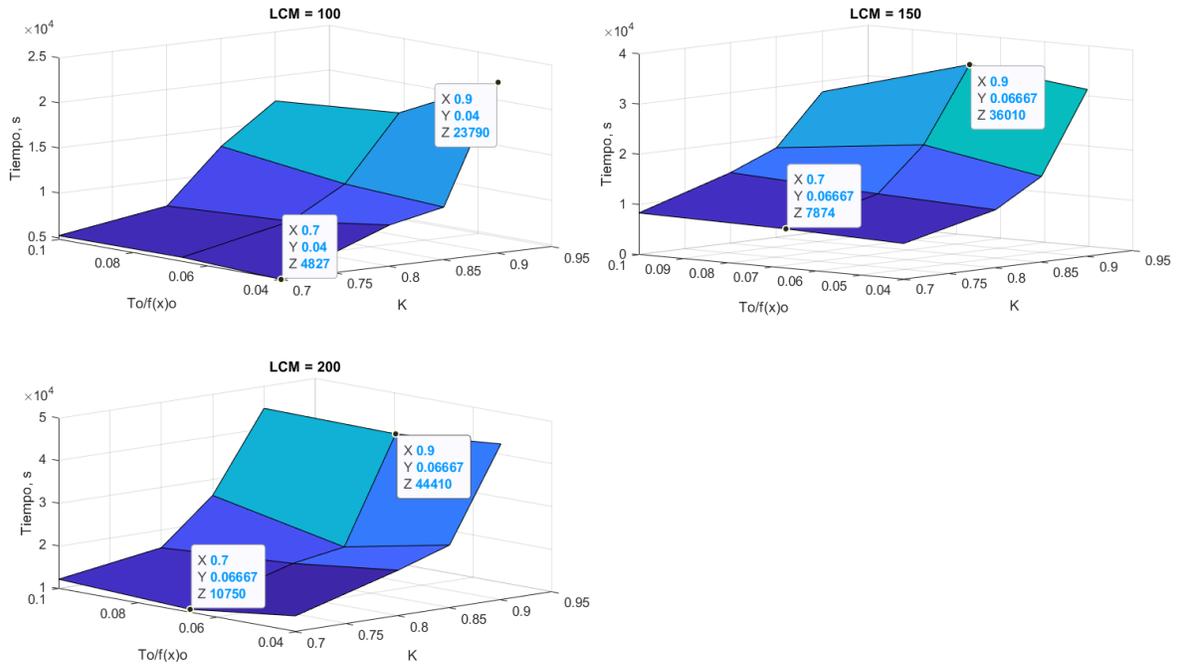


Figura 111. Tiempos obtenidos por SA con los diferentes factores considerados.

En base en lo anterior, se decidió correr SA cinco veces considerando los siguientes parámetros: LCM = 200 posibles soluciones, coeficiente de enfriamiento  $K = 0.85$  y relación  $T_o/f(x)_o = 0.04$ . Los resultados obtenidos del proceso de optimización son mostrados a continuación.

#### 4.4.3. Resultados obtenidos con SA

En la Figura 112 se muestran graficados los valores de  $W_{sd}$  obtenidos para cada solución  $x$  encontrada durante la primera corrida de SA. La gráfica da una idea de la trayectoria seguida por el algoritmo de optimización así como del número de soluciones encontradas. Se observa que con SA son encontradas cerca de 1,250 soluciones, un valor aproximadamente del doble de las encontradas por BL.

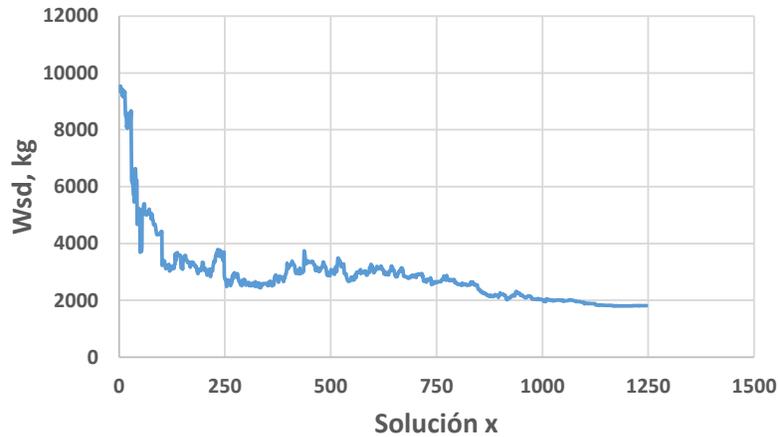
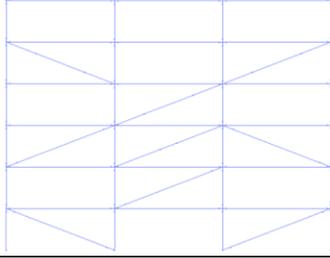


Figura 112. Trayectoria seguida por SA en la primera corrida del algoritmo.

Los datos de interés de cada una de las soluciones encontradas con SA se muestran en la Tabla 30. Con fines de notación, las soluciones obtenidas por medio de esta MH se denominaron con el sufijo “SA”. Además de la reducción de  $W_{sd}$  con respecto a BL (obsérvese Tabla 25), fue posible obtener diseños con un mayor porcentaje de amortiguamiento efectivo ( $\beta_{eff}$ ) al emplear SA. En la Figura 113, se muestran las estructuras obtenidas por medio de esta MH, con los datos de sus respectivos puntos de desempeño alcanzados. Nuevamente, se repite la tendencia a suprimir el CRP del último nivel, siendo excepciones los casos SA3 y SA5.

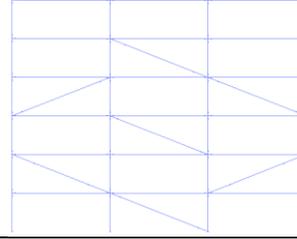
Tabla 30. Datos de interés de las estructuras optimizadas por SA.

Modelo	$W_{sd}, kg$	$T, s$	$\beta_{eff}, \%$
M0	6,009	0.56	17.2
SA1	1,902	0.75	20.0
SA2	1,697	0.76	20.2
SA3	2,449	0.72	15.8
SA4	2,501	0.72	16.4
SA5	2,093	0.75	20.1



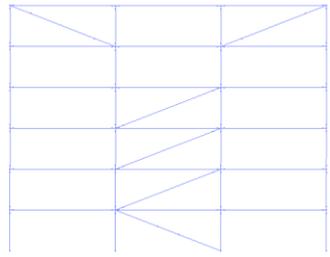
**Datos de SA1**

$d_{pi} =$	0.16	m
$a_{pi} =$	0.52	g
$W_{sd} =$	1,902	Kg
$T =$	0.75	s
$\beta_{eff} =$	20.0	%



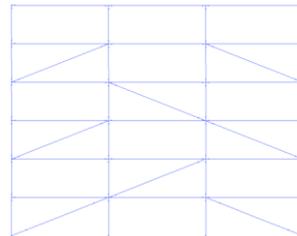
**Datos de SA2**

$d_{pi} =$	0.17	m
$a_{pi} =$	0.53	g
$W_{sd} =$	1,697	Kg
$T =$	0.76	s
$\beta_{eff} =$	20.2	%



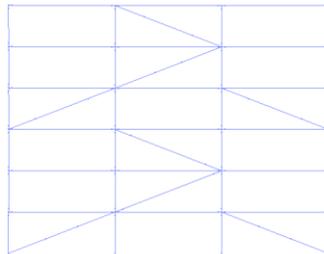
**Datos de SA3**

$d_{pi} =$	0.13	m
$a_{pi} =$	0.60	g
$W_{sd} =$	2,449	Kg
$T =$	0.72	s
$\beta_{eff} =$	15.8	%



**Datos de SA4**

$d_{pi} =$	0.14	m
$a_{pi} =$	0.59	g
$W_{sd} =$	2,501	Kg
$T =$	0.72	s
$\beta_{eff} =$	16.4	%



**Datos de SA5**

$d_{pi} =$	0.15	m
$a_{pi} =$	0.53	g
$W_{sd} =$	2,093	Kg
$T =$	0.75	s
$\beta_{eff} =$	20.1	%

Figura 113. Soluciones obtenidas por medio de SA.

En las Figuras 114 y 115 se muestran graficadas las frecuencias absolutas de los valores de las relaciones de longitudes ( $\gamma$ ) y de áreas ( $\eta$ ) de los disipadores empleados en los diseños obtenidos por SA, respectivamente. Se observa que las soluciones tienden a utilizar disipadores con núcleos largos, sin embargo, y a diferencia de los resultados obtenidos por BL, se presentan casos en que se utilizan CRP's de núcleos cortos en los primeros tres niveles de la estructura. Adicionalmente, se repite la tendencia a emplear valores de  $\eta$  igual a 0.6 y 0.7, aunque hay casos aislados de disipadores con  $\eta$  igual a 0.3 y 0.5.

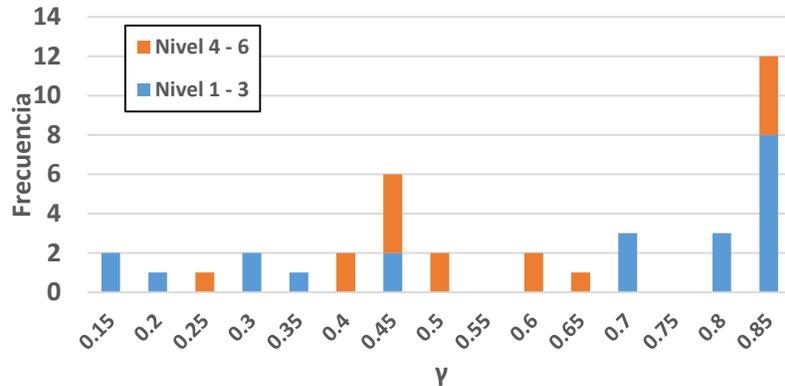


Figura 114. Frecuencias absolutas de los valores de la relación  $\gamma$ , datos obtenidos por SA.

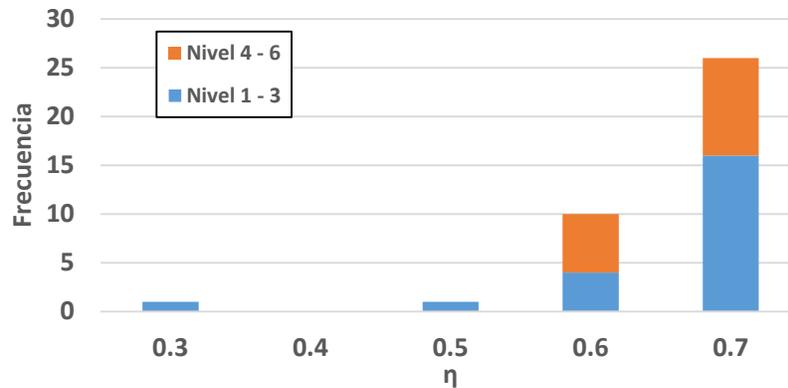


Figura 115. Frecuencias absolutas de los valores de la relación  $\eta$ , datos obtenidos por SA.

En la Figura 116 se muestran las rigideces laterales que brinda el sistema disipador en cada una de las estructuras obtenidas por SA. Con fines comparativos, se muestra la rigidez lateral de la estructura de referencia M0 por medio de una línea roja. De manera similar a lo observado en las soluciones obtenidas por BL, los diseños óptimos encontrados por SA presentan una distribución muy irregular de la rigidez lateral en altura. Adicionalmente, cabe señalar que estos modelos muestran una rigidez lateral menor a las que presentan los modelos obtenidos por BL (observar Figura 103).

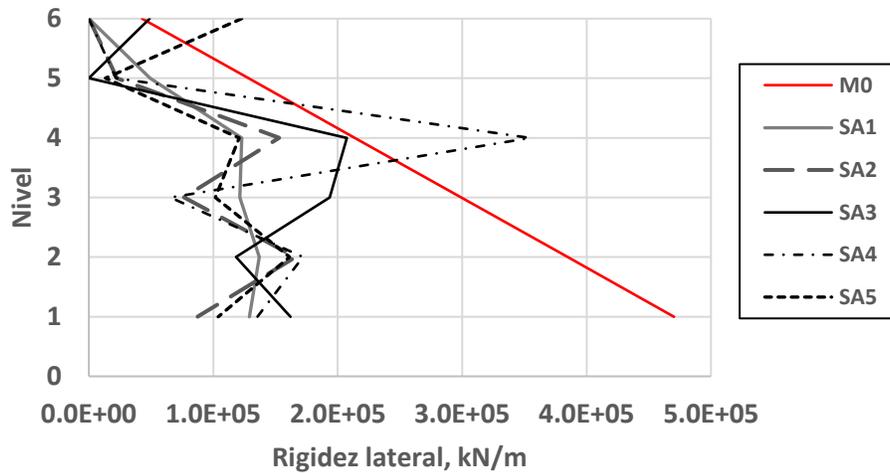


Figura 116. Rigideces laterales aportadas por el sistema disipador en M0 y las soluciones obtenidas por SA.

En la Figura 117 se muestran comparados los espectros de capacidad de la solución de referencia M0 con el de las estructuras obtenidas por medio de SA. En esta ocasión se observan mayores similitudes entre los espectros de capacidad, pudiendo ser todos agrupados en dos formas generales, una bilineal y otra con una zona de transición suave entre el intervalo elástico y plástico.

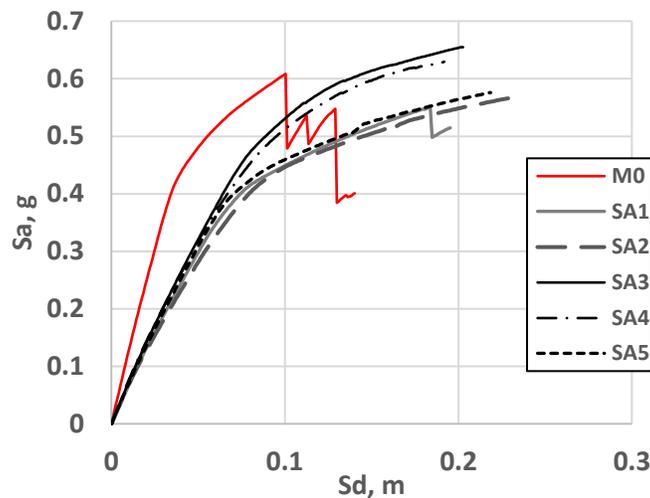


Figura 117. Espectros de capacidad de M0 y de las soluciones obtenidas con SA.

En la Figura 118 se muestran las distorsiones de entrepiso máximas registradas cuando se alcanza el punto de desempeño, de la solución de referencia M0 y las obtenidas por medio de SA. El valor límite de 0.015 se encuentra marcado por la línea punteada roja. Se observa que las soluciones obtenidas por medio de SA presentan valores muy cercanos al establecido por la restricción, mientras que M0 presenta distorsiones de menor magnitud.

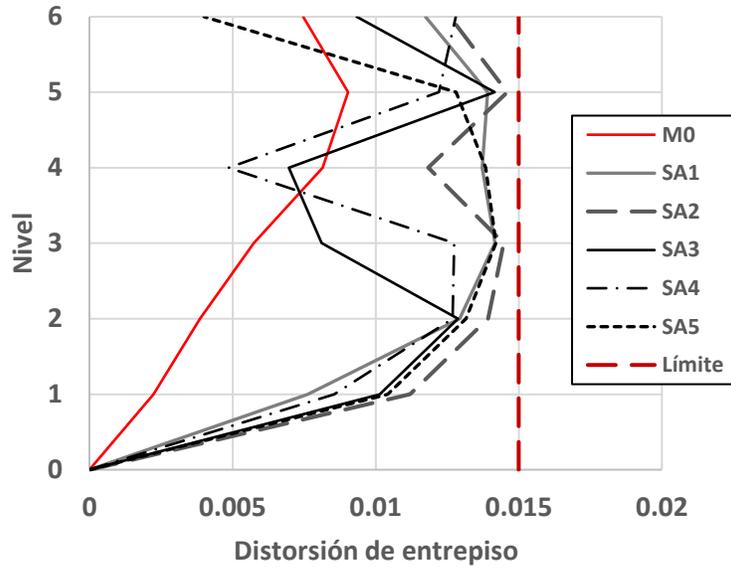


Figura 118. Distorsiones de entrepiso máximas de M0 y de las soluciones obtenidas con SA.

En las Figuras 119 y 120 se muestran las gráficas de barras que representan las rotaciones plásticas, de los elementos viga y columna, respectivamente, registradas al alcanzar el punto de desempeño de las soluciones presentadas. Nuevamente, se observa que las respuestas de las soluciones obtenidas por SA se acercan mucho a las rotaciones límite establecidas.

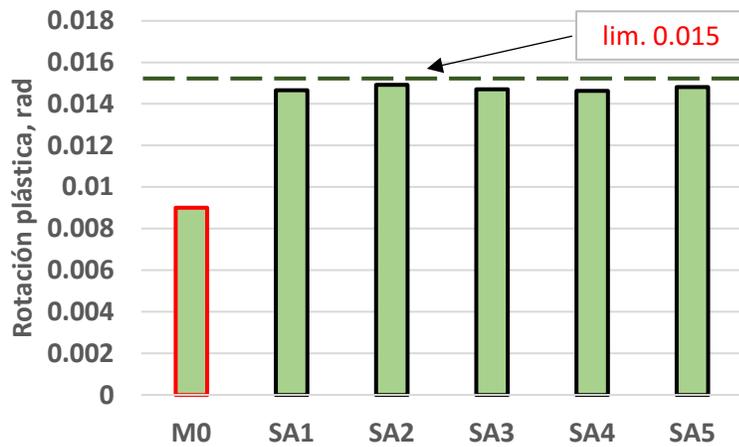


Figura 119. Rotaciones plásticas máximas en elementos viga de M0 y de las soluciones obtenidas con SA.

