



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TÍTULO:
REHABILITACIÓN ESTRUCTURAL DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA MEDIANTE AISLADORES SÍSMICOS**

**AUTOR:
Dunn Arias, Kevin Bertín**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**TUTOR:
Ing. Hernández Barredo, Jaime Francisco**

**Guayaquil, Ecuador
2016**



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por **Dunn Arias, Kevin Bertín**, como requerimiento para la obtención del Título de **Ingeniero Civil**.

TUTOR (A)

Ing. Hernández Barredo, Jaime Francisco

DIRECTOR DE LA CARRERA

Ing. Stefany Esther Alcívar Bastidas

Guayaquil, a los 21 del mes de Marzo del año 2016



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Kevin Bertín Dunn Arias**

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación **Rehabilitación Estructural de la Facultad de Ingeniería mediante Aisladores Sísmicos** previo a la obtención del Título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación, de tipo **experimental e investigativo** referido.

Guayaquil, a los 21 del mes de Marzo del año 2016

EL AUTOR

Kevin Bertín Dunn Arias



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Yo, **Kevin Bertín Dunn Arias**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación **Rehabilitación Estructural de la Facultad de Ingeniería mediante Aisladores Sísmicos**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 21 del mes de Marzo del año 2016

EL AUTOR:

Kevin Bertín Dunn Arias

ÍNDICE GENERAL

<u>CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1. <u>GENERALIDADES</u>	1
1.2. <u>JUSTIFICACIÓN</u>	1
1.3. <u>OBJETIVOS</u>	2
1.4. <u>ALCANCE</u>	2
<u>CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO</u>	3
2.1. <u>AISLACIÓN SÍSMICA</u>	3
2.2. <u>ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL O PUSHOVER (FEMA 356)</u>	6
2.3. <u>REPRESENTACIÓN BILINEAL DE LA CURVA DE CAPACIDAD (FEMA 273)</u> ..	7
2.4. <u>DESEMPEÑO SÍSMICO</u>	9
2.5. <u>DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE DESEMPEÑO</u>	11
2.5.1. <u>MÉTODO DE LOS COEFICIENTES (ASCE 41-06)</u>	12
2.5.2. <u>MÉTODO ESPECTRO CAPACIDAD: ALTERNATIVA A (FEMA 440)</u>	15
2.5.3. <u>MÉTODO ESPECTRO CAPACIDAD: ALTERNATIVA B (FEMA 440)</u>	20
2.5.4. <u>MÉTODO ESPECTRO CAPACIDAD: ALTERNATIVA C (FEMA 440)</u>	26
2.6. <u>COMPORTAMIENTO LINEAL Y NO LINEAL DEL EDIFICIO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL. (DAVID LOOR, 2015)</u>	32
<u>CAPITULO 3: MODIFICACIONES AL TRABAJO DE GRADO “COMPORTAMIENTO LINEAL Y NO LINEAL DEL EDIFICIO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL.”</u>	38
3.1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	38
3.2. <u>DIAGRAMA MOMENTO – CURVATURA DE COLUMNAS</u>	40
3.3. <u>DIAGRAMA MOMENTO - CURVATURA EN VIGAS</u>	41
3.4. <u>RÓTULAS PLÁSTICAS DE COLUMNAS</u>	41
3.5. <u>CURVA DE CAPACIDAD (PUSHOVER) MODIFICADA</u>	43
3.6. <u>ESPECTRO DE DEMANDA</u>	43
3.7. <u>PUNTO DE DESEMPEÑO:</u>	44
3.7.1. <u>MÉTODO DE LOS COEFICIENTES</u>	44

<u>3.7.2. MÉTODO ESPECTRO DE CAPACIDAD. ALTERNATIVA A (ITERACIÓN DIRECTA)</u>	51
<u>3.7.3. MÉTODO ESPECTRO DE CAPACIDAD. ALTERNATIVA B (ITERACIÓN CON MADRS)</u>	77
<u>3.7.4. MÉTODO ESPECTRO DE CAPACIDAD. ALTERNATIVA C</u>	107
<u>3.8. RESUMEN DE RESULTADOS Y NIVELES DE DESEMPEÑO</u>	134
<u>CAPITULO 4: DESEMPEÑO SISMICO DE LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL CON AISLADORES SISMICOS</u>	137
<u>4.1. INTRODUCCIÓN</u>	137
<u>4.2. PRE DISEÑO DEL SISTEMA DE AISLACIÓN</u>	137
<u>4.3. CURVA DE CAPACIDAD (PUSHOVER) DEL EDIFICIO CON AISLADORES SÍSMICOS</u>	139
<u>4.4. ESPECTRO DE DEMANDA</u>	140
<u>4.5. PUNTO DE DESEMPEÑO</u>	141
<u>4.5.1. MÉTODO DE LOS COEFICIENTES</u>	141
<u>4.5.2. MÉTODO ESPECTRO DE CAPACIDAD. ALTERNATIVA A (ITERACIÓN DIRECTA)</u>	148
<u>4.5.3. MÉTODO ESPECTRO DE CAPACIDAD. ALTERNATIVA B (ITERACIÓN CON MADRS)</u>	173
<u>4.5.4. MÉTODO ESPECTRO DE CAPACIDAD. ALTERNATIVA C</u>	202
<u>4.6. RESUMEN DE DESPLAZAMIENTOS DE EDIFICIO + AISLACION</u>	227
<u>4.7. DETERMINACIÓN DE DESPLAZAMIENTOS EN EL SISTEMA DE AISLACION Y EDIFICIO</u>	228
<u>4.7.1. METODO DE LOS COEFICIENTES (ASCE 41 – 06)</u>	230
<u>4.7.2. METODO ESPECTRO CAPACIDAD ALTERNATIVA A (FEMA 440)</u>	231
<u>4.7.3. METODO ESPECTRO CAPACIDAD ALTERNATIVA B (FEMA 440)</u>	231
<u>4.7.4. METODO ESPECTRO CAPACIDAD ALTERNATIVA C (FEMA 440)</u>	232
<u>4.8. RESUMEN DE RESULTADOS Y NIVELES DE DESEMPEÑO</u>	233
<u>CAPITULO 5: DETALLES CONSTRUCTIVOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE AISLACIÓN PROPUESTO</u>	238
<u>5.1. INTRODUCCIÓN</u>	238
<u>5.2. DETALLE DEL AISLADOR Y CORTES DE LA FACULTAD</u>	239
<u>5.3. FOTOS DE LA FACULTAD INDICANDO DETALLES CONSTRUCTIVOS</u>	241