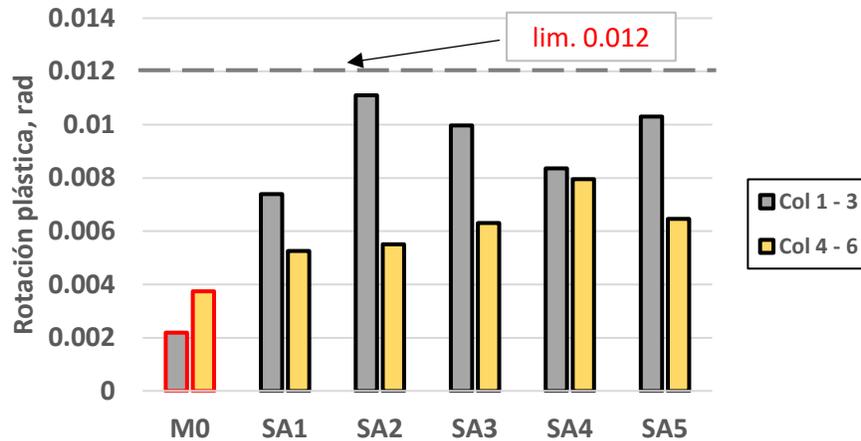


Figura 120. Rotaciones plásticas máximas en elementos columna de M0 y de las soluciones obtenidas con SA.

## 4.5. SIMULATED ANNEALING TOMANDO A M0 COMO SOLUCIÓN INICIAL (SAM)

### 4.5.1. Descripción de SAM

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al correr SA tomando a M0 como solución inicial. Se decidió realizar este proceso debido a que se sabe que los algoritmos de búsqueda brindan mejores resultados cuando la solución inicial presenta una calidad alta<sup>[48]</sup>. Por fines prácticos, este algoritmo se denominó con las siglas SAM. El algoritmo de SAM es idéntico al mostrado en la Figura 108. Cabe recalcar que M0 emplea valores de  $\eta = 0.35$  en todos sus disipadores, este valor no fue considerado hasta ahora en el proceso de optimización, sin embargo, debido a que es un punto intermedio entre dos valores de  $\eta$  sí considerados (0.3 y 0.4), los resultados obtenidos aún pueden considerarse como válidos.

### 4.5.2. Calibración de SAM

A diferencia de SA, en este algoritmo se conoce el valor de la función objetivo de la solución inicial ( $f(x)_o = 6,009$  kg de acero). En base a esto, se decidió incrementar la relación entre la temperatura inicial ( $T_0$ ) y  $f(x)_o$ . Para evitar perder las características que le brindan calidad a M0, se definió aceptar principalmente incrementos de la función objetivo  $\Delta \leq 100$ , por lo tanto, la temperatura inicial se estima igual:

$$T_o = -\frac{\Delta}{\text{Ln}(0.789)} = -\frac{100}{\text{Ln}(0.789)} = 422$$

La relación entre  $T_o$  y  $f(x)_o$  empleada en SAM es igual a:

$$\frac{T_o}{f(x)_o} = \frac{422}{6009} \cong \frac{1}{15}$$

Adicionalmente, se decidió reducir la longitud de las cadenas de Márkov, empleándose un valor de LCM = 50. El resto de los parámetros se mantuvieron inalterados, es decir,  $K = 0.85$  y  $T_{final} = 0.01 \cdot T_o$ .

### 4.5.3. Resultados obtenidos con SAM

En la Figura 121 se muestran los valores de  $W_{sd}$  obtenidos para cada solución  $x$  encontrada durante la primera corrida de SAM. La gráfica da una idea de la trayectoria seguida por el algoritmo de optimización, así como el número de soluciones encontradas. Se observa que con SAM cerca de 300 soluciones son encontradas, es decir, un valor considerablemente menor al número de soluciones halladas por SA en su primera corrida.

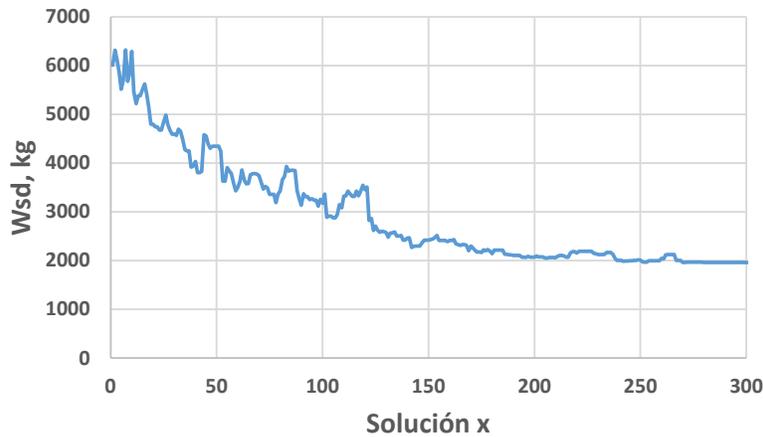
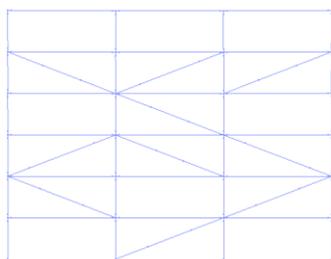


Figura 121. Trayectoria seguida por SAM en la primera corrida del algoritmo.

Los datos de interés de cada una de las soluciones encontradas con SAM se muestran en la Tabla 31. Con fines de notación, las soluciones obtenidas por medio de este algoritmo se denominaron con el sufijo “SAM”. Se observa que las soluciones presentaron valores de  $W_{sd}$  en el entorno de 2,000 kg de acero, además de amortiguamientos efectivos ( $\beta_{eff}$ ) superiores al 20%. En la Figura 122, se muestran las estructuras obtenidas con los datos de sus respectivos puntos de desempeño alcanzados. Nuevamente, se repite la tendencia de suprimir el CRP del último nivel, siendo SAM5 la única excepción.

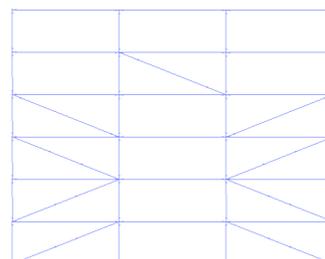
Tabla 31. Datos de interés de las estructuras optimizadas por SAM.

Modelo	$W_{sd}, kg$	$T, s$	$\beta_{eff}, \%$
M0	6,009	0.56	17.2
SAM1	1,959	0.75	21.8
SAM2	1,837	0.75	21.9
SAM3	2,108	0.74	21.7
SAM4	1,874	0.75	20.9
SAM5	2,008	0.75	20.2



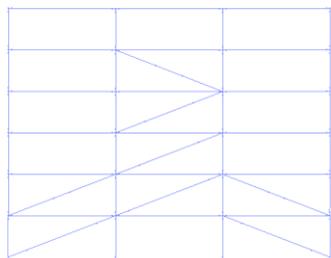
**Datos de SAM1**

dpi =	0.16	m
api =	0.50	g
$W_{sd} =$	1,959	Kg
$T =$	0.75	s
$\beta_{eff} =$	21.8	%



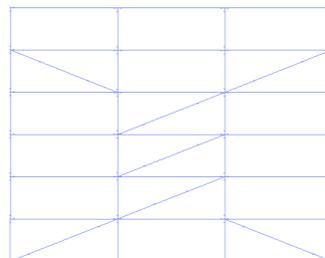
**Datos de SAM2**

dpi =	0.17	m
api =	0.51	g
$W_{sd} =$	1,837	Kg
$T =$	0.75	s
$\beta_{eff} =$	21.9	%



**Datos de SAM3**

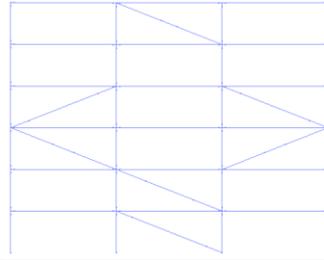
dpi =	0.15	m
api =	0.51	g
$W_{sd} =$	2,108	Kg
$T =$	0.74	s
$\beta_{eff} =$	21.7	%



**Datos de SAM4**

dpi =	0.16	m
api =	0.52	g
$W_{sd} =$	1,874	Kg
$T =$	0.75	s
$\beta_{eff} =$	20.9	%

Figura 122. Soluciones obtenidas por medio de SAM.



**Datos de SAM5**

$d_{pi}$	=	0.16	m
$a_{pi}$	=	0.52	g
$W_{sd}$	=	2,008	Kg
$T$	=	0.75	s
$\beta_{eff}$	=	20.2	%

Figura 119. Soluciones obtenidas por medio de SAM, continuación.

En las Figuras 123 y 124 se muestran graficadas las frecuencias absolutas de los valores de las relaciones de longitudes ( $\gamma$ ) y de áreas ( $\eta$ ) de los disipadores empleados en los diseños obtenidos por SAM, respectivamente. A diferencia de lo observado en BL y SA, las soluciones obtenidas utilizaron con mayor frecuencia disipadores de núcleo corto. De manera adicional, los disipadores con valores de  $\eta$  igual a 0.6 y 0.7 siguen siendo mayoría, aunque se presentan casos en que se emplean valores de  $\eta$  igual a 0.35, 0.4 y 0.5.

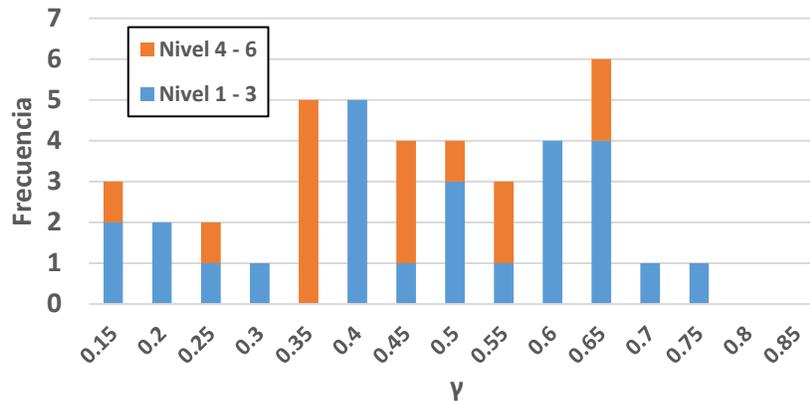


Figura 123. Frecuencias absolutas de los valores de la relación  $\gamma$ , datos obtenidos por SAM.

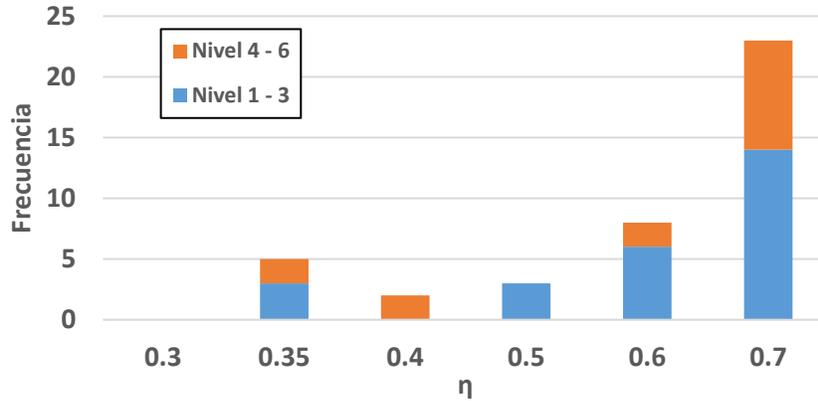


Figura 124. Frecuencias absolutas de los valores de la relación  $\eta$ , datos obtenidos por SAM.

En la Figura 125 se muestran las rigideces laterales que brinda el sistema disipador en cada una de las estructuras obtenidas por SAM. Con fines comparativos, se muestra la rigidez lateral de la estructura de referencia M0. Nuevamente, se observa una distribución irregular de la rigidez lateral en altura, presentando éstas una magnitud similar a las soluciones obtenidas por SA.

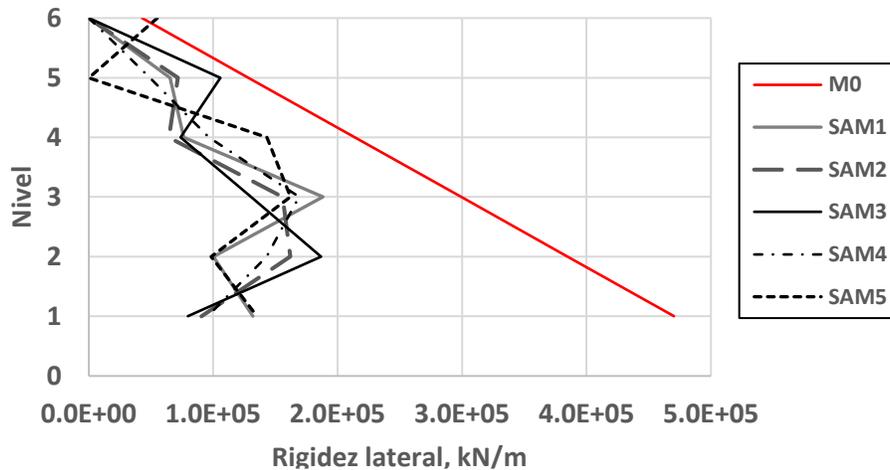


Figura 125. Rigideces laterales aportadas por el sistema disipador en M0 y las soluciones obtenidas por SAM.

En la Figura 126 se muestran comparados los espectros de capacidad de la solución de referencia M0 con el de las estructuras obtenidas por medio de SAM. Se observa que todas las curvas de capacidad obtenidas son prácticamente idénticas, teniendo éstas una caída en la resistencia lateral al final del espectro.

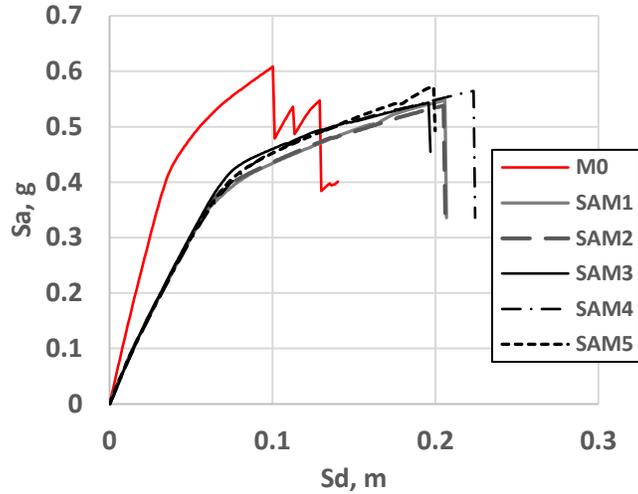


Figura 126. Espectros de capacidad de M0 y de las soluciones obtenidas con SAM.

En la Figura 127 se muestran las distorsiones de entrepiso máximas registradas cuando se alcanza el punto de desempeño, de la solución de referencia M0 y las obtenidas por medio de SAM. El valor límite de 0.015 se encuentra marcado por la línea punteada roja. De manera similar a lo ocurrido en SA, las distorsiones de entrepiso presentan valores muy cercanos al establecido por la restricción.

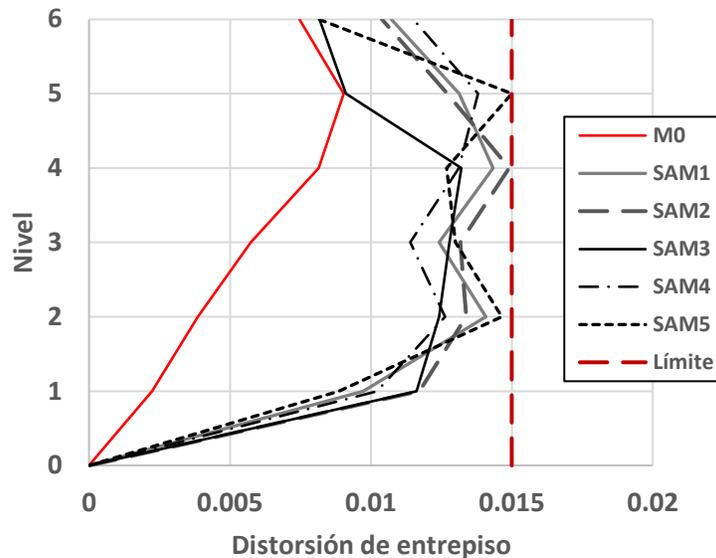


Figura 127. Distorsiones de entrepiso máximas de M0 y de las soluciones obtenidas con SAM.

En las Figuras 128 y 129 se muestran las gráficas de barras que representan las rotaciones plásticas, de los elementos viga y columna, respectivamente, registradas al alcanzar el punto de desempeño de las soluciones presentadas. Nuevamente, se observa que las respuestas de las soluciones obtenidas por SAM se acercan considerablemente a las rotaciones límite establecidas.