<u>CAPITULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u>	243
<u>6.1. RESUMEN</u>	243
<u>6.2. CONCLUSIONES</u>	246
<u>6.3. RECOMENDACIONES</u>	246
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	247
<u>ANEXOS</u>	248
<u>APENDICE A</u>	248
<u>DIAGRAMA MOMENTO – CURVATURA</u>	248
<u>APENDICE B</u>	257
<u>PASOS PARA DEFINICIÓN DE ROTULAS PLÁSTICAS DE LAS COLUMNAS EN ETABS 2015</u>	257

ÍNDICE DE FIGURAS

<u>Figura 1. Efecto del uso de aisladores en edificios en las aceleraciones espectrales.....</u>	3
<u>Figura 2. Efecto del periodo y amortiguamiento en el desplazamiento en las Estructuras Aisladas</u>	4
<u>Figura 3. Comportamiento dinámico de una Estructura sin aisladores sísmicos y una Estructura con aisladores sísmicos.....</u>	5
<u>Figura 4. Histéresis de un aislador sísmico</u>	6
<u>Figura 5. Curva de Capacidad (FEMA 356).....</u>	7
<u>Figura 6. Representación bilineal de la Curva de Capacidad (FEMA 273).....</u>	8
<u>Figura 7. Sectorización de la curva de capacidad según NEC 15.</u>	11
<u>Figura 8. Curva Idealizada Fuerza – Desplazamiento</u>	12
<u>Figura 9. Espectro de demanda inicial y Espectro de capacidad (ADRS)</u>	16
<u>Figura 10. Representación Bilineal del Espectro de Capacidad</u>	18
<u>Figura 11. Determinación del máximo desplazamiento esperado usando la Alternativa A.....</u>	20
<u>Figura 12. Espectro de demanda inicial y Espectro de capacidad (ADRS)</u>	21
<u>Figura 13. Representación Bilineal del Espectro de Capacidad</u>	23
<u>Figura 14. Determinación del máximo desplazamiento esperado usando la intersección del MADRS con el espectro de Capacidad – Alternativa B.....</u>	25
<u>Figura 15. Espectro de demanda inicial y Espectro de capacidad (ADRS)</u>	27
<u>Figura 16. Representación Bilineal del Espectro de Capacidad</u>	29
<u>Figura 17. Determinación de Punto de Desempeño usando la Alternativa C ...</u>	31
<u>Figura 18. Espectro de capacidad de la estructura – Dirección X. (Loor, 2015)</u>	34
<u>Figura 19. Espectro de capacidad de la estructura – Dirección Y. (Loor, 2015)</u>	35
<u>Figura 20. Curva de Capacidad - Método de los coeficientes– Dirección X. (Loor, 2015)</u>	35

<u>Figura 21. Curva de Capacidad - Método de los coeficientes – Dirección Y (Loor, 2015)</u>	36
<u>Figura 22. Curva de Capacidad – Dirección X. (Loor, 2015)</u>	37
<u>Figura 23. Curva de Capacidad – Dirección Y. (Loor, 2015)</u>	37
<u>Figura 24. Comparación de Diagramas Momento – Curvatura</u>	41
<u>Figura 25. Diagrama Momento – Curvatura</u>	42
<u>Figura 26. Comparación de Curvas de Capacidades – Sentido X</u>	43
<u>Figura 27. Espectros de Respuesta del NEC 15 para el Suelo Tipo D –</u>	44
<u>Figura 28. Método de los Coeficientes (ASCE 41-06) Sismo Raro – Sentido X</u>	45
<u>Figura 29. Método de los Coeficientes (ASCE 41-06) Sismo Raro – Sentido Y</u>	47
<u>Figura 30. Método de los Coeficientes (ASCE 41-06) Sismo Muy Raro – Sentido X</u>	48
<u>Figura 31. Método de los Coeficientes (ASCE 41-06) Sismo Muy Raro – Sentido Y</u>	50
<u>Figura 32. Espectro de Respuesta del Sismo Raro en formato ADRS</u>	52
<u>Figura 33. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido X</u>	53
<u>Figura 34. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido X</u>	54
<u>Figura 35. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Raro</u>	56
<u>Figura 36. Método Espectro de Capacidad Alternativa A (Sismo Raro) – Sentido X</u>	57
<u>Figura 37. Espectro de Respuesta del Sismo Raro en formato ADRS</u>	58
<u>Figura 38. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido Y</u>	59
<u>Figura 39. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido Y</u>	60
<u>Figura 40. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Raro</u>	62
<u>Figura 41. Método Espectro de Capacidad Alternativa A (Sismo Raro) – Sentido Y</u>	63
<u>Figura 42. Espectro de Respuesta del Sismo Muy Raro en formato ADRS</u>	65

<u>Figura 43. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido X</u>	66
<u>Figura 44. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido X</u>	67
<u>Figura 45. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Muy Raro</u>	69
<u>Figura 46. Método Espectro de Capacidad Alternativa A (Sismo Raro) – Sentido X</u>	70
<u>Figura 47. Espectro de Respuesta del Sismo Muy Raro en formato ADRS</u>	72
<u>Figura 48. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido Y</u>	73
<u>Figura 49. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido Y</u>	74
<u>Figura 50. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Muy Raro</u>	76
<u>Figura 51. Método Espectro de Capacidad Alternativa A (Sismo Muy Raro) – Sentido Y</u>	76
<u>Figura 52. Espectro de Respuesta del Sismo Raro en formato ADRS</u>	78
<u>Figura 53. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido X</u>	79
<u>Figura 54. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido X</u>	80
<u>Figura 55. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Raro</u>	82
<u>Figura 56. Espectro de demanda Modificado (MADRS) – Sismo Raro</u>	83
<u>Figura 57. Método Espectro de Capacidad Alternativa B (Sismo raro) – Sentido X</u>	84
<u>Figura 58. Espectro de Respuesta del Sismo Raro en formato ADRS</u>	86
<u>Figura 59. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido Y</u>	87
<u>Figura 60. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido Y</u>	88
<u>Figura 61. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Raro</u>	90
<u>Figura 62. Espectro de demanda Modificado (MADRS) – Sismo Raro</u>	91

<u>Figura 63. Método Espectro de Capacidad Alternativa B (Sismo raro) – Sentido Y</u>	91
<u>Figura 64. Espectro de Respuesta del Sismo Muy Raro en formato ADRS</u>	93
<u>Figura 65. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido X</u>	94
<u>Figura 66. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido X</u>	95
<u>Figura 67. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Muy Raro</u>	97
<u>Figura 68. Espectro de demanda Modificado (MADRS) – Sismo Muy Raro</u>	98
<u>Figura 69. Método Espectro de Capacidad Alternativa B (Sismo Muy Raro) – Sentido X</u>	99
<u>Figura 70. Espectro de Respuesta del Sismo Muy Raro en formato ADRS</u> ...	101
<u>Figura 71. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido Y</u>	102
<u>Figura 72. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido Y</u> ..	103
<u>Figura 73. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Muy Raro</u>	105
<u>Figura 74. Espectro de demanda Modificado (MADRS) – Sismo Muy Raro</u> ...	106
<u>Figura 75. Método Espectro de Capacidad Alternativa B (Sismo Muy Raro) – Sentido Y</u>	106
<u>Figura 76. Espectro de Respuesta del Sismo Raro en formato ADRS</u>	108
<u>Figura 77. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido X</u>	109
<u>Figura 78. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) para diferentes valores de ductilidad</u>	111
<u>Figura 79. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) y Periodos secantes para diferentes valores de ductilidad</u>	112
<u>Figura 80. Método Espectro de Capacidad Alternativa C (Sismo raro) – Sentido X</u>	113
<u>Figura 81. Espectro de Respuesta del Sismo Raro en formato ADRS</u>	115

<u>Figura 82. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido Y</u>	116
<u>Figura 83. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) para diferentes valores de ductilidad.</u>	117
<u>Figura 84. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) y Periodos secantes para diferentes valores de ductilidad.</u>	118
<u>Figura 85. Método Espectro de Capacidad Alternativa C (Sismo raro) – Sentido Y</u>	119
<u>Figura 86. Espectro de Respuesta del Sismo Muy Raro en formato ADRS</u> ...	121
<u>Figura 87. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido X</u>	122
<u>Figura 88. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) para diferentes valores de ductilidad.</u>	124
<u>Figura 89. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) y Periodos secantes para diferentes valores de ductilidad.</u>	125
<u>Figura 90. Método Espectro de Capacidad Alternativa C (Sismo Muy Raro) – Sentido X</u>	126
<u>Figura 91. Espectro de Respuesta del Sismo Muy Raro en formato ADRS</u> ...	128
<u>Figura 92. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido Y</u>	129
<u>Figura 93. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) para diferentes valores de ductilidad.</u>	130
<u>Figura 94. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) y Periodos secantes para diferentes valores de ductilidad.</u>	131
<u>Figura 95. Método Espectro de Capacidad Alternativa C (Sismo raro) – Sentido Y</u>	132
<u>Figura 96. Sectorización de la Curva de Capacidad - Sentido X (NEC 15)</u> ...	135
<u>Figura 97. Sectorización de la Curva de Capacidad - Sentido Y (NEC 15)</u> ...	135
<u>Figura 98. Histéresis del Aislador Utilizado</u>	139
<u>Figura 99. Curva de Capacidad del Edificio con Aisladores Sísmicos – Sentido X</u>	140