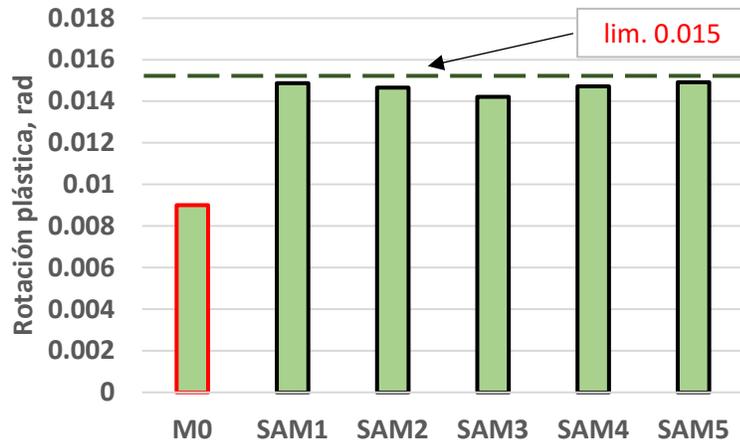


Figura 128. Rotaciones plásticas máximas en elementos viga de M0 y de las soluciones obtenidas con SAM.

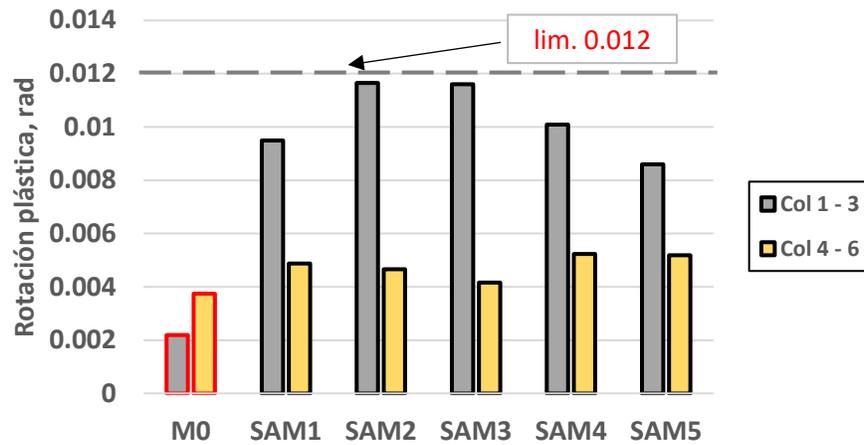


Figura 129. Rotaciones plásticas máximas en elementos columna de M0 y de las soluciones obtenidas con SAM.

## CAPÍTULO 5

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 5.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentarán y discutirán los resultados más relevantes obtenidos durante el trabajo de investigación. En primera instancia, se comentarán los desempeños obtenidos en cada uno de los algoritmos de optimización, esto a través de la cantidad media de material empleado en las soluciones óptimas y del tiempo requerido para obtenerlas. Posteriormente se discutirán a fondo las características que presentan las mejores soluciones encontradas por cada algoritmo, buscando identificar las razones por las cuales estos diseños muestran tan altos desempeños. Entre los aspectos que se tratan, se encuentran las relaciones de longitud ( $\gamma$ ) y de áreas ( $\eta$ ) que presentan los CRP's, los periodos fundamentales de los diseños óptimos, los perfiles de rigideces laterales brindadas por los disipadores, la respuesta de los CRP's, entre otros.

#### 5.2. DESEMPEÑO DE LOS ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN

A continuación se analizará el desempeño de los algoritmos de búsqueda utilizados a través de los valores de  $W_{sd}$  obtenidos y del tiempo requerido para encontrar las soluciones óptimas. De los datos de todas las corridas se obtienen sus medias y sus desviaciones estándar.

### 5.2.1. Valores de $W_{sd}$ obtenidos

Los valores obtenidos de  $W_{sd}$  por medio de los tres algoritmos de búsqueda empleados se muestran en la Tabla 32, los datos de las medias y desviaciones estándar, de las cinco corridas, también son mostrados. Se observa que el algoritmo de BL obtuvo los peores resultados al tener un valor medio de  $W_{sd}$  igual a 2,746 kg de acero. Por debajo se encuentran los algoritmos de SA y SAM, brindando valores de  $W_{sd}$  igual a 2,129 y 1,957 kg de acero, respectivamente. Recordando que la solución de referencia M0 requirió 6,009 kg de acero en la estructura disipadora, la media de las soluciones encontradas por SA y SAM representan una disminución del material empleado del 64.6% y 67.4%, respectivamente. La menor desviación estándar fue obtenida por SAM, con un valor de 108 kg de acero, debido probablemente a que todas sus corridas emplearon la misma solución inicial.

Tabla 32. Datos del desempeño de los algoritmos en función de los valores de  $W_{sd}$  obtenidos.

Algoritmo	Corrida ( $W_{sd}$ , kg)					Media	D.E.
	1	2	3	4	5		
BL	2533	3155	2668	3118	2255	2746	387
SA	1902	1697	2449	2501	2093	2129	347
SAM	1959	1837	2108	1874	2008	1957	108

### 5.2.2. Tiempos de ejecución

Los tiempos, en segundos, requeridos para obtener las soluciones óptimas en cada corrida se muestran en la Tabla 33, de igual manera, se muestran los tiempos medios y su desviación estándar. Todos los algoritmos fueron ejecutados en la misma laptop con procesador AMD® A8 – 5545M de 4 núcleos y 1.7 GHz, con 8 GB de RAM (disculpen ustedes mi pobreza). Se observa que SA fue el algoritmo que requirió más tiempo para encontrar sus soluciones óptimas, siendo éste aproximadamente tres veces más lento que el resto de los algoritmos. De manera adicional, SAM fue el algoritmo de búsqueda más rápido, requiriendo en promedio 8,158 segundos por corrida. Debido a que SAM también presentó los menores valores de  $W_{sd}$ , se considera que ese fue el algoritmo que obtuvo el mejor desempeño bajo ambas métricas.

Tabla 33. Datos del desempeño de los algoritmos en función del tiempo de ejecución.

Algoritmo	Corrida (Tiempo, s)					Media	D.E.
	1	2	3	4	5		
BL	10822	11074	10532	11941	11801	11234	614
SA	31647	30659	23875	25065	33183	28886	4152
SAM	7710	8596	8351	7932	8202	8158	348

### 5.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS CRP'S EMPLEADOS EN LAS SOLUCIONES ÓPTIMAS

A continuación se discuten las frecuencias con las que aparecieron los diferentes valores de las relaciones  $\eta$  y  $\gamma$  considerados. Debido a que los algoritmos SA y SAM brindaron valores óptimos de  $W_{sd}$  similares, solo los resultados provenientes de esos algoritmos son considerados en la siguiente discusión.

#### 5.3.1. Sobre los valores de $\eta$

En la Figura 130 se muestran las frecuencias absolutas de los valores de la relación de áreas  $\eta$ , que presentaron las soluciones óptima obtenidas por SA y SAM.

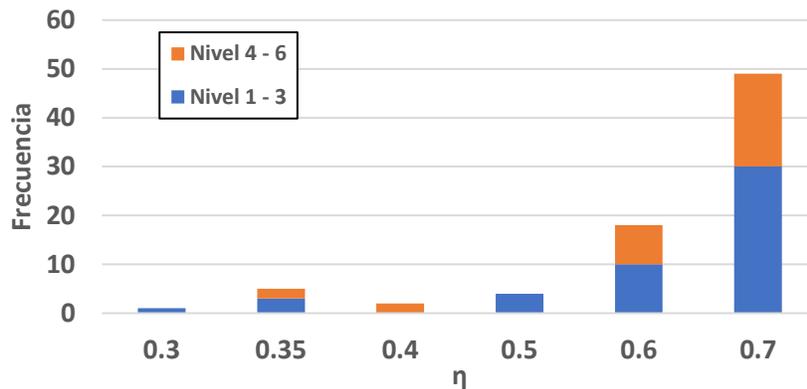


Figura 130. Frecuencias absolutas de los valores de la relación  $\eta$ , datos obtenidos por SA y SAM.

Se observa una clara inclinación de las soluciones óptimas por emplear disipadores con valores de  $\eta$  altos, principalmente de 0.6 y 0.7, esto se explica por la influencia que tiene ese parámetro en el material requerido por los disipadores. La ecuación (76) define la cantidad de acero empleado en un solo disipador, al encontrarse  $\eta$  en el denominador, resulta lógica la tendencia de las soluciones óptimas por emplear el valor más alto posible en dicha variable de decisión.

$$W_{sd} = \gamma_s \cdot L_w \cdot A_{ci} \left[ \gamma + \frac{1 - \gamma}{\eta} \right] \quad (76)$$

#### 5.3.2. Sobre los valores de $\gamma$

En la Figura 131 se muestran las frecuencias absolutas de los valores de la relación de longitudes  $\gamma$ , que presentaron los disipadores de las soluciones óptimas obtenidas por SA

y SAM. En este caso resulta más complicado hallar alguna tendencia en las longitudes del núcleo. Se observa cierta disposición a emplear un valor de  $\gamma = 0.85$ , sin embargo, los valores de  $\gamma$  entre 0.35 y 0.65 también presentan frecuencias elevadas, principalmente en los niveles superiores de la estructura. Lo observado en estos datos contradice la tendencia mostrada por BL y SA de emplear CRP's con valores altos de  $\gamma$ . Atendiendo a lo mostrado en las Figuras 114 y 123, se identifica que una parte importante de los valores de  $\gamma \leq 0.8$  proceden de las soluciones óptimas encontradas por SAM. Este aporte se debe a que SAM utilizó un solución inicial que empleaba en todos sus disipadores una relación  $\gamma = 0.2$ , con lo cual, cabe la posibilidad de que el algoritmo hubiera continuado incrementando el valor de  $\gamma$  si se le hubiera permitido generar más soluciones en sus cadena de Márkov. Esta hipótesis fue puesta a prueba realizando un pequeño número de corridas del SAM con LCM = 200 soluciones generadas, observándose que se mantiene la tendencia por utilizar valores altos de las relaciones de  $\gamma$  y  $\eta$ .

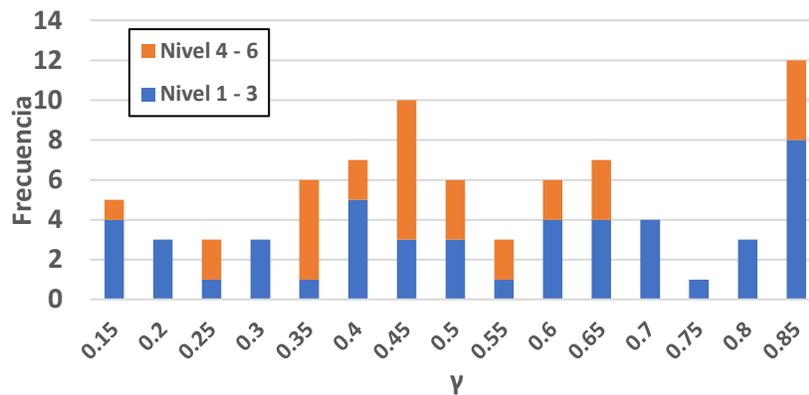


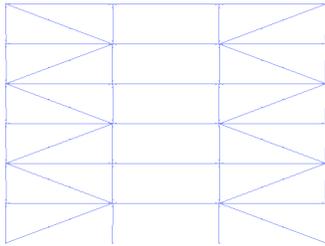
Figura 131. Frecuencias absolutas de los valores de la relación  $\gamma$ , datos obtenidos por SA y SAM.

Cabe recordar que los CRP's con núcleos cortos presentan una mayor rigidez que aquellos con núcleos largos, por lo tanto, las estructuras que empleaban los primeros requerían de altas demandas para desarrollar desplazamientos pequeños. Durante los análisis se observó que la baja ductilidad de las estructuras con CRP's cortos provocaba el fallo de los elementos de la estructura primaria antes de que los CRP's comenzaran a plastificar. Lo anterior puede ser una de las causas que incentivaban a las soluciones óptimas de BL y SA a usar CRP's de núcleos largos, sin embargo, esto no puede ser confirmado por medio de los datos recabados en este trabajo.

## 5.4. CARACTERÍSTICAS DE LAS ESTRUCTURAS DISIPADORAS DE LAS SOLUCIONES ÓPTIMAS

### 5.4.1. Número y distribución de los CRP's de las soluciones óptimas

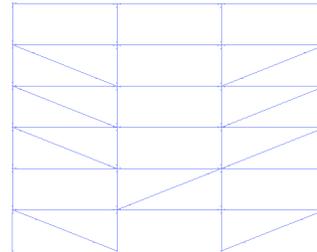
En la Figura 132 se muestran los diseños más económicos de las estructuras disipadoras encontrados por medio de los algoritmos de búsqueda, adicionalmente, se muestra el diseño obtenido por el método de Guerrero et al.<sup>[22]</sup>.



**Método de Guerrero et al.<sup>[22]</sup> (M0)**

#### Datos del modelo M0

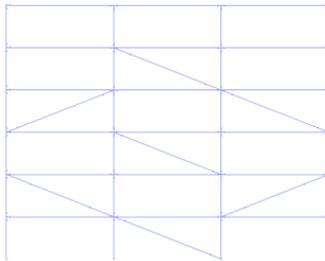
dpi =	0.08	m
api =	0.55	g
$W_{sd}$ =	6,009	Kg
$T$ =	0.56	s
$\beta_{eff}$ =	17.2	%



**Búsqueda Local (BL5)**

#### Datos del modelo BL5

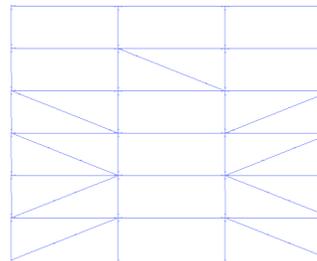
dpi =	0.13	m
api =	0.58	g
$W_{sd}$ =	2,255	Kg
$T$ =	0.71	s
$\beta_{eff}$ =	16.8	%



**Simulated Annealing (SA2)**

#### Datos del modelo SA2

dpi =	0.17	m
api =	0.53	g
$W_{sd}$ =	1,697	Kg
$T$ =	0.76	s
$\beta_{eff}$ =	20.2	%



**SA iniciando en M0 (SAM2)**

#### Datos del modelo SAM2

dpi =	0.17	m
api =	0.51	g
$W_{sd}$ =	1,837	Kg
$T$ =	0.75	s
$\beta_{eff}$ =	21.9	%

Figura 132. Diseños de la estructura disipadora más relevantes obtenidos en este trabajo.

Se observa que existen múltiples configuraciones que permiten cumplir con los requisitos de desempeño exigidos, empleándose desde 7 hasta 12 disipadores en estos diseños. Un aspecto remarcable es la tendencia de los algoritmos de optimización por suprimir los CRP's de los últimos niveles. Es importante señalar que los diseños obtenidos por medio de los métodos de optimización presentan la característica de utilizar un único CRP's en, al menos, uno de sus niveles. En la práctica, esto provocaría que los diseños sean considerados como deficientes ya que presentan una baja redundancia en los niveles con un solo disipador.

#### 5.4.2. Rigideces laterales de las soluciones óptimas

En busca de la simplificación, en la Figura 133 se presentan únicamente los perfiles de rigideces laterales mostrados por las mejores soluciones encontradas en cada algoritmo de búsqueda empleado, las cuales fueron: BL5, SA2 y SAM2. Se observa que las mejores soluciones óptimas tenían una rigidez lateral muy inferior a la mostrada por M0, siendo además su perfil muy irregular en altura. Un resultado de especial relevancia es la tendencia a suprimir el CRP del último nivel, característica presentada por el 73.3% de todas las soluciones óptimas encontradas. Un resultado esperable hubiera sido el incremento de rigidez entre el tercer y cuarto nivel, debido a que en esa zona existe una reducción de sección en las columnas, sin embargo, no se presentó tendencia alguna por elevar la rigidez lateral, por medio de CRP's, en esos niveles. Otra observación interesante es la baja rigidez de los CRP's empleados en el primer nivel de las estructuras obtenidas por método de optimización. A priori, no fue posible identificar la causa de esta característica. Ninguna otra característica común entre los perfiles de rigidez lateral de las soluciones óptimas fue identificada.

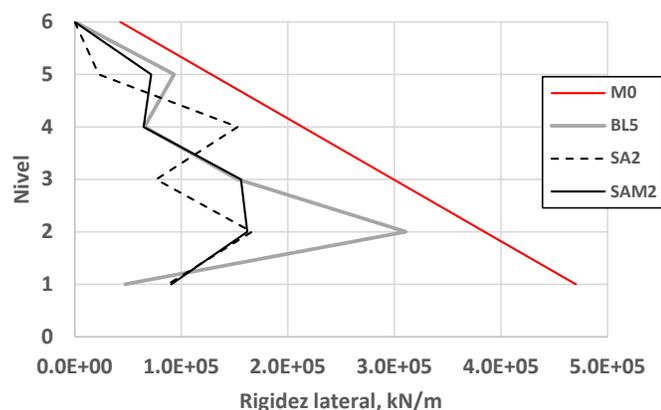


Figura 133. Rigideces laterales aportadas por el sistema disipador en M0 y las mejores soluciones obtenidas de cada algoritmo.