<u>Figura 100. Curva de Capacidad del Edificio con Aisladores Sísmicos – Sentido Y</u>	140
<u>Figura 101. Espectros de Respuesta del NEC 15 para el Suelo Tipo D – Sismo Raro y Sismo muy Raro</u>	141
<u>Figura 102. Método de los Coeficientes (ASCE 41-06) Sismo Raro – Sentido X</u>	142
<u>Figura 104. Método de los Coeficientes (ASCE 41-06) Sismo Raro – Sentido Y</u>	144
<u>Figura 106. Método de los Coeficientes (ASCE 41-06) Sismo Muy Raro – Sentido X</u>	145
<u>Figura 108. Método de los Coeficientes (ASCE 41-06) Sismo Muy Raro – Sentido Y</u>	147
<u>Figura 110. Espectro de Respuesta del Sismo Raro en formato ADRS</u>	149
<u>Figura 111. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido X</u>	150
<u>Figura 112. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido X</u>	151
<u>Figura 113. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Raro</u>	153
<u>Figura 114. Método Espectro de Capacidad Alternativa A (Sismo Raro) – Sentido X</u>	153
<u>Figura 116. Espectro de Respuesta del Sismo Raro en formato ADRS</u>	155
<u>Figura 117. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido Y</u>	156
<u>Figura 118. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido Y</u>	157
<u>Figura 119. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Raro</u>	159
<u>Figura 120. Método Espectro de Capacidad Alternativa A (Sismo Raro) – Sentido Y</u>	160
<u>Figura 122. Espectro de Respuesta del Sismo Muy Raro en formato ADRS</u> .	161
<u>Figura 123. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido X</u>	162

<u>Figura 124. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido X</u>	163
<u>Figura 125. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Muy Raro</u>	165
<u>Figura 126. Método Espectro de Capacidad Alternativa A (Sismo Muy Raro) – Sentido X</u>	166
<u>Figura 128. Espectro de Respuesta del Sismo Muy Raro en formato ADRS</u>	167
<u>Figura 129. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido Y</u>	168
<u>Figura 130. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido Y</u>	169
<u>Figura 131. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Muy Raro</u>	171
<u>Figura 132. Método Espectro de Capacidad Alternativa A (Sismo Muy Raro) – Sentido Y</u>	172
<u>Figura 134. Espectro de Respuesta del Sismo Raro en formato ADRS</u>	174
<u>Figura 135. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido X</u>	175
<u>Figura 136. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido X</u>	176
<u>Figura 137. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Raro</u>	178
<u>Figura 138. Espectro de demanda Modificado (MADRS) – Sismo Raro</u>	179
<u>Figura 139. Método Espectro de Capacidad Alternativa B (Sismo raro) – Sentido X</u>	180
<u>Figura 141. Espectro de Respuesta del Sismo Raro en formato ADRS</u>	182
<u>Figura 142. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido Y</u>	183
<u>Figura 143. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido Y</u>	184
<u>Figura 144. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Raro</u>	186
<u>Figura 145. Espectro de demanda Modificado (MADRS) – Sismo Raro</u>	187
<u>Figura 146. Método Espectro de Capacidad Alternativa B (Sismo raro) – Sentido Y</u>	187

<u>Figura 148. Espectro de Respuesta del Sismo Muy Raro en formato ADRS .</u>	189
<u>Figura 149. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido X</u>	190
<u>Figura 150. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido X</u>	191
<u>Figura 151. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Muy Raro</u>	193
<u>Figura 152. Espectro de demanda Modificado (MADRS) – Sismo Muy Raro.</u>	194
<u>Figura 153. Método Espectro de Capacidad Alternativa B (Sismo Muy Raro) – Sentido X</u>	195
<u>Figura 155. Espectro de Respuesta del Sismo Muy Raro en formato ADRS .</u>	196
<u>Figura 156. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido Y</u>	197
<u>Figura 157. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido Y</u>	198
<u>Figura 158. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Muy Raro</u>	200
<u>Figura 159. Espectro de demanda Modificado (MADRS) – Sismo Muy Raro.</u>	201
<u>Figura 160. Método Espectro de Capacidad Alternativa B (Sismo Muy Raro) – Sentido Y</u>	201
<u>Figura 162. Espectro de Respuesta del Sismo Raro en formato ADRS</u>	203
<u>Figura 163. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido X</u>	204
<u>Figura 164. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) para diferentes valores de ductilidad.</u>	206
<u>Figura 165. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) y Periodos secantes para diferentes valores de ductilidad.</u>	207
<u>Figura 166. Método Espectro de Capacidad Alternativa C (Sismo raro) – Sentido X</u>	208
<u>Figura 168. Espectro de Respuesta del Sismo Raro en formato ADRS</u>	210
<u>Figura 169. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido Y</u>	211

<u>Figura 170. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) para diferentes valores de ductilidad.</u>	212
<u>Figura 171. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) y Periodos secantes para diferentes valores de ductilidad.</u>	213
<u>Figura 172. Método Espectro de Capacidad Alternativa C (Sismo raro) – Sentido Y</u>	214
<u>Figura 174. Espectro de Respuesta del Sismo Muy Raro en formato ADRS</u> .	215
<u>Figura 175. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido X</u>	216
<u>Figura 176. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) para diferentes valores de ductilidad.</u>	218
<u>Figura 177. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) y Periodos secantes para diferentes valores de ductilidad.</u>	219
<u>Figura 178. Método Espectro de Capacidad Alternativa C (Sismo Muy Raro) – Sentido X</u>	220
<u>Figura 180. Espectro de Respuesta del Sismo Muy Raro en formato ADRS</u> .	222
<u>Figura 181. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido Y</u>	223
<u>Figura 182. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) para diferentes valores de ductilidad.</u>	224
<u>Figura 183. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) y Periodos secantes para diferentes valores de ductilidad.</u>	225
<u>Figura 184. Método Espectro de Capacidad Alternativa C (Sismo raro) – Sentido Y</u>	226
<u>Figura 186. Curva de Capacidad del Edificio sin Aisladores Sísmicos – Sentido X</u>	228
<u>Figura 187. Curva de Capacidad del Edificio sin Aisladores Sísmicos – Sentido Y</u>	229
<u>Figura 188. Desplazamientos del Edificio – Sismo Raro y Sismo Muy Raro (Método de los Coeficientes)</u>	230

<u>Figura 189. Desplazamientos del Edificio – Sismo Raro y Sismo Muy Raro (Metodo Espectro Capacidad – Alternativa A)</u>	231
<u>Figura 190. Desplazamientos del Edificio – Sismo Raro y Sismo Muy Raro (Metodo Espectro Capacidad – Alternativa B)</u>	232
<u>Figura 191. Desplazamientos del Edificio – Sismo Raro y Sismo Muy Raro (Metodo Espectro Capacidad – Alternativa C)</u>	233
<u>Figura 192. Sectorización de la Curva de Capacidad - Sentido X (NEC 15)</u> .	236
<u>Figura 193. Sectorización de la Curva de Capacidad - Sentido Y (NEC 15)</u> .	236
<u>Figura 194. Vista posterior de la Facultad – Muro perimetral y Junta</u>	241
<u>Figura 195. Vista Frontal de la Facultad – Junta vertical</u>	242

ÍNDICE DE TABLAS

<u>Tabla 1. Control de daños y Desempeños para edificios. (NEC 15)</u>	10
<u>Tabla 2. Objetivos de desempeño sísmico para las estructuras</u>	11
<u>Tabla 3. Valores del Factor de Modificación, C_0</u>	13
<u>Tabla 4. Valores del Factor de masa efectiva, C_m</u>	14
<u>Tabla 5. Comparación de los Métodos en ambas direcciones (Loo,2015)</u>	36
<u>Tabla 6. Periodos efectivos, Amortiguamientos efectivos, Coeficientes M Y</u> <u>Periodo secantes para diferentes valores de ductilidad (Alternativa C)</u>	110
<u>Tabla 7. Periodos efectivos, Amortiguamientos efectivos, Coeficientes M Y</u> <u>Periodo secantes para diferentes valores de ductilidad (Alternativa C)</u>	117
<u>Tabla 8. Periodos efectivos, Amortiguamientos efectivos, Coeficientes M Y</u> <u>Periodo secantes para diferentes valores de ductilidad (Alternativa C)</u>	123
<u>Tabla 9. Periodos efectivos, Amortiguamientos efectivos, Coeficientes M Y</u> <u>Periodo secantes para diferentes valores de ductilidad (Alternativa C)</u>	130
<u>Tabla 10. Comparación de Desplazamientos máximos según los Métodos</u> <u>Aplicados – Edificio sin aisladores sísmicos</u>	134
<u>Tabla 11. Comparación de Desempeños sísmicos según los métodos Aplicados</u> <u>– Edificio sin aisladores sísmicos</u>	136
<u>Tabla 12. Periodos efectivos, Amortiguamientos efectivos, Coeficientes M Y</u> <u>Periodo secantes para diferentes valores de ductilidad (Alternativa C)</u>	205
<u>Tabla 13. Periodos efectivos, Amortiguamientos efectivos, Coeficientes M Y</u> <u>Periodo secantes para diferentes valores de ductilidad (Alternativa C)</u>	212
<u>Tabla 14. Periodos efectivos, Amortiguamientos efectivos, Coeficientes M Y</u> <u>Periodo secantes para diferentes valores de ductilidad (Alternativa C)</u>	217
<u>Tabla 15. Periodos efectivos, Amortiguamientos efectivos, Coeficientes M Y</u> <u>Periodo secantes para diferentes valores de ductilidad (Alternativa C)</u>	224
<u>Tabla 16. Comparación de Desplazamientos máximos del Edificio según los</u> <u>Métodos Aplicados – Edificio con aisladores sísmicos</u>	227
<u>Tabla 17. Comparación de Desplazamientos máximos del Edificio según los</u> <u>Métodos Aplicados – Edificio con aisladores sísmicos</u>	234

Tabla 18. Comparación de Desplazamientos máximos de los Aisladores
sísmicos según los Métodos Aplicados – Edificio con aisladores sísmicos 235

Tabla 19. Comparación de Desempeños sísmicos del Edificio según los
métodos Aplicados – Edificio con aisladores sísmicos 237

RESUMEN

La Rehabilitación Estructural es requerida cuando una estructura no cumple con los Niveles de Desempeño Sísmico estipulado en los Códigos.

Este trabajo plantea la Rehabilitación Estructural de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil mediante Aisladores Sísmicos. Para esto se realizaron Análisis Estático No Lineales (Pushover) para la obtención de la Capacidad del Edificio.

Para la obtención del Punto de Desempeño se realizaron el Método de los Coeficientes (ASCE 41-06) y el Método Espectro de Capacidad (FEMA 440).

Mediante pruebas se definieron las propiedades no lineales de los aisladores buscando que el edificio mejore su desempeño sísmico tanto para el Sismo Raro como para el Sismo muy Raro del NEC 15.

El Nivel de Desempeño Sísmico para el Sismo Raro fue de Ocupación Inmediata y para el Sismo muy Raro de Seguridad de Vida, por lo que se puede anticipar poco daño ante esos sismos. Además se cumplen con los Niveles de Desempeño estipulados en el NEC 15.

Palabras Claves: rehabilitación, desempeño, sismos, pushover, capacidad, aisladores.

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

El trabajo de grado se encuentra estructurado de la siguiente manera: La primera parte del trabajo se enfoca en algunas correcciones realizadas al trabajo de grado del estudiante David Loor, obteniendo así el desempeño sísmico de la Facultad de Ingeniería. La segunda parte del trabajo se enfoca en mejorar el desempeño de la facultad mediante aisladores sísmicos, por esto se explicara de forma clara que es un aislador sísmico, que ventajas brinda, y como se implementara a este trabajo.