### 5.4.3. Periodos fundamentales de las soluciones óptimas ( $T$ )

En la Tabla 34 se muestran los periodos fundamentales ( $T$ ) de las soluciones óptimas encontradas. Se observa que tanto SA como SAM tienden a un valor de 0.75 segundos, con lo cual, es muy probable que el mínimo periodo posible para este problema se encuentre en la cercanía de dicho valor. Recordando los resultados obtenidos por medio de la búsqueda aleatoria, cuyo periodo mínimo era de 0.65 segundos, resulta evidente la gran mejora aportada por los métodos metaheurísticos en la optimización del problema.

Tabla 34. Periodos fundamentales de las soluciones óptimas encontradas.

Algoritmo	Corrida (Periodo fundamental, s)					Media	D.E.
	1	2	3	4	5		
BL	0.70	0.68	0.72	0.64	0.71	0.69	0.030
SA	0.75	0.76	0.72	0.72	0.75	0.74	0.021
SAM	0.75	0.75	0.74	0.75	0.75	0.75	0.004

### 5.4.4. Periodos fundamentales al alcanzar el punto de desempeño ( $T_{PD}$ )

En la Tabla 35 se muestran los periodos fundamentales de las estructuras más relevantes en este trabajo al alcanzar su punto de desempeño ( $T_{PD}$ ). Estos periodos se pueden obtener por medio de la ecuación (27), presentada en la página 21 de este documento, y son de relevancia ya que indican el grado de daño estructural existente al alcanzar el punto de desempeño. Para facilitar la comparación, se muestran también los periodos fundamentales iniciales de las estructuras ( $T$ ). El aspecto más remarcable de estos datos es la tendencia de los modelos SA2 y SAM2 a presentar un periodo similar al de la estructura sin reforzar. Esto puede indicar que, en estos diseños, todos sus disipadores plastifican al alcanzar el punto de desempeño, permaneciendo el resto de sus elementos estructurales con poco o nula pérdida de rigidez.

Tabla 35. Periodos fundamentales al alcanzar el punto de desempeño.

Modelo	$T$ , s	$S_a$ , g	$S_d$ , m	$T_{PD}$ , s
Sin CRP's	1.18	0.23	0.19	1.82
M0	0.56	0.55	0.08	0.77
BL5	0.71	0.58	0.13	0.95
SA2	0.76	0.53	0.17	1.14
SAM2	0.75	0.51	0.17	1.16

### 5.4.5. Axiles de plastificación de los CRP's de los soluciones óptimas

En la Figura 134 se muestran graficadas las cargas axiles requeridas para que los diferentes CRP's, de los modelos más relevantes encontrados en este trabajo, plastifiquen. Es importante indicar que las cargas presentadas son la sumatoria de las cargas de plastificación de todos los CRP's en cada nivel, adicionalmente, se señala que en todos los diseños, tanto el obtenido por el método de Guerrero et al. (M0) como en los encontrados por los algoritmos de optimización (BL5, SA2 y SAM2), se utilizaron CRP's de iguales cargas de plastificación en cada nivel. Esto no fue una condición directamente impuesta a los algoritmos, surgiendo durante el proceso de optimización debido en parte a la condición de simetría con respecto al eje vertical que se impuso a los diseños. Recordando que la carga de plastificación depende del área transversal de los CRP's, salta a la vista que, en los modelos encontrados por los algoritmos de optimización, la distribución de áreas de los disipadores en altura no presenta una tendencia lineal, característica sí encontrada en el estudio realizado por Balling et al.<sup>[11]</sup>. Obsérvese además que el modelo SAM2 muestra una distribución de áreas bastante homogénea, requiriéndose CRP's con únicamente dos áreas transversales diferentes para ejecutar toda la estructura de refuerzo, con lo cual ese diseño podría ser incluso construible en la práctica.

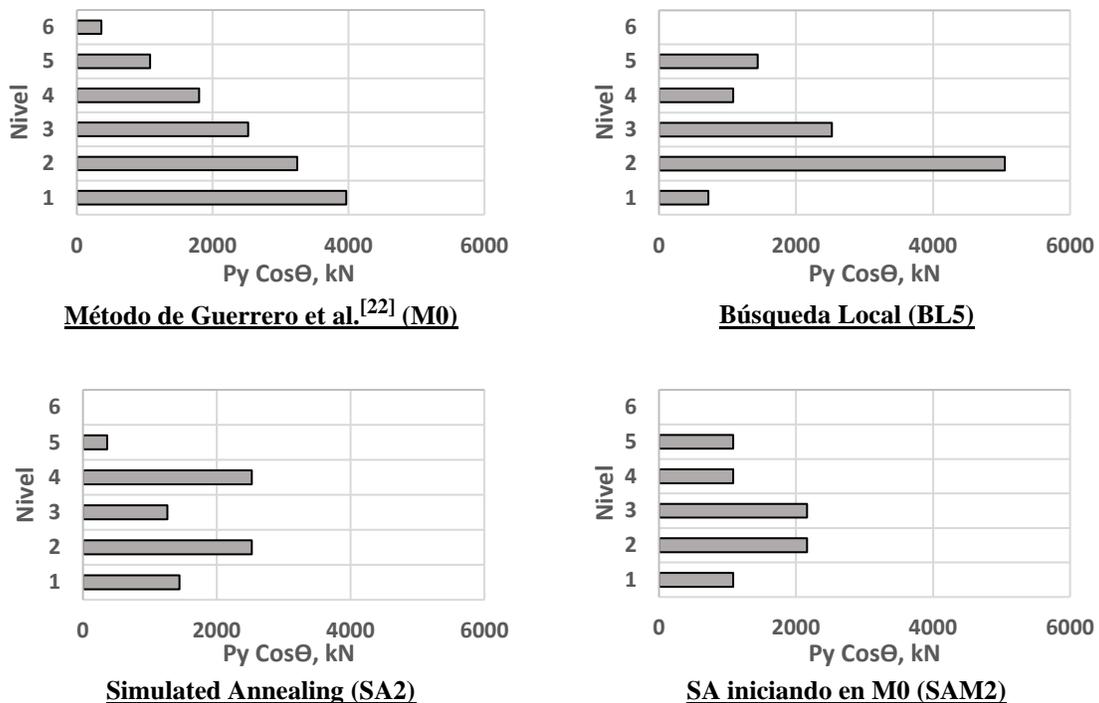


Figura 134. Distribución de cargas de plastificación en altura.

#### 5.4.6. Orden de plastificación de los CRP's

En las Figuras 135 – 138 se muestran graficadas las curvas de capacidad de los modelos M0, BL5, SA2 y SAM2. En cada una de las curvas se indican por medio de puntos azules el momento en el que los CRP's comenzaron a presentar un comportamiento plástico, mostrándose además el nivel al que correspondía dicho disipador. Los puntos de desempeño están representados por medio de cuadrados verdes. En las Figuras 135 y 136, correspondientes a los modelos M0 y BL5, se observa que algunos CRP's plastifican muy cerca del punto de desempeño, presentándose incluso el caso de que el disipador del primer nivel, del modelo M0, nunca presentó una respuesta plástica. Esta clase de respuesta no es deseable ya que provoca que los CRP's no disipen grandes cantidades de energía, estando por lo tanto subutilizados.

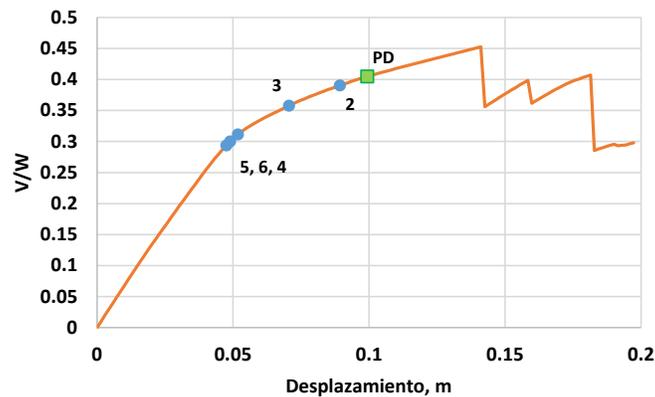


Figura 135. Orden de plastificación del modelo M0.

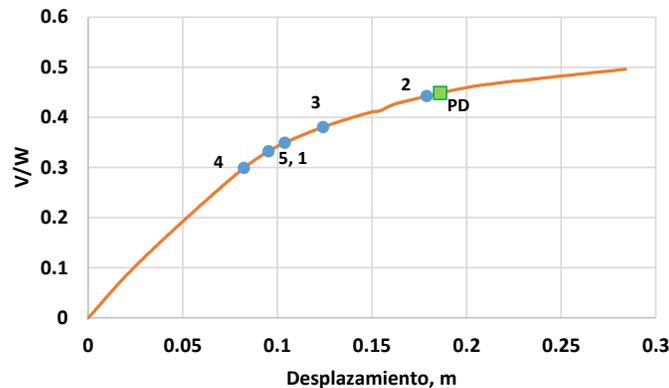


Figura 136. Orden de plastificación del modelo BL5.

Por otra parte, refiriéndose al orden de plastificación de los modelos SA2 y SAM2, mostrado en las Figuras 137 y 138 respectivamente, se observa que los CRP's plastifican en el intervalo elástico de la respuesta global de la estructura. Este tipo de respuesta permite una

mayor disipación de energía, alcanzándose grandes factores de ductilidad en la respuesta de los CRP's, tal como se muestra en la siguiente sección.

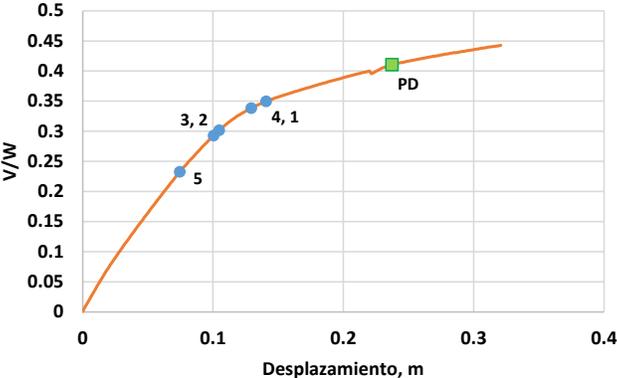


Figura 137. Orden de plastificación del modelo SA2.

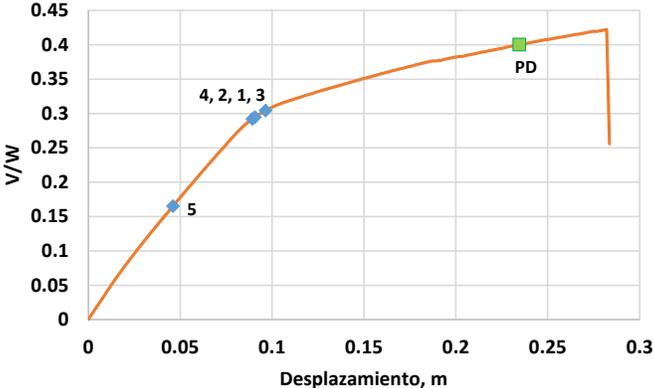
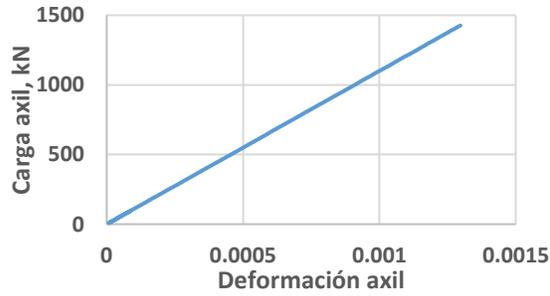


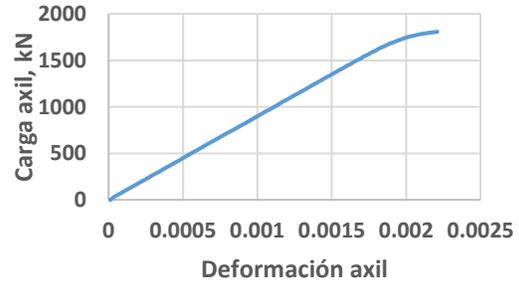
Figura 138. Orden de plastificación del modelo SAM2.

**5.4.7. Curvas fuerza – deformación de los CRP's**

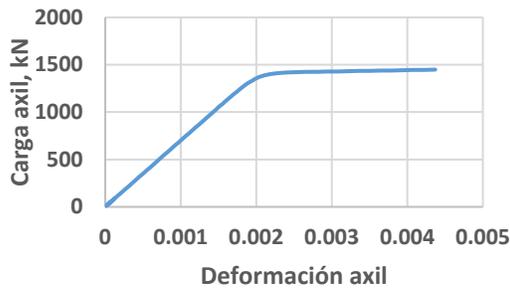
En las Figuras 139 – 142 se muestran graficadas las curvas carga axil – deformación de los CRP's de cada nivel de los modelos M0, BL5, SA2 y SAM2, respectivamente. Asimismo, se indica en una tabla los valores de la deformación de plastificación, la deformación que presentaron cada uno de los disipadores al alcanzar el punto de desempeño y el factor de ductilidad de la respuesta de los CRP's. Como se había mencionado en la anterior sección, algunos disipadores de los modelos M0 y BL5 presentaron una limitada respuesta plástica, con lo cual, sus factores de ductilidad apenas se encuentran por encima de la unidad.



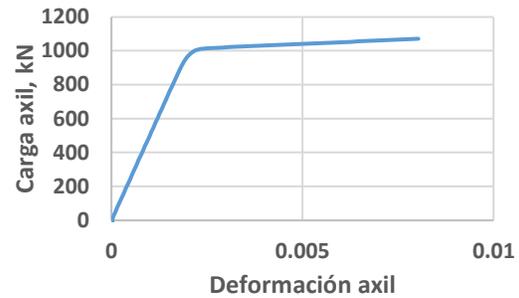
**M0 (Nivel 1)**



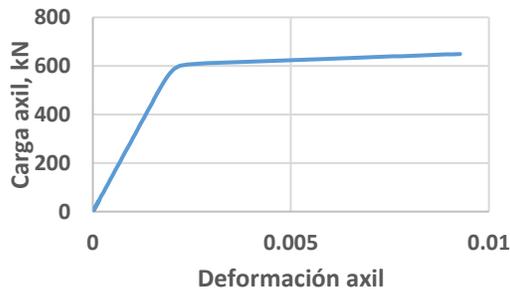
**M0 (Nivel 2)**



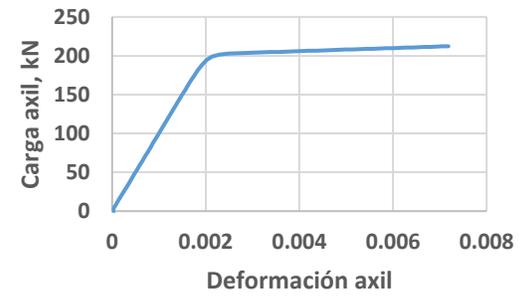
**M0 (Nivel 3)**



**M0 (Nivel 4)**



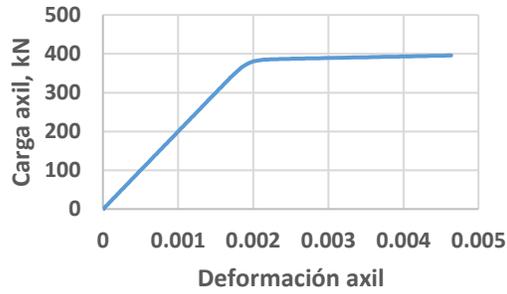
**M0 (Nivel 5)**



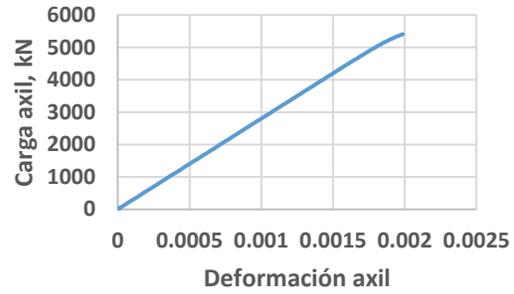
**M0 (Nivel 6)**

<b>Nivel</b>	$\epsilon_y$	$\epsilon_u$	$\mu$
1	1.93E-03	1.30E-03	0.7
2	1.93E-03	2.21E-03	1.1
3	1.93E-03	4.37E-03	2.3
4	1.93E-03	8.03E-03	4.2
5	1.93E-03	9.27E-03	4.8
6	1.93E-03	7.18E-03	3.7

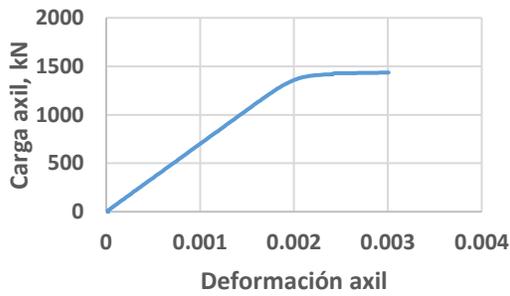
Figura 139. Respuesta axial - deformación de los CRP's del modelo M0.