Se realizó un análisis no lineal Pushover para obtener la curva capacidad del edificio con aisladores sísmicos y así calcular el punto de desempeño sísmico de la estructura.

Usando los Métodos Espectro – Capacidad FEMA 440 y el Método de los Coeficientes ASCE/SEI 41-06 se obtuvo el punto de desempeño de la estructura.

Se presentara una comparación de resultados del estado actual del edificio con el edificio rehabilitado con aisladores sísmicos.

Por último se presentaran detalles constructivos para la implementación del sistema de aislación propuesto.

1.2. JUSTIFICACIÓN

La facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil es de los edificios más antiguos de la Universidad, debido a esto es necesario implementar sistemas que ayuden a que las personas tengan seguridad en el edificio cuando se presente un evento sísmico. Este trabajo de grado presenta

la implementación de aisladores sísmicos para así mejorar el desempeño del edificio.

1.3. OBJETIVOS

El objetivo general del trabajo propuesto es de mejorar el comportamiento del edificio de la Facultad de Ingeniería usando aisladores sísmicos en las base.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Establecer un desempeño adecuado del edificio para la demanda sísmica especificada en los Códigos.
- Estudiar el comportamiento de la estructura aislada por medio de análisis lineales y no lineales.
- Determinar las propiedades de los aisladores sísmicos de tal manera que mejoren el desempeño de la estructura.
- Identificar las variaciones estructurales y no estructurales en el edificio de tal manera que se pueda implementar la rehabilitación con aislación sísmica.

1.4. ALCANCE

Obtener las propiedades mecánicas de los aisladores sísmicos que permitan un desempeño adecuado según las normas vigentes.

Describir las modificaciones estructurales y arquitectónicas necesarias para implementar el sistema de aislación sísmica.

CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. AISLACIÓN SÍSMICA

La aislación sísmica tiene como finalidad separar la superestructura de la cimentación para así reducir los efectos de los movimientos de suelo causados por los terremotos. El diseño de edificios con aislación tiene dos (2) objetivos fundamentales: aumentar el periodo fundamental de vibración de la estructura, y proporcionar mayor amortiguamiento.

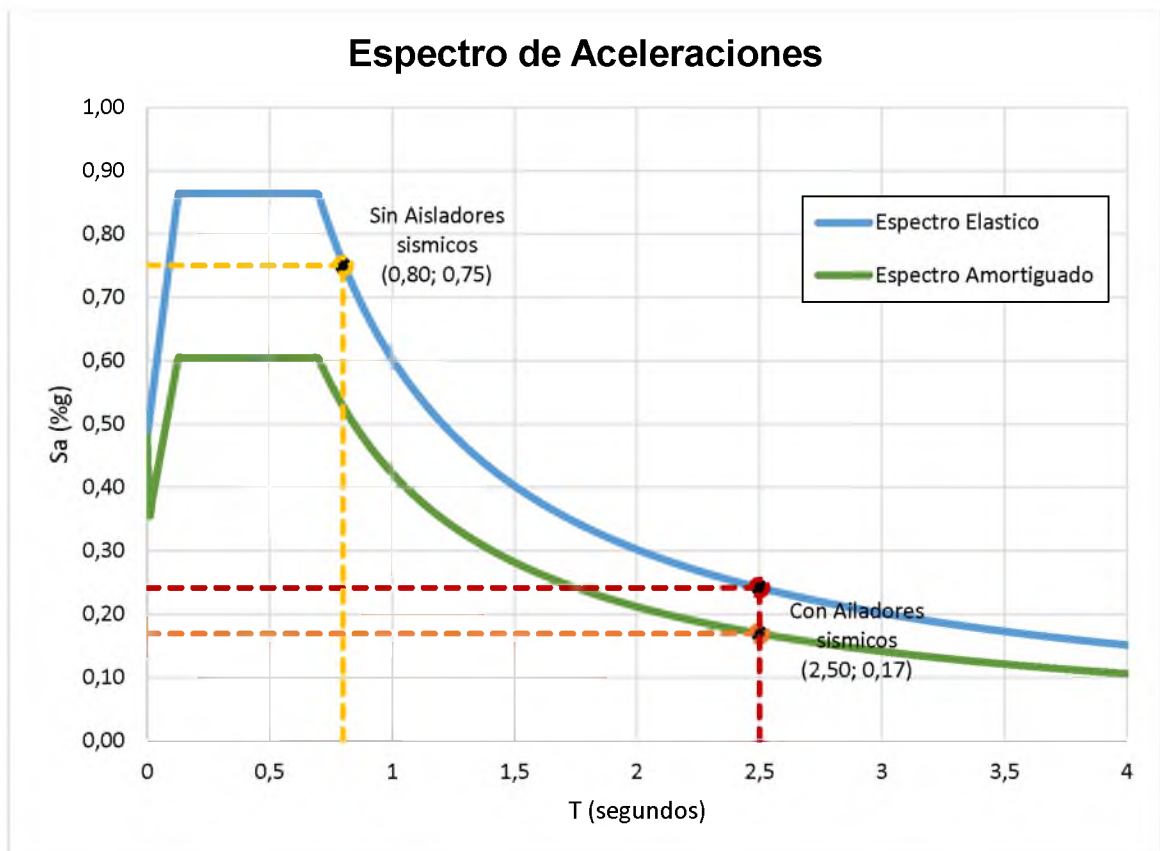


Figura 1. Efecto del uso de aisladores en edificios en las aceleraciones espectrales.

Sin embargo, debido a la alta flexibilidad del sistema de aislación, en este se producen grandes desplazamientos. El sistema de aislación además puede proporcionar mayor amortiguamiento, reduciendo el efecto del cambio de periodo. En la Figura 2 se muestra un ejemplo del efecto en los desplazamientos del sistema debido al cambio de periodo de la estructura; así también se muestra la reducción del desplazamiento debido al aumento de amortiguamiento del sistema.

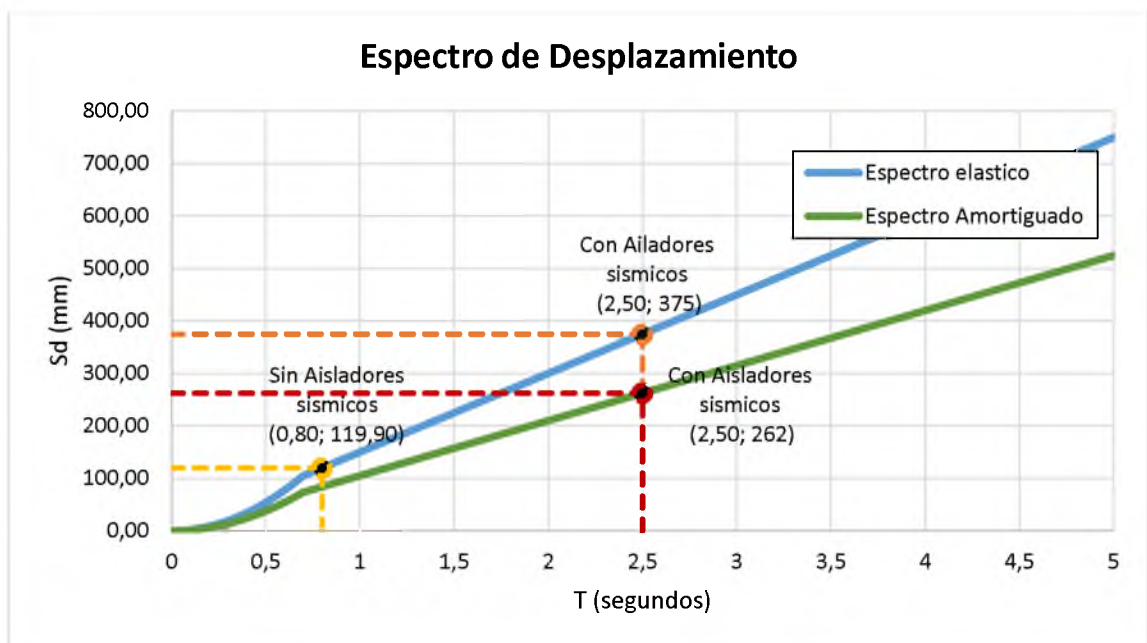


Figura 2. Efecto del periodo y amortiguamiento en el desplazamiento en las Estructuras Aisladas

El aumento de desplazamientos en el sistema no es perjudicial para la estructura ya que estos son tomados en gran parte por la aislación. Por otro lado, los desplazamientos en estructuras sin aislación deberán ser tomados únicamente por la estructura generando daños. En la Figura 3 se muestra esquemáticamente los desplazamientos en estructuras sin aislación y con aislación. En esta figura podemos observar que la estructura sin aislación (izquierda) debe tomar los desplazamientos producidos por el terremoto; por

otro lado, la estructura con aislación (derecha) no se deforma ya que el sistema de aislación toma toda la demanda de desplazamiento.

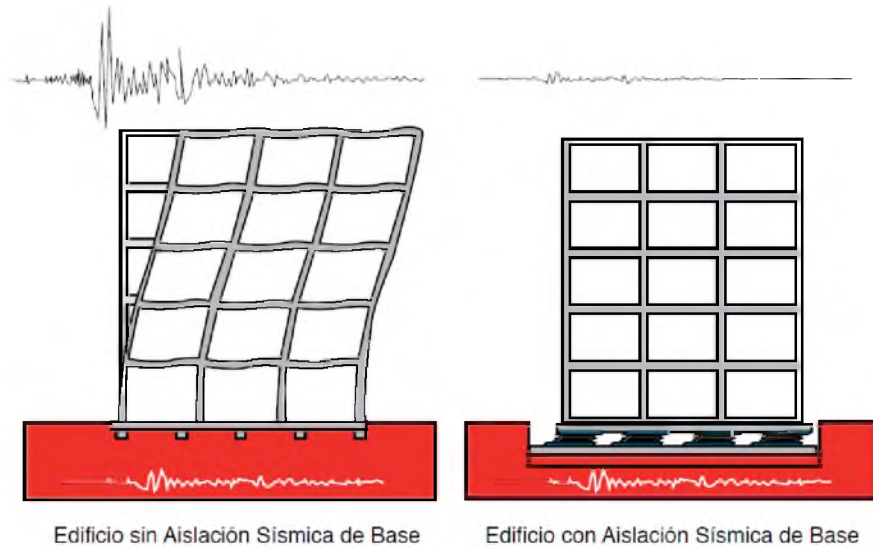


Figura 3. Comportamiento dinámico de una Estructura sin aisladores sísmicos y una Estructura con aisladores sísmicos

lineales de los aisladores. La no linealidad en el comportamiento de los aisladores se evidencia en la histéresis mostrada en la Figura 4. Las características más importantes del comportamiento histérico son: la fuerza de fluencia del aislador (F_y), la rigidez inicial del aislador, K_0 , y la rigidez post-elástica del aislador, K_2 (ver Figura 4)