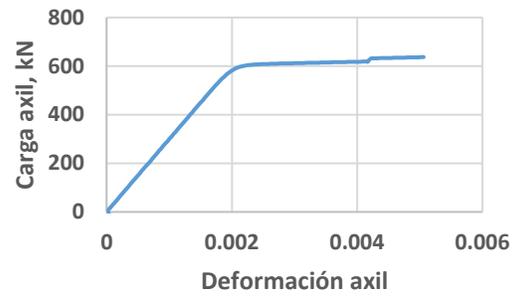
**BL5 (Nivel 1)**



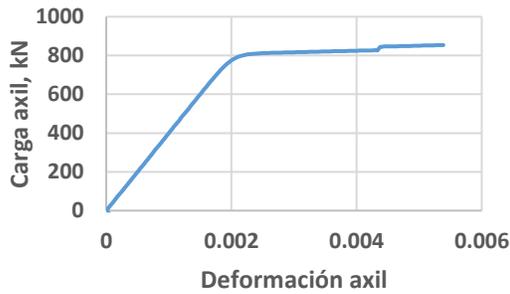
**BL5 (Nivel 2)**



**BL5 (Nivel 3)**



**BL5 (Nivel 4)**

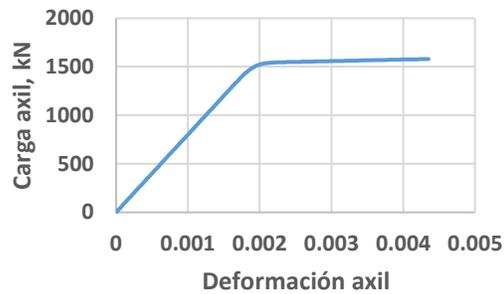


**BL5 (Nivel 5)**

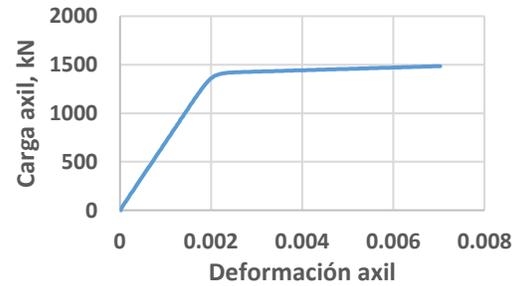
Nivel	$\epsilon_y$	$\epsilon_u$	$\mu$
1	1.93E-03	4.63E-03	2.4
2	1.93E-03	1.99E-03	1.0
3	1.93E-03	3.01E-03	1.6
4	1.93E-03	5.06E-03	2.6
5	1.93E-03	5.38E-03	2.8

Figura 140. Respuesta axial - deformación de los CRP's del modelo BL5.

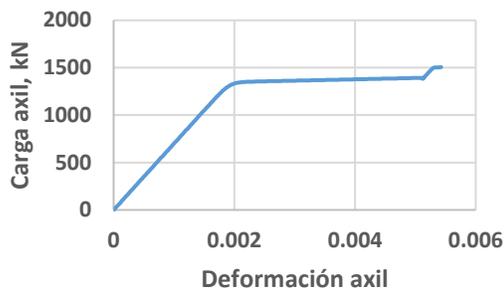
De las curvas axial – deformación de los CRP's de los modelos SA2 y SAM2, mostradas en las Figuras 141 y 142, se observa que todos los disipadores presentaban una gran deformación plástica al alcanzarse el punto de desempeño.



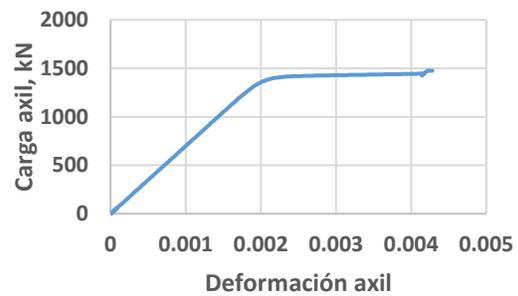
**SA2 (Nivel 1)**



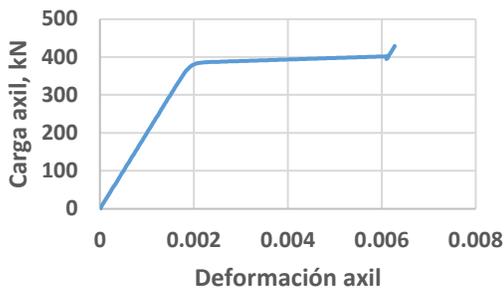
**SA2 (Nivel 2)**



**SA2 (Nivel 3)**



**SA2 (Nivel 4)**

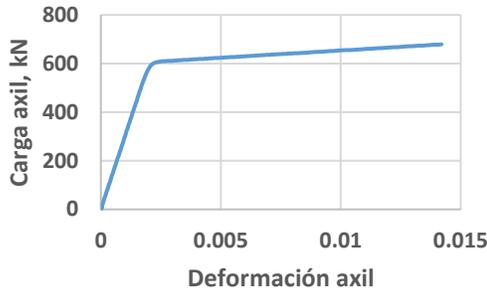


**SA2 (Nivel 5)**

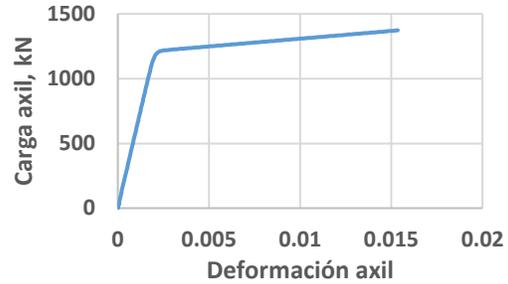
Nivel	$\epsilon_y$	$\epsilon_u$	$\mu$
1	1.93E-03	4.35E-03	2.3
2	1.93E-03	7.03E-03	3.7
3	1.93E-03	5.43E-03	2.8
4	1.93E-03	4.28E-03	2.2
5	1.93E-03	6.28E-03	3.3

Figura 141. Respuesta axial - deformación de los CRP's del modelo SA2.

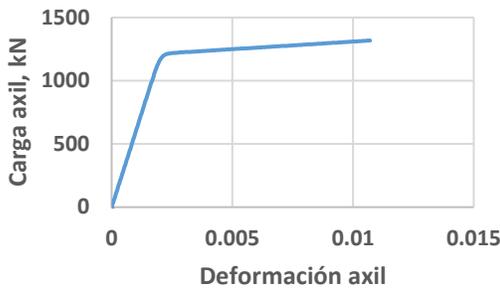
Para el caso del modelo SAM2, los disipadores dispuestos en los niveles 1, 2, 4 y 5 muestran valores de  $\mu > 4$ , estos valores, que pueden ser considerados en principio como bastante grandes, se encuentran por debajo del valor  $\mu > 10$  obtenido por Fahnestock et al.<sup>[41]</sup> en sus estudios experimentales.



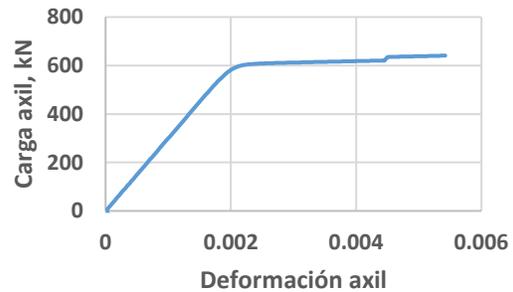
**SAM2 (Nivel 1)**



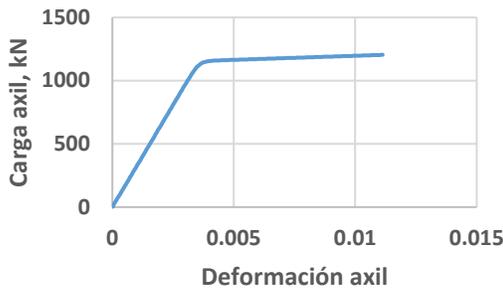
**SAM2 (Nivel 2)**



**SAM2 (Nivel 3)**



**SAM2 (Nivel 4)**



**SAM2 (Nivel 5)**

Nivel	$\epsilon_y$	$\epsilon_u$	$\mu$
1	1.93E-03	1.42E-02	7.4
2	1.93E-03	1.53E-02	8.0
3	1.93E-03	1.07E-02	5.6
4	1.93E-03	5.42E-03	2.8
5	1.93E-03	1.11E-02	5.8

Figura 142. Respuesta axial - deformación de los CRP's del modelo SAM2.

## 5.5. FUERZAS SÍSMICAS Y CORTANTE SÍSMICO

En esta sección se hará mención a las fuerzas y el cortante sísmico al que estas sometidas las estructuras, tratándose específicamente los casos de la estructura sin reforzar, y los modelos M0, BL5, SA2 y SAM2. Las fuerzas sísmicas aplicadas a cada estructura son determinadas por medio de un análisis modal espectral considerando únicamente el primer modo de vibración. A manera de recordatorio, en la Tabla 36 se indican los pesos actuantes en cada nivel de la estructura, estos fueron constantes para cada modelo debido a que se despreció el peso aportado por los disipadores.

Tabla 36. Pesos considerados en el análisis modal espectral

Nivel	Peso $W$ , kN
1	1504.8
2	1504.8
3	1504.8
4	1504.8
5	1504.8
6	1423.5

Adicionalmente, en la Tabla 37 se presentan los modos fundamentales de vibrar normalizados de los modelos estudiados, éstos fueron obtenidos por medio de análisis modales ejecutados en el programa OpenSees.

Tabla 37. Modos fundamentales de vibración.

Modelos	Modo fundamental de vibra normalizado, $\phi^T$
Sin CRP's	{0.12, 0.33, 0.55, 0.76, 0.91, 1.0}
M0	{0.10, 0.25, 0.42, 0.61, 0.82, 1.0}
BL5	{0.15, 0.28, 0.45, 0.67, 0.84, 1.0}
SA2	{0.13, 0.30, 0.49, 0.64, 0.84, 1.0}
SAM2	{0.14, 0.31, 0.47, 0.68, 0.85, 1.0}

En las Figuras 143 – 147 se presentan graficadas las fuerzas y cortante sísmicos obtenidos a través del análisis modal espectral. Las aceleraciones consideradas en cada caso correspondían a las alcanzadas en el punto de desempeño. Para facilitar una comparación entre el cortante sísmico y las fuerzas laterales resistidas por los CRP's ( $P_y \cos\theta$ ) en cada nivel, ambas curvas son presentadas de manera simultánea, siendo la primera mostrada de color naranja y la segunda en tono azul. Como se puede observar, no es posible identificar una relación clara entre el cortante sísmico aplicado y la fuerza lateral resistida por los disipadores en los diseños óptimos, sin embargo, sí se observa que en el modelo M0 la mayor parte del cortante es resistido por la estructura disipadora. Como era de esperarse, en todos los modelos, los CRP's que plastifican son aquellos ubicados en los niveles cuyo cortante sísmico es mayor a la sumatoria de cargas laterales que pueden resistir los disipadores.

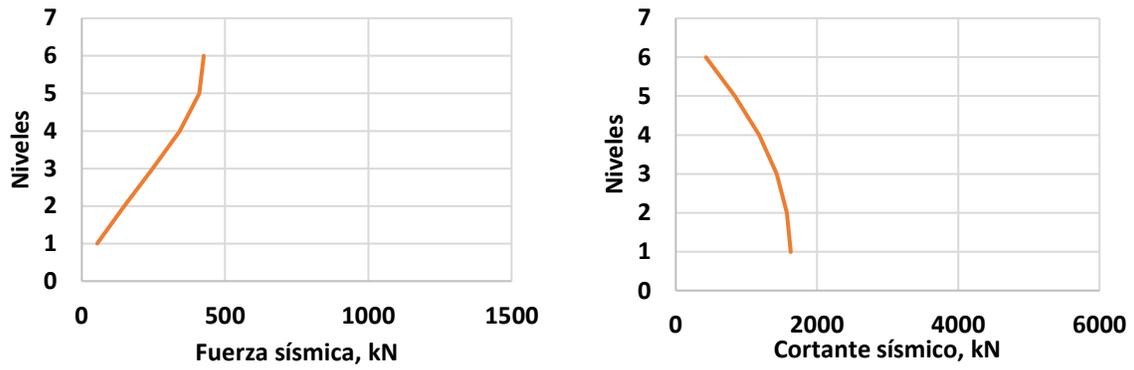


Figura 143. Fuerzas y cortante sísmico del modelo sin CRP's.

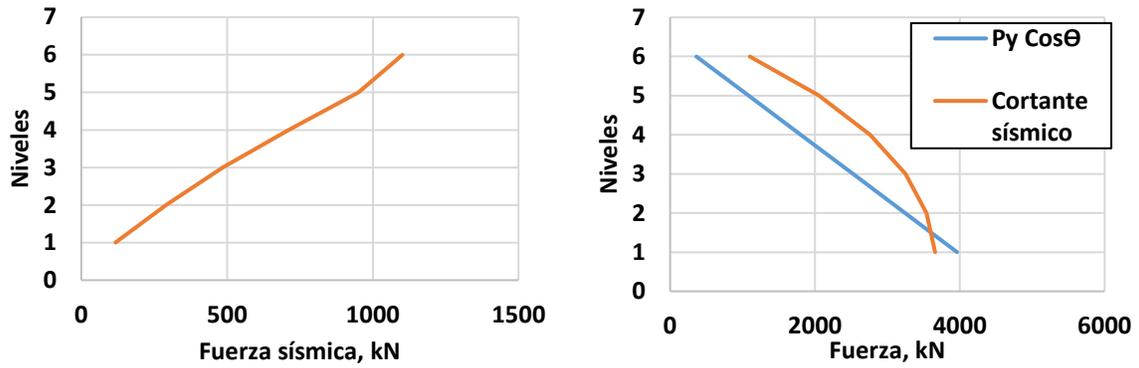


Figura 144. Fuerzas y cortante sísmico del modelo M0.

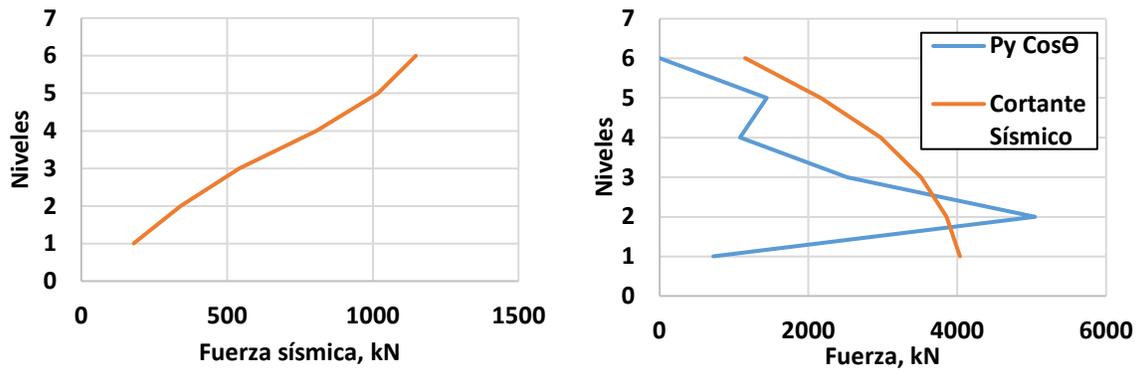


Figura 145. Fuerzas y cortante sísmico del modelo BL5.

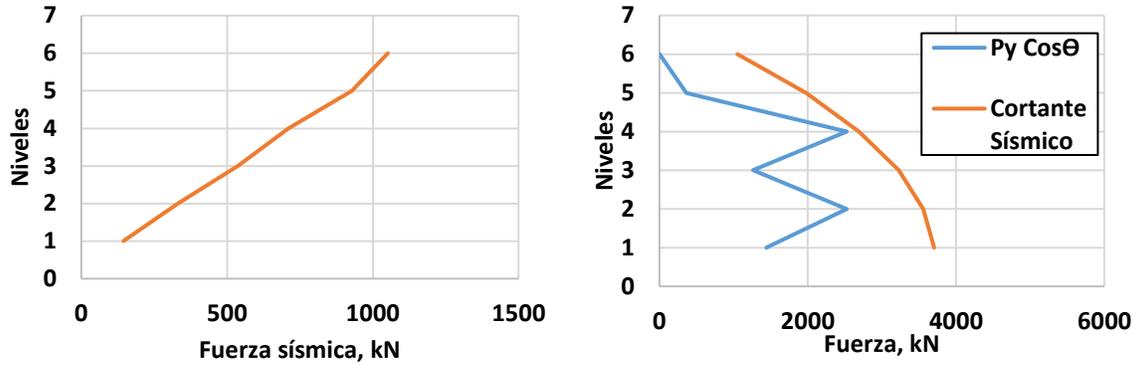


Figura 146. Fuerzas y cortante sísmico del modelo SA2.

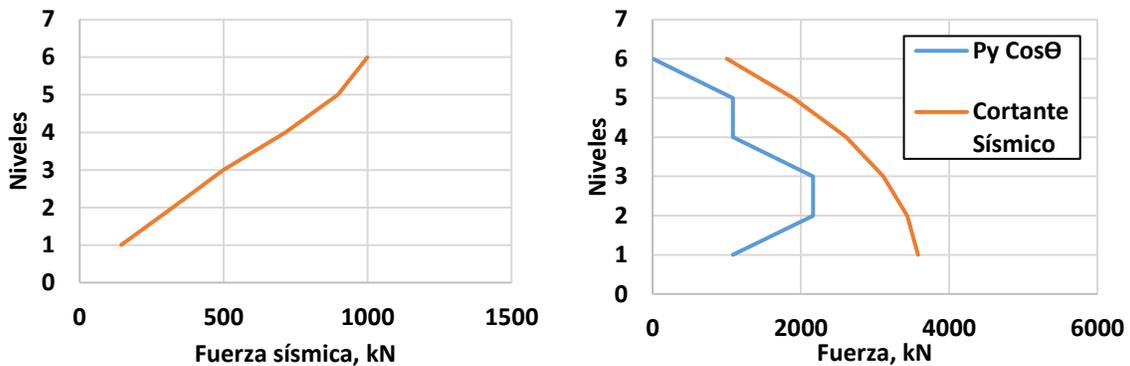


Figura 147. Fuerzas y cortante sísmico del modelo SAM2.

## 5.6. REGISTRO DE DISTORSIONES DE ENTREPISO DURANTE LOS ANÁLISIS

Para finalizar, en las Figuras 148 – 152 se muestran los registros de las distorsiones de entrecapota de las estructuras estudiadas durante su análisis estático no lineal (*Pushover*). Todos los registros se muestran graficados hasta el paso en el que se alcanzó el punto de desempeño. En pro de la simplificación, solo se señalan las curvas correspondientes a los niveles que presentaron las mayores y menores distorsiones. Como se puede observar en la Figura 148, correspondiente a la estructura sin CRP's, las distorsiones se concentraron en el primer nivel, esto se corrige en los modelos M0, SA2 y SAM2. Adicionalmente, se observa que en los modelos SA2 y SAM2, las distorsiones alcanzadas en niveles de la estructura son muy similares en magnitud.

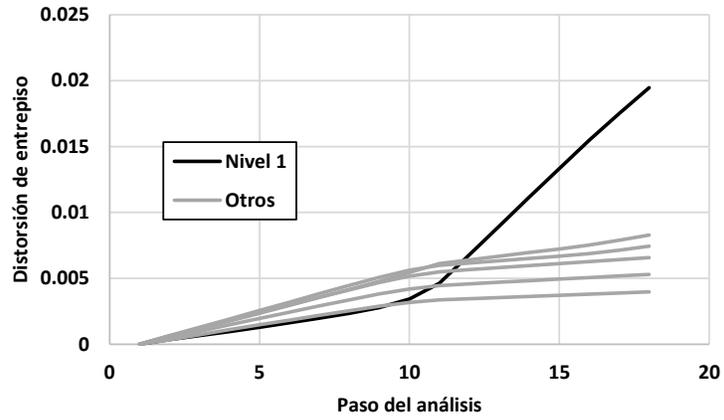


Figura 148. Distorsiones de entrepiso registradas. Modelo sin CRP's.

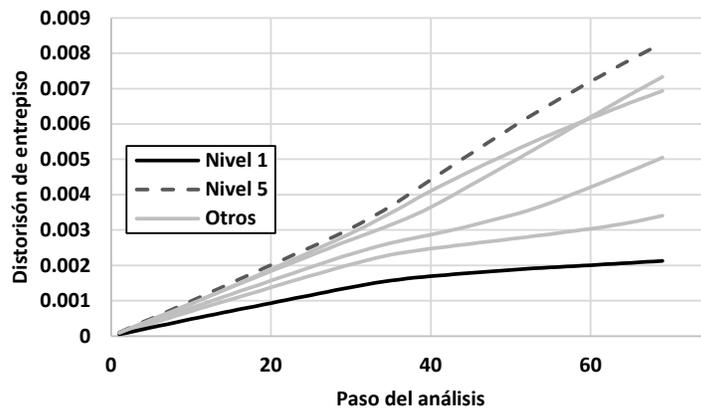


Figura 149. Distorsiones de entrepiso registradas. Modelo M0.

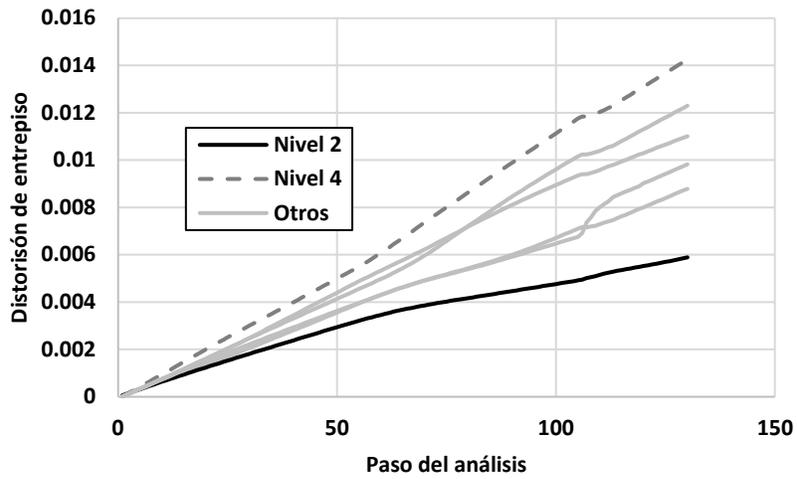


Figura 150. Distorsiones de entrepiso registradas. Modelo BL5.

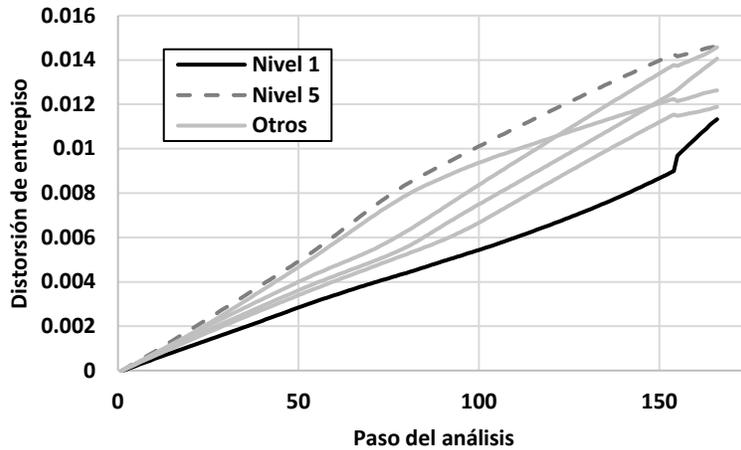


Figura 151. Distorsiones de entrepiso registradas. Modelo SA2.

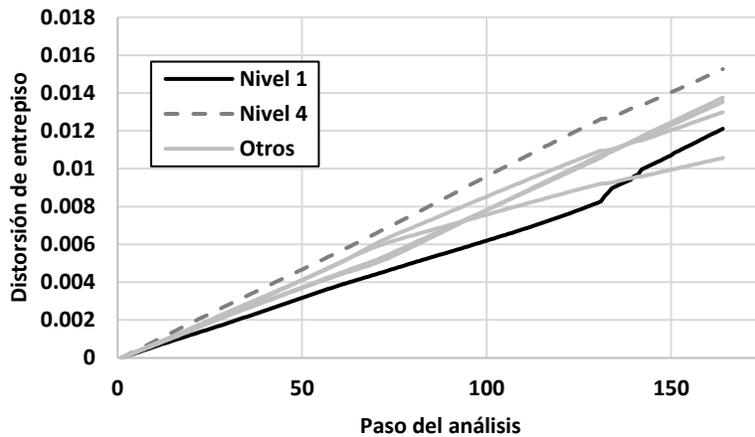


Figura 152. Distorsiones de entrepiso registradas. Modelo SAM2.

## 5.7. ¿CÓMO UTILIZAR ESTA INFORMACIÓN?

Los datos obtenidos sobre las características de los diseños óptimos de estructuras reforzadas con disipadores de tipo CRP pueden ser utilizados como una guía cualitativa para proyectistas que se enfrenten a problemas similares al aquí presentado. Desafortunadamente, no fue posible definir un método cuantitativo que explique por qué los diseños óptimos presentan tales distribuciones de rigidez en altura o por qué son capaces de mostrar altos valores de amortiguamiento equivalente.

Un posible método de diseño preliminar que haga uso de la información aquí recabada sería el siguiente:

- Habiéndose definido la estructura a reforzar, se identifica su periodo y modo de vibrar fundamental ( $T_0, \phi_0$ ). Se observa una clara tendencia de los modelos a utilizar relaciones de área y longitud ( $\eta, \gamma$ ) de valores altos, por lo tanto, homogeneizar todos los disipadores a instalar con las mismas relaciones y valores en concordancia (p. ej.  $\eta \geq 0.6$ ;  $\gamma \geq 0.5$ )

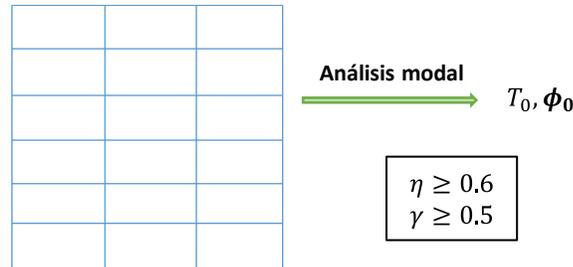


Figura 153. Paso 1. Estructura sin reforzar.

- Los diseños óptimos encontrados presentaron un periodo fundamental cercano a la estructura sin reforzar al momento de alcanzar el punto de desempeño. Este dato puede ser utilizado para estimar la demanda sísmica para la cual se debe de diseñar la estructura reforzada. No se ha encontrado forma de estimar el amortiguamiento equivalente de la estructura reforzada, pero es evidente que un diseño en el que todos los disipadores plastifique disipará grandes cantidades de energía. De manera tentativa, se propone construir una serie de espectro de demanda reducidos por diferentes valores de amortiguamiento. La demanda sísmica a considerar será la correspondiente al interceptar el espectro de demanda de interés con una recta definida por el periodo  $T_0$ .

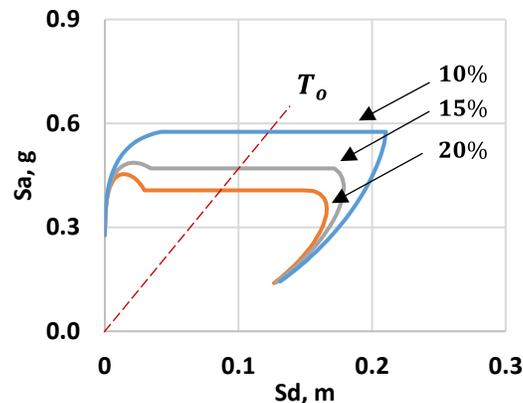


Figura 154. Paso 2. Estimación de demanda sísmica.

- Por último, en base a la o las demandas sísmicas estimadas en el paso anterior, se definiría el área transversal de los CRP's en los diferentes niveles. Desafortunadamente, para que el método de diseño propuesto este completado, se requiere encontrar una relación cuantitativa entre las áreas de los CRP's y el cortante sísmico aplicado a la estructura, lo cual no pudo lograrse en este trabajo. Adicionalmente, se observó que existen múltiples configuraciones de los CRP's que permiten cumplir con los objetivos de diseño, por lo tanto, solo se recomendaría que los disipadores sean dispuestos en forma que se eviten diseños de baja redundancia y que se analice la posibilidad de eliminar los CRP's de los niveles superiores.

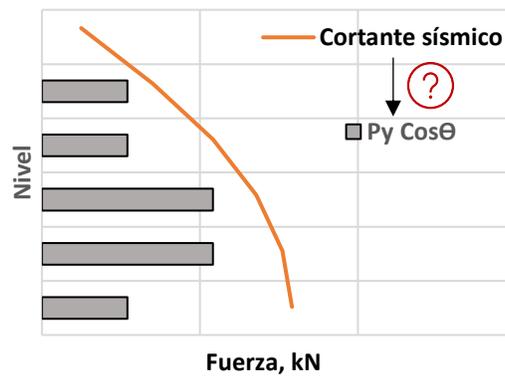


Figura 155. Paso 3. Definir configuración y áreas transversales de los CRP's.

## CAPÍTULO 6

# CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En este capítulo se presentan las principales conclusiones que se derivan de los resultados obtenidos durante la elaboración de este trabajo. De manera adicional, se proponen algunas líneas de investigación que presentan el potencial de enriquecer o refutar las conclusiones aquí enunciadas.

### 6.1. CONCLUSIONES

Las conclusiones derivadas de los datos obtenidos durante la elaboración del presente trabajo son las siguientes:

- El empleo de métodos metaheurísticos permitió, en comparación con el diseño de referencia, reducir hasta en un 67.4% el material empleado en los CRP's. Resulta entonces evidente el gran beneficio que pueden brindar los algoritmos de optimización al diseño de estructuras con esta clase de disipadores.
- El algoritmo metaheurístico conocido como *Simulated Annealing* es capaz de incrementar enormemente su desempeño cuando su solución inicial es de alta calidad.
- La variada distribución que presentaban los CRP's en los diseños óptimos indica que existen múltiples configuraciones de éstos que permiten cumplir con las deformaciones máximas establecidas por normativa.
- No es necesario que todos los niveles de la estructura cuenten con CRP's, siendo posible prescindir de ellos en los últimos niveles. En este caso en particular, el 73.3% de los diseños óptimos no contaban con CRP en el último nivel.

- Los CRP's con valores de la relación de áreas  $\eta$  altos resultan ser los que emplean de manera más eficiente el material de sus núcleos.
- Se observa una tendencia a utilizar CRP's de núcleos largos en los diseños óptimos, sin embargo, con los datos obtenidos en este trabajo no es posible brindar una respuesta definitiva sobre si es éstos son mejores que los de núcleos cortos, por lo tanto, se deben de realizar mayores estudios en este tema.
- En los diseños óptimos obtenidos, el periodo fundamental de la estructura, al alcanzar el punto de desempeño, es similar al periodo de la estructura sin reforzar; esto indica que el daño se ha concentrado en los disipadores, presentándose una mínima o nula pérdida de rigidez en los elementos del marco principal.
- En el diseño de la estructura disipadora obtenido por medio del método de Guerrero et al. no todos los disipadores presentaron un comportamiento plástico al alcanzar el punto de desempeño, con lo cual resultaba posible reducir su área transversal.
- Más estudios son necesarios para definir una relación cuantitativa entre el cortante sísmico aplicada a la estructura y el área transversal de los CRP's requeridos para resistirlo de manera eficiente.

## 6.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

A continuación, se enlistan futuras líneas de investigación relacionadas con este trabajo:

- Estudiar las diferencias que se presentan cuando el proceso de optimización se realiza por medio del método N2 para la evaluación de la respuesta sísmica en comparación con el método de la ATC – 40.
- Realizar la optimización del problema presentado en este trabajo por medio de análisis dinámicos no lineales, para reducir el tiempo requerido se recomienda utilizar SA con una solución inicial de alta calidad.
- Realizar el proceso de optimización del sistema disipador para el caso de estructuras que presenten una fuerte irregularidad en altura.
- Estudiar cuales son las características de los diseños de reajuste óptimo para edificios de mayor altura y verificar si se presentan resultados similares a los aquí reportados.
- Comprobar la exactitud de la ecuación presentada por Tremblay et al.<sup>[23]</sup> para determinar la deformación última del núcleo de los disipadores por medio de ensayos experimentales.

- Estudiar con mayor detenimiento las diferencias entre las estructuras reforzadas con CRP's de núcleos largos y cortos.
- Realizar el proceso de optimización considerando como variables tanto las características de los CRP's como las dimensiones de los elementos principales de la estructura principal.
- Identificar la relación que existe entre el cortante sísmico y el perfil de áreas transversales en altura de los CRP's obtenidos en los diseños óptimos, de tal manera que sea posible desarrollar una metodología de diseño que aproveche de manera eficiente el material empleado en los núcleos de los disipadores.

## REFERENCIAS

1. Rodríguez, V. Diseño de disipadores de energía sísmica del tipo contraventeos restringidos al pandeo (CRP). (UNAM, México, 2019).
2. Velasco, L. Comparación de la respuesta dinámica de edificios equipados con disipadores de energía sísmica de tipo BRB considerando la interacción dinámica suelo - estructura. (UNAM, México.).
3. Chopra, A. *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering*.
4. Oviedo, J. & Duque, M. Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones. *Rev. EIA, escuela Ing. Antioquia* 105–120 (2006) doi:10.24050/reia.v3i6.163.
5. ASCE/SEI 41 – 17. *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings* (2017) doi:10.1061/9780784414859.
6. Ruiz, S. *Recomendaciones para diseño de edificios con disipadores de energía ( en el marco de las NTCDS del RCDF ), con comentarios*. (Serie de investigación y desarrollo. Instituto de Ingeniería, 2011).
7. Velasco, L. & Bobadilla, H. *Introducción al análisis estructural con OpenSees*. (Serie de docencia. Instituto de Ingeniería, 2020).
8. Soong, T. & Dargush, G. *Passive energy dissipation systems in structural engineering*. (John Wiley & Sons, 1997).
9. Hanson, R. & Soong, T. *Seismic design with supplemental energy dissipation devices, monografía MNO-8*. (2001).
10. AlHamaydeh, M., Abed, F. & Mustapha, A. Key parameters influencing performance and failure modes for BRBs using nonlinear FEA. *J. Constr. Steel Res.* **116**, 1–18 (2016).
11. Balling, R. J., Balling, L. J. & Richards, P. W. Design of Buckling-Restrained Braced Frames Using Nonlinear Time History Analysis and Optimization. *J. Struct. Eng.* **135**, 461–468 (2009).

12. Barbagallo, F., Bosco, M., Marino, E. M. & Rossi, P. P. Seismic design and performance of dual structures with BRBs and semi-rigid connections. *J. Constr. Steel Res.* **158**, 306–316 (2019).
13. Kimura, K., Takeda, Y., Yoshioka, K., Furuya, N. & Takemoto, Y. An experimental study on braces encased in steel tube and mortar. in 1976 (Proc. Annual Meeting of the Architectural Institute of Japan., 1976).
14. Watanabe, A., Hitomoi, Y., Saeki, E., Wada, A. & Fujimoto, M. Properties of braces encased in buckling restrained concrete and Steel tube. in vol. IV 719 – 724 (Proc., 9th World Conf. On Earthquake Engineering. Vol IV, 1988).
15. Marino E. A unified approach for the design of high ductility Steel frames with concentric braces in the framework of Eurocode 8. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* **43**, 97 – 118 (2014).
16. Pandikkadavath, M. S. & Sahoo, D. R. Analytical investigation on cyclic response of buckling-restrained braces with short yielding core segments. *Int. J. Steel Struct.* **16**, 1273–1285 (2016).
17. Sutcu, F., Takeuchi, T. & Matsui, R. Seismic retrofit design method for RC buildings using buckling-restrained braces and steel frames. *J. Constr. Steel Res.* **101**, 304–313 (2014).
18. Hoveidae, N., Tremblay, R., Rafezy, B. & Davaran, A. Numerical investigation of seismic behavior of short-core all-steel buckling restrained braces. *J. Constr. Steel Res.* **114**, 89–99 (2015).
19. Ghowsi, A. F. & Sahoo, D. R. Near-field earthquake performance of SC-BRBs with optimal design parameters of SMA. *J. Constr. Steel Res.* **175**, 106321 (2020).
20. Guerrero Bobadilla, H., Ji, T. & Escobar, J. A. Experimental Studies of a Steel Frame Model With and Without Buckling-Restrained Braces. *Rev. Ing. Sísmica* **95**, 33–52 (2016).
21. Sarno, L. & Manfredi, G. Sarno L. y Manfredi G. (2012). Experimental tests on full – scale RC unretrofitted frame and retrofitted with buckling – restrained braces. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. Vol. 41; pp: 315 – 333. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* **41**, 315–333 (2012).
22. Guerrero, H., Ji, T., Teran-Gilmore, A. & Escobar, J. A. A method for preliminary seismic design and assessment of low-rise structures protected with buckling-restrained braces. *Eng. Struct.* **123**, 141–154 (2016).
23. Tremblay, R., Bolduc, P., Neville, R. & DeVall, R. Seismic testing and performance of buckling-restrained bracing systems. *Can. J. Civ. Eng.* **33**, 183–198 (2006).

24. Teran-Gilmore, A. & Virto-Cambray, N. Preliminary design of low-rise buildings stiffened with buckling-restrained braces by a displacement-based approach. in *Proceedings of the 9th U.S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering Compte Rendu de la 9ième Conférence Nationale Américaine et 10ième Conférence Canadienne de Génie Parasismique*. (2010). doi:10.1193/1.3054638.
25. Aguaguña, M., Zhou, Y. & Zhou, Y. Data supporting the development of loading protocols for seismic qualification of BRBs considering global performance requirements. *Data Br.* **28**, (2020).
26. Mirtaheri, M., Gheidi, A., Zandi, A. P., Alanjari, P. & Samani, H. R. Experimental optimization studies on steel core lengths in buckling restrained braces. *J. Constr. Steel Res.* **67**, 1244–1253 (2011).
27. Takeuchi, T., Ida, M., Yamada, S. & Suzuki, K. Estimation of Cumulative Deformation Capacity for Buckling Restrained Braces Placed in Frames. *J. Struct. Eng.* **134**, 822–831 (2008).
28. Takeuchi, T., Hajjar, J. F., Matsui, R., Nishimoto, K. & Aiken, I. D. Effect of local buckling core plate restraint in buckling restrained braces. *Eng. Struct.* **44**, 304–311 (2012).
29. Mortezaeholi, M. H. & Zahrai, S. M. Analytical and numerical studies on reducing lateral restraints in conventional & all steel Buckling Restrained Braces. *J. Build. Eng.* **32**, (2020).
30. Pan, W. H., Tong, J. Z., Guo, Y. L. & Wang, C. M. Optimal design of steel buckling-restrained braces considering stiffness and strength requirements. *Eng. Struct.* **211**, (2020).
31. Guerrero, H., Terán-Gilmore, A., Ji, T. & Escobar, J. A. Evaluation of the economic benefits of using Buckling-Restrained Braces in hospital structures located in very soft soils. *Eng. Struct.* **136**, 406–419 (2017).
32. Ruiz, S. E. *et al.* BRB retrofit of mid-rise soft-first-story RC moment-frame buildings with masonry infill in upper stories. *Journal of Building Engineering* <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101783> (2020) doi:10.1016/j.jobe.2020.101783.
33. Urrego, O. Elección del mejor arreglo de disipadores en un marco plano. (UNAM, México., 1994).
34. Kim, J. & Seo, Y. Seismic design of low-rise steel frames with buckling-restrained braces. *Eng. Struct.* **26**, 543–551 (2004).
35. Sahoo, D. R. & Chao, S. H. Performance-based plastic design method for buckling-restrained braced frames. *Eng. Struct.* **32**, 2950–2958 (2010).

36. Ragni, L., Zona, A. & Dall'Asta, A. Analytical expressions for preliminary design of dissipative bracing systems in steel frames. *J. Constr. Steel Res.* **67**, 102–113 (2011).
37. FEMA - 450. *NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures. Report No. FEMA – 450.* (2003).
38. ASCE/SEI 7 – 05. *Minimum design loads for buildings and other structures.* (2005).
39. ATC - 40. *Seismic evaluation and retrofit of concrete building. Report No. ATC – 40. Consejo de Tecnología Aplicada* (1996).
40. Calvi, G. M., Priestley, M. J. . & M.J., K. Displacement-Based Seismic Design of Structures. *Earthq. Spectra* **24**, 555–557 (2008).
41. Fahnestock, L. A., Ricles, J. M. & Sause, R. Experimental Evaluation of a Large-Scale Buckling-Restrained Braced Frame. *J. Struct. Eng.* **133**, 1205–1214 (2007).
42. Gobierno de la Ciudad de México. *Normas Técnicas Complementarias.* (2017).
43. FEMA - 273. *NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings. Report No. FEMA – 273.* (1997).
44. COLA. *Earthquake hazard reduction in existing reinforced concrete buildings and concrete frame buildings with masonry infills.* (1995).
45. Newmark, N. & Hall, W. *Eartquake spectra and design.* (1982).
46. Gobierno de la Ciudad de México. Sistema de acciones sísmicas de diseño, SASID. 2017 <https://sasid.unam.mx/webNormasCDMX/default.aspx>.
47. Castillo, T. & Ruiz, S. E. Reduction factors for seismic design spectra for structures with viscous energy dampers. *J. Earthq. Eng.* **18**, 323–349 (2014).
48. Feo, T. A. & Resende, M. G. C. Greedy Randomized Adaptive Search Procedures. *J. Glob. Optim.* **6**, 109–133 (1995).
49. Blum, C. & Roli, A. Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison. *ACM Comput. Surv.* **35**, 268–308 (2003).
50. Sörensen, K., Sevaux, M. & Glover, F. A History of Metaheuristics. *En: Martí R., Pardalos P. y Resende M. (eds). Handbook of Heuristics.* (2018).
51. Polya, G. *How to solve it: A new aspect of mathematical model.* (Princeton University Press, 1945).
52. Boussaïd, I., Lepagnot, J. & Siarry, P. A survey on optimization metaheuristics. *Inf. Sci. (Ny).* **237**, 82–117 (2013).

53. Holland, J. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. (University of Michigan Press, 1975).
54. Goldberg, D. *Genetic algorithms in optimization, search and machine learning*. Addison Wesley (1988).
55. Sörensen, K. & Glover, F. Sörensen K, Glover FW (2013) Metaheuristics. En: Gass S. y Fu M. (eds) *Encyclopedia of operations research and management science*, 663 3rd edn, pp 960 – 970, Springer, Boston, MA. (2013).
56. Glover, F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Comput. Oper. Res.* **13**, 533–549 (1986).
57. Sevaux, M., Sörensen, K. & Pillay, N. Adaptive and multilevel metaheuristics. En: Martí R., Pardalos P. y Resende M. (eds). *Handbook of Heuristics*. (2018).
58. Duarte, A., Sánchez, J., Mladenović, N. & Todosijević, R. Variable Neighborhood Descent. En: Martí R., Pardalos P. y Resende M. (eds). *Handbook of Heuristics*. (2018).
59. Sörensen, K. Metaheuristics-the metaphor exposed. *Int. Trans. Oper. Res.* **22**, 3–18 (2013).
60. Birattari, M., Paquete, L., Stützle, T. & Varrentapp, K. *Classification of metaheuristics and design of experiments for the analysis of components*. Reporte: AIDA – 01 – 05. (2003).
61. Coello, C. Multi-objective Optimization. En: Martí R., Pardalos P. y Resende M. (eds) *Handbook of Heuristics*. (2018).
62. Coloni, A., Dorigo, M. & Maniezzo, V. Distributed Optimization by ant colonies. in *Proceedings of the First European Conference on Artificial Life* (1991).
63. Hopfield, J. J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **79**, 2554–2558 (1982).
64. Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. & Vecchi, M. P. Optimization by simulated annealing. *Science* (80-. ). **220**, 671–680 (1983).
65. Fleischer, M. Simulated annealing: Past, present and future. in *Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference*. (1995).
66. Winker, P. & Maringer, D. (2007). The threshold accepting optimization algorithm in economics and statistics. En: Kontoghiorghes E. y Gatu C. (eds). *Optimization, Econometric and Financial Analysis*. *Advances in Computational Management Science*. Vol 9. Sprin. (2007).

67. Hansen, P., Mladenović, N. & Hansen, P. Variable neighborhood search. *Comput. Oper. Res.* **24**, 1097–1110 (1997).
68. Hansen, P., Mladenović, N., Todosijević, R. & Hanafi, S. Variable neighborhood search: basics and variants. *EURO J. Comput. Optim.* **5**, 423–454 (2017).
69. Glover, F. Heuristics for integer programming using surrogate constraints. *Decis. Sci.* **8**, 156–166 (1977).
70. Kazemzadeh Azad, S., Hasançebi, O. & Kazemzadeh Azad, S. Upper bound strategy for metaheuristic based design optimization of steel frames. *Adv. Eng. Softw.* **57**, 19–32 (2013).
71. Dokeroglu, T., Sevinc, E., Kucukyilmaz, T. & Cosar, A. A survey on new generation metaheuristic algorithms. *Comput. Ind. Eng.* **137**, (2019).
72. Geem, Z., Hoon, J. & Loganathan, G. A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search. *Simulation.* **76**, 60–68 (2001).
73. Chu, S., Tsai, P. & Pan, J. Cat Swarm Optimization. En: Yang Q. y Webb G. (eds) *PRICAI 2006: Trends in Artificial Intelligence. PRICAI 2006. Lecture Notes in Computer Science* (2006).
74. Karaboga, D. & Basturk, B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm. *J. Glob. Optim.* **39**, 459–471 (2007).
75. Eusuff, M., Lansey, K. & Pasha, F. Shuffled frog-leaping algorithm: a memetic metaheuristic for discrete optimization. *Eng. Optim.* **38**, 129–154 (2007).
76. Shah - Hosseini, H. Intelligent water drops algorithm: A new optimization method for solving the multiple knapsack problem. *Int. J. Intell. Comput. Cybern.* **1**, 193–212 (2008).
77. Rashedi, E., Nezamabadi-pour, H. & Saryazdi, S. GSA: A Gravitational Search Algorithm. *Inf. Sci. (Ny)*. **179**, 2232–2248 (2009).
78. Yang, X. & Deb, S. (2009). Cuckoo search via L'evy flights. En Proc. the World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing, pp: 210 – 214. in *Proc. the World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing* 210–214 (2009).
79. Yang, X. (2010). A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm. En: González J., Pelta D., Cruz C., Terrazas G. y Krasnogor N. (eds) *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010)*. Studies in Computational Intelligence, vol 284. Springer. (2010).

80. Yannis, M., Magdalene, M. & Nikolaos, M. Yannis M., Magdalene M., y Nikolaos M. (2010). A Bumble Bees Mating Optimization Algorithm for Global Unconstrained Optimization Problems. En: González J., Pelta D., Cruz C., Terrazas G. y Krasnogor N. (eds) *Nature Inspired Cooperative Strategies for Opti.* vol. 284 (2010).
81. Abdollahi, M., Isazadeh, A. & Abdollahi, D. Imperialist competitive algorithm for solving systems of nonlinear equations. *Comput. Math. with Appl.* **65**, 1894–1908 (2013).
82. Kaveh, A. & Mahdavi, V. R. Colliding bodies optimization: A novel meta-heuristic method. *Comput. Struct.* **139**, 18–27 (2014).
83. Tamura, K. & Yasuda, K. Spiral Optimization Algorithm Using Periodic Descent Directions. *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*. Vol. 9; pp: 134 – 43. *SICE J. Control. Meas. Syst. Integr.* **9**, 134–143 (2016).
84. Mirjalili, S. & Lewis, A. The Whale Optimization Algorithm. *Adv. Eng. Softw.* **95**, 51–67 (2016).
85. Biyanto, T. & at al. Duelist Algorithm: An Algorithm Inspired by How Duelist Improve Their Capabilities in a Duel. En: *Tan Y., Shi Y. y Niu B. (eds) Advances in Swarm Intelligence. ICSI 2016. Lecture Notes in Computer Science* vol. 9712 (2016).
86. Saremi, S., Mirjalili, S. & Lewis, A. Grasshopper Optimisation Algorithm: Theory and application. *Adv. Eng. Softw.* **105**, 30–47 (2017).
87. Biyanto, T. R. *et al.* Killer Whale Algorithm: An Algorithm Inspired by the Life of Killer Whale. *Procedia Comput. Sci.* **124**, 151–157 (2017).
88. Wedyan, A., Whalley, J. & Narayanan, A. Hydrological Cycle Algorithm for Continuous Optimization Problems. *J. Optim.* **10**, 1–25 (2017).
89. Heidari, A. A. *et al.* Harris hawks optimization: Algorithm and applications. *Futur. Gener. Comput. Syst.* **97**, 849–872 (2019).
90. Harifi, S., Khalilian, M., Mohammadzadeh, J. & Ebrahimnejad, S. Emperor Penguins Colony: a new metaheuristic algorithm for optimization. *Evol. Intell.* **12**, 211–226 (2019).
91. Chou, J. S. & Nguyen, N. M. FBI inspired meta-optimization. *Appl. Soft Comput. J.* **93**, (2020).
92. Zervoudakis, K. & Tsafarakis, S. A mayfly optimization algorithm. *Comput. Ind. Eng.* **145**, (2020).
93. Kaveh, A. & Zaerreza, A. Shuffled shepherd optimization method: a new Meta-heuristic algorithm. *Eng. Comput.* **37**, 2357–2389 (2020).

94. Hayyolalam, V. & Pourhaji Kazem, A. A. Black Widow Optimization Algorithm: A novel meta-heuristic approach for solving engineering optimization problems. *Eng. Appl. Artif. Intell.* **87**, (2020).
95. Mohammadi-Balani, A., Dehghan Nayeri, M., Azar, A. & Taghizadeh-Yazdi, M. Golden eagle optimizer: A nature-inspired metaheuristic algorithm. *Comput. Ind. Eng.* **152**, (2021).
96. Del Ser, J. *et al.* Bio-inspired computation: Where we stand and what's next. *Swarm Evol. Comput.* **48**, 220–250 (2019).
97. Camacho-Villalón, C. L., Dorigo, M. & Stützle, T. The intelligent water drops algorithm: why it cannot be considered a novel algorithm: A brief discussion on the use of metaphors in optimization. *Swarm Intell.* **13**, 173–192 (2019).
98. Weyland, D. A Rigorous Analysis of the Harmony Search Algorithm: How the Research Community can be Misled by a “Novel” Methodology. *Int. J. Appl. Metaheuristic Comput.* **1**, 50–60 (2010).
99. Weyland, D. A critical analysis of the harmony search algorithm-How not to solve sudoku. *Oper. Res. Perspect.* **2**, 97–105 (2015).
100. Wolpert, D. H. & Macready, W. G. No free lunch theorems for optimization. *IEEE Trans. Evol. Comput.* **1**, 67–82 (1997).
101. Hansen, P., Mladenović, N. & Moreno Pérez, J. A. *Variable neighborhood search: Methods and applications. Annals of Operations Research* vol. 175 (2009).
102. Pareto, V. *Cours D'Economie Politique, vol. I and II. F. Rouge, Lausanne, vol. I and II.*
103. Yepes, V., Alcalá, J., Perea, C. & González-Vidoso, F. A parametric study of optimum earth-retaining walls by simulated annealing. *Eng. Struct.* **30**, 821–830 (2008).
104. Medina, J. Estimation of incident and reflected waves using simulated annealing. *J. Waterw. Port, Coastal, Ocean Eng.* **127**, 213–221 (2001).
105. Granville, V., Rasson, J. P. & Krivánek, M. Simulated Annealing: A Proof of Convergence. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **16**, 652–656 (1994).
106. Zavala, G. R., Nebro, A. J., Luna, F. & Coello Coello, C. A. A survey of multi-objective metaheuristics applied to structural optimization. *Struct. Multidiscip. Optim.* **49**, 537–558 (2014).
107. Hofmeister, B., Bruns, M. & Rolfes, R. Finite element model updating using deterministic optimisation: A global pattern search approach. *Eng. Struct.* **195**, 373–381 (2019).

108. Gu, Q., Barbato, M., Conte, J. P., Gill, P. E. & McKenna, F. OpenSees-SNOPT Framework for Finite-Element-Based Optimization of Structural and Geotechnical Systems. *J. Struct. Eng.* **138**, 822–834 (2012).
109. Barron, G., Brotchie, J. & Cornell, C. A Program for the Optimum Design of Prestressed Concrete Highway Bridges. *PCI J.* (1966).
110. Cohn, M. Z., MacRae, A. J., Colin, M. Z. & MacRae, A. J. Optimization of Structural Concrete Beams. *J. Struct. Eng.* **110**, 1573–1588 (1984).
111. Plaut, R. H. Optimal Beam and Plate Foundations for Minimum Compliance. **54**, 255–257 (1987).
112. Balling, R. J. Optimal Steel Frame Design by Simulated Annealing. **117**, 1780–1795 (1991).
113. Chakrabarty, B. K. A model for Optimal Design of Reinforced Concrete Beam. **118**, 3238–3242 (1993).
114. Lounis, Z. & Cohn, M. Z. Multiobjective Optimization of Prestressed Concrete Structures. *J. Struct. Eng.* **119**, 794–808 (1993).
115. Hajela, P. & Lee, E. Genetic algorithms in truss topological optimization. *Int. J. Solids Struct.* **32**, 3341–3357 (1994).
116. Cohn, M. Z. & Lounis, Z. Optimal Design of Structural Concrete Bridge Systems. **120**, 2653–2674 (1995).
117. Kocer, F. Y. & Arora, J. S. Optimal design of prestressed concrete transmission poles. *Proc. Conf. Anal. Comput.* **9445**, 111–122 (1996).
118. Coello, C. C., Hernández, F. S. & Farrera, F. A. Optimal design of reinforced concrete beams using genetic algorithms. *Expert Syst. Appl.* **12**, 101–108 (1997).
119. Rajeev, S. & Krishnamoorthy, C. S. Genetic algorithm-based methodology for design optimization of reinforced concrete frames. *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.* **13**, 63–74 (1998).
120. Jenkins, W. M. Improving structural design by genetic search. *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.* **13**, 5–11 (1998).
121. Fadaee, M. J. & Grierson, D. E. Design Optimization of 3D Reinforced Concrete Structures Having Shear Walls. *Eng. Comput.* **14**, 139–145 (1998).
122. Koumoussis, V. K. & Arsenis, S. J. Genetic algorithms in optimal detailed design of reinforced concrete members. *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.* **13**, 43–52 (1998).
123. Manoharan, S. & Shanmuganathan, S. A comparison of search mechanisms for structural optimization. *Comput. Struct.* **73**, 363–372 (1999).

124. Coello, C. A. & Christiansen, A. D. Multiobjective optimization of trusses using genetic algorithms. *Comput. Struct.* **75**, 647–660 (2000).
125. Hasançebi, O. & Erbatur, F. Layout optimisation of trusses using simulated annealing. *Adv. Eng. Softw.* **33**, 681–696 (2002).
126. Lepš, M. & Šejnoha, M. New approach to optimization of reinforced concrete beams. *Comput. Struct.* **81**, 1957–1966 (2003).
127. Fairbairn, E. M. R., Silvano, M. M., Toledo Filho, R. D., Alves, J. L. D. & Ebecken, N. F. F. Optimization of mass concrete construction using genetic algorithms. *Comput. Struct.* **82**, 281–299 (2004).
128. Charmpis, D. C., Lagaros, N. D. & Papadrakakis, M. Structural Design in the Framework of Cascade Evolutionary Optimization. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* **194**, 3315–3330 (2005).
129. Hong, T. H. & Hastak, M. Evaluation and determination of optimal MR&R strategies in concrete bridge decks. *Autom. Constr.* **16**, 165–175 (2007).
130. Dissanayake, P. B. R. & Karma, S. J. Optimum Design of Prestressed Concrete Beams. *Eng. J. Inst. Eng. Sri Lanka* **40**, 29 (2007).
131. Degertekin, S. O., Saka, M. P. & Hayalioglu, M. S. Optimal load and resistance factor design of geometrically nonlinear steel space frames via tabu search and genetic algorithm. *Eng. Struct.* **30**, 197–205 (2008).
132. Biondini, F. & Frangopol, D. M. Lifetime reliability-based optimization of reinforced concrete cross-sections under corrosion. *Struct. Saf.* **31**, 483–489 (2009).
133. Atabay, Ş. Cost optimization of three-dimensional beamless reinforced concrete shear-wall systems via genetic algorithm. *Expert Syst. Appl.* **36**, 3555–3561 (2009).
134. Malekly, H., Meysam Mousavi, S. & Hashemi, H. A fuzzy integrated methodology for evaluating conceptual bridge design. *Expert Syst. Appl.* **37**, 4910–4920 (2010).
135. Martínez, F. J., González-Vidosa, F., Hospitaler, A. & Yepes, V. Heuristic optimization of RC bridge piers with rectangular hollow sections. *Comput. Struct.* **88**, 375–386 (2010).
136. Martínez, F. J., González-Vidosa, F., Hospitaler, A. & Alcalá, J. Design of tall bridge piers by ant colony optimization. *Eng. Struct.* **33**, 2320–2329 (2011).
137. De Albuquerque, A. T., El Debs, M. K. & Melo, A. M. C. A cost optimization-based design of precast concrete floors using genetic algorithms. *Autom. Constr.* **22**, 348–356 (2012).

138. Yeo, D. & Potra, F. A. Sustainable Design of Reinforced Concrete Structures through CO2 Emission Optimization. *J. Struct. Eng.* **141**, (2015).
139. Ashwini R. Kulkarni, Vijaykumar Bhusare, Ashwini R. Kulkarni & Vijaykumar Bhusare. Structural optimization of reinforced concrete structures. *Int. J. Eng. Res.* **V5**, 3–8 (2016).
140. Negrin, I. A., Negrin, A. & Chagoyén, E. L. Optimización de pórticos planos de hormigón armado utilizando una hibridación de algoritmos genéticos y el algoritmo Nelder-Mead. *Obras y Proy.* 74–86 (2019) doi:10.4067/s0718-28132019000200074.
141. Do, B. & Ohsaki, M. A random search for discrete robust design optimization of linear-elastic steel frames under interval parametric uncertainty. *Comput. Struct.* **249**, 106506 (2021).
142. Dillen, W. *et al.* Optimization in a realistic structural engineering context: Redesign of the Market Hall in Ghent. *Eng. Struct.* **228**, 111473 (2021).
143. Kaveh, A., Kamalinejad, M., Arzani, H. & Barzinpour, F. New enhanced colliding body optimization algorithm based on a novel strategy for exploration. *J. Build. Eng.* **43**, 102553 (2021).
144. Zou, X. K. & Chan, C. M. Optimal seismic performance-based design of reinforced concrete buildings using nonlinear pushover analysis. *Eng. Struct.* **27**, 1289–1302 (2005).
145. Shook, D. A., Roschke, P. N., Lin, P. Y. & Loh, C. H. GA-optimized fuzzy logic control of a large-scale building for seismic loads. *Eng. Struct.* **30**, 436–449 (2008).
146. Farhat, F., Nakamura, S. & Takahashi, K. Application of genetic algorithm to optimization of buckling restrained braces for seismic upgrading of existing structures. *Comput. Struct.* **87**, 110–119 (2009).
147. Kaveh, A., Farahmand Azar, B., Hadidi, A., Rezazadeh Sorochi, F. & Talatahari, S. Performance-based seismic design of steel frames using ant colony optimization. *J. Constr. Steel Res.* **66**, 566–574 (2010).
148. Hajirasouliha, I., Pilakoutas, K. & Moghaddam, H. Topology optimization for the seismic design of truss-like structures. *Comput. Struct.* **89**, 702–711 (2011).
149. Ohsaki, M. & Nakajima, T. Optimization of link member of eccentrically braced frames for maximum energy dissipation. *J. Constr. Steel Res.* **75**, 38–44 (2012).
150. Hedayati Dezfuli, F. & Alam, M. S. Multi-criteria optimization and seismic performance assessment of carbon FRP-based elastomeric isolator. *Eng. Struct.* **49**, 525–540 (2013).

151. Kaveh, A. & Zakian, P. Optimal design of steel frames under seismic loading using two meta-heuristic algorithms. *J. Constr. Steel Res.* **82**, 111–130 (2013).
152. Kaveh, A. & Nasrollahi, A. Performance-based seismic design of steel frames utilizing charged system search optimization. *Appl. Soft Comput. J.* **22**, 213–221 (2014).
153. Liu, Z., Atamturktur, S. & Juang, C. H. Reliability based multi-objective robust design optimization of steel moment resisting frame considering spatial variability of connection parameters. *Eng. Struct.* **76**, 393–403 (2014).
154. Gholizadeh, S. Performance-based optimum seismic design of steel structures by a modified firefly algorithm and a new neural network. *Adv. Eng. Softw.* **81**, 50–65 (2015).
155. Papavasileiou, G. S. & Charmpis, D. C. Seismic design optimization of multi-storey steel-concrete composite buildings. *Comput. Struct.* **170**, 49–61 (2016).
156. Zhang, H. Y. & Zhang, L. J. Tuned mass damper system of high-rise intake towers optimized by improved harmony search algorithm. *Eng. Struct.* **138**, 270–282 (2017).
157. Léger, N., Rizzian, L. & Marchi, M. Reliability-based design optimization of reinforced concrete structures with elastomeric isolators. *Procedia Eng.* **199**, 1193–1198 (2017).
158. Kaveh, A., Ghafari, M. H. & Gholipour, Y. Optimum seismic design of steel frames considering the connection types. *J. Constr. Steel Res.* **130**, 79–87 (2017).
159. Bekdaş, G., Nigdeli, S. M. & Yang, X. S. A novel bat algorithm based optimum tuning of mass dampers for improving the seismic safety of structures. *Eng. Struct.* **159**, 89–98 (2018).
160. Mokarram, V. & Banan, M. R. An improved multi-objective optimization approach for performance-based design of structures using nonlinear time-history analyses. *Appl. Soft Comput. J.* **73**, 647–665 (2018).
161. Seo, H., Kim, J. & Kwon, M. Optimal seismic retrofitted RC column distribution for an existing school building. *Eng. Struct.* **168**, 399–404 (2018).
162. Ontiveros-Pérez, S. P., Miguel, L. F. F. & Riera, J. D. Reliability-based optimum design of passive friction dampers in buildings in seismic regions. *Eng. Struct.* **190**, 276–284 (2019).
163. Boscardin, J. T., Yepes, V. & Kripka, M. Optimization of reinforced concrete building frames with automated grouping of columns. *Autom. Constr.* **104**, 331–340 (2019).
164. Razmara Shooli, A., Vosoughi, A. R. & Banan, M. R. A mixed GA-PSO-based approach for performance-based design optimization of 2D reinforced concrete special moment-resisting frames. *Appl. Soft Comput. J.* **85**, 105843 (2019).

165. Azizi, M., Ejlali, R. G., Mousavi Ghasemi, S. A. & Talatahari, S. Upgraded Whale Optimization Algorithm for fuzzy logic based vibration control of nonlinear steel structure. *Eng. Struct.* **192**, 53–70 (2019).
166. Fathali, M. A. & Hoseini Vaez, S. R. Optimum performance-based design of eccentrically braced frames. *Eng. Struct.* **202**, (2020).
167. Abedini, H., Hoseini Vaez, S. R. & Zarrineghbal, A. Optimum design of buckling-restrained braced frames. *Structures* **25**, 99–112 (2020).
168. Raeesi, F., Azar, B. F., Veladi, H. & Talatahari, S. An inverse TSK model of MR damper for vibration control of nonlinear structures using an improved grasshopper optimization algorithm. *Structures* **26**, 406–416 (2020).
169. Kalemci, E. N., İközler, S. B., Dede, T. & Angın, Z. Design of reinforced concrete cantilever retaining wall using Grey wolf optimization algorithm. *Structures* **23**, 245–253 (2020).
170. Xing, L., Zhou, Y. & Huang, W. Seismic optimization analysis of high-rise buildings with a buckling-restrained brace outrigger system. *Eng. Struct.* **220**, 110959 (2020).
171. Das, S. & Tesfamariam, S. Optimization of SMA based damped outrigger structure under uncertainty. *Eng. Struct.* **222**, 111074 (2020).
172. Kaveh, A., Javadi, S. M. & Mahdipour Moghanni, R. Optimal structural control of tall buildings using tuned mass dampers via chaotic optimization algorithm. *Structures* **28**, 2704–2713 (2020).
173. Etedali, S., Hasankhoie, K. & Sohrabi, M. R. Optimal design of pure-friction isolators with and without restoring device: A multi-objective cuckoo search-based approach for seismic-excited structures. *Structures* **25**, 708–719 (2020).
174. Rezazadeh, F. & Talatahari, S. Seismic energy-based design of BRB frames using multi-objective vibrating particles system optimization. *Structures* **24**, 227–239 (2020).
175. Keykhosro Kiani, B., Hosseini Hashemi, B. & Torabian, S. Optimization of slit dampers to improve energy dissipation capacity and low-cycle-fatigue performance. *Eng. Struct.* **214**, 110609 (2020).
176. Vivienda, M. de. Catálogo de elementos constructivos del CTE. (2010).
177. CSI. SAP2000, integrated solution for structural analysis and design. (2019).
178. Center, P. E. E. R. OpenSees, open source finite element platform for earthquake engineering simulations. (2006).

179. Mackenna, F. Object-Oriented Finite Element Programming: Frameworks for Analysis, Algorithms and Parallel Computing. (Universidad de California, EE. UU., 1997).
180. OpenSees. Command Manual. [https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/OpenSees\\_User](https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/OpenSees_User).
181. Mander, J. B., Priestley, M. J. N. & Park, R. Theoretical stress – strain model for confined concrete. *J. Struct. Eng* **114**, 1804–1826 (1989).
182. fib - CEB-FIP. *Model Code 2010. fib Model Code for Concrete Structures 2010* vol. 1 (2010).
183. Filippou, F., Spacone, E. & Taucer, F. F. *A fiber beam – column element for seismic response analysis of reinforced concrete structures. Report No. UCB/EERC-91/17.* (1991).
184. Menegotto, M. & Pinto, P. . Method of Analysis for Cyclically Loaded Reinforced Concrete Plane Frames Including Changes in Geometry and Non-Elastic Behavior of Elements under Combined Normal Force and Bending. in *roceedings, IABSE Symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads* 15–22 (1973).
185. Filippou, F. C., Popov, E. P. & Bertero, V. V. Effects of bond deterioration on hysteretic behavior of reinforced concrete joints. Report No. UBC/EERC-83/19. in *Earthquake Engineering Research Center* (ed. Universidad de California, B.) (1983).
186. Dides, M. A. & de la Llera, J. C. A comparative study of concentrated plasticity models in dynamic analysis of building structures. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* **34**, 1005–1026 (2005).
187. Scott, M. H. & Fenves, G. L. Plastic Hinge Integration Methods for Force-Based Beam–Column Elements. *J. Struct. Eng.* **132**, 244–252 (2006).
188. Neuenhofer, A. y Filippou, F. Evaluation of nonlinear frame finite-element models. **123**, 958–966 (1997).
189. Scott, M. H. & Ryan, K. L. Moment-rotation behavior of force-based plastic hinge elements. *Earthq. Spectra* **29**, 597–607 (2013).
190. Scott, M. H. Numerical integration options for force-based beam-column element in OpenSees. 1–7 (2011).
191. CSI. CSI Analysis Reference Manual. *CSI Analysis Reference Manual* (2019).
192. FEMA - 356. *Prestandard and commentary for seismic rehabilitation of buildings. Report No. FEMA – 356.* (2000) doi:10.4000/books.editionsehess.939.

193. Instituto de Ingeniería UNAM. Base de datos de registros acelerográficos de la Red Sísmica Mexicana. *Universidad Nacional Autónoma de México, México*. <https://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/RedAcelerografica.aspx> (2020).
194. Instituto de Ingeniería UNAM. DEGTRA. (2009).
195. Seismosoft. SeismoSignal. (2019).
196. Tapia, E., García, J. & Rincón, A. Estudio paramétrico del modelado inelástico de contravientos de acero. *Rev. Ing. Sísmica* **74**, 49–74 (2016).
197. Feng, Y., Wu, J., Wang, C. & Meng, S. Evaluating the effect of buckling-restrained brace model on seismic structural responses. *Journal of Earthquake Tsunami*. Vol. 1; pp: 3013 – 3022. *J. Earthq. Tsunami*. **1**, 3013–3022 (2016).
198. Canadian Commission on Building and Fire Codes. *National Building Code of Canada*. (2015).
199. Wen, Y. Method for random vibration of hysteretic systems. *J. Eng. Mech. Div.* **102**, 249–263 (1976).
200. MatWorks Inc. MATLAB and Optimization Toolbox. (2020).