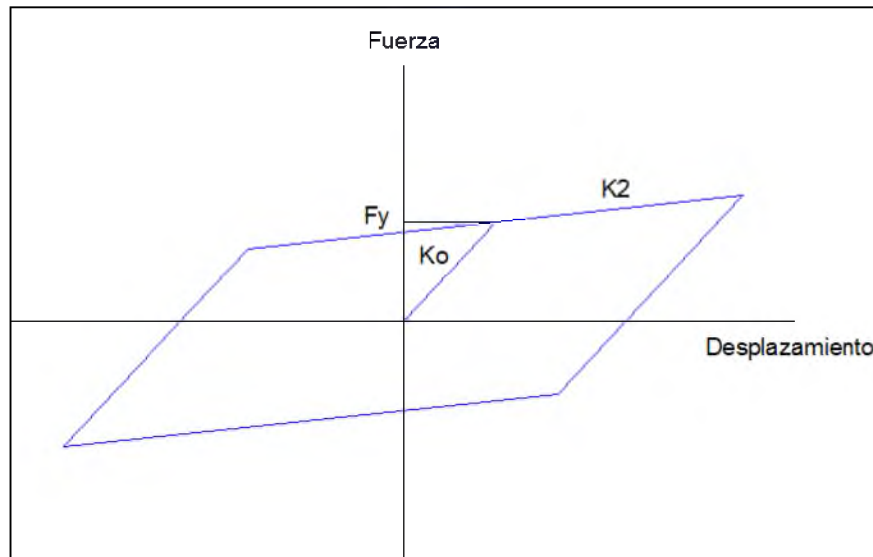


Figura 4. Histéresis de un aislador sísmico

2.2. ANÁLISIS ESTÁTICO NO LINEAL O PUSHOVER (FEMA 356)

El análisis estático no lineal o también conocido como Pushover, consiste en aplicar fuerzas laterales incrementales a la estructura hasta que ésta alcance el colapso. En este método, a medida que incrementan las fuerzas laterales, se producen rótulas plásticas en los elementos, cambiando la rigidez de la estructura y permitiendo una redistribución de la carga. Este proceso continúa hasta que la generación de rótulas plásticas produzca una inestabilidad en la estructura, la cual es considerada como colapso.

Las características de resistencia y rigidez de la estructura están representadas por medio de la Curva de Capacidad, la cual relaciona el cortante basal, V , con el desplazamiento del nivel superior de la estructura, δ , ver Figura 5.

Para generar la Curva de Capacidad se recomiendan tres (3) distribuciones de cargas laterales:

- Distribución según la masa de los pisos.
- Distribución según la altura de los pisos.
- Distribución modal

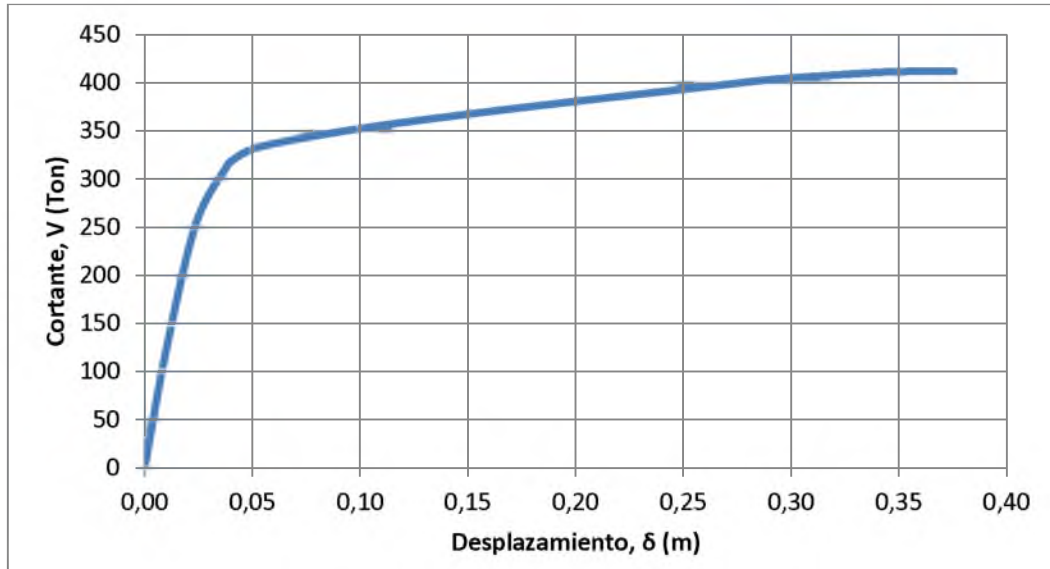


Figura 5. Curva de Capacidad (FEMA 356)

2.3. REPRESENTACIÓN BILINEAL DE LA CURVA DE CAPACIDAD (FEMA 273)

La representación bilineal de la Curva de Capacidad es una simplificación del comportamiento no lineal de la estructura. Para obtener la representación bilineal de la curva de capacidad se deben de seguir los siguientes pasos:

1. Se define el desplazamiento último (D_u) al que puede llegar la estructura antes del colapso, y el correspondiente Cortante Basal definido como Cortante último (V_u), ver en la Figura 6.
2. Se asume la fuerza Cortante de fluencia (V_y^i).
3. Se calcula la rigidez inicial (K_e^i) de la curva bilineal. Esta se obtiene uniendo con una línea recta el punto de origen y un punto de la curva de capacidad real a un cortante de $0.6 V_y$. Luego se obtiene el desplazamiento a $0.6 V_y$ ($D_{0.6}$) ver en la Figura 6. Se obtiene la rigidez inicial con la siguiente ecuación:

$$K_e^i = \frac{0.6 V_y^i}{D_{0.6}}$$

8. Si no se cumple con el error de tolerancia preestablecido, entonces se debe calcular un nuevo valor de Cortante de Fluencia (V_y), con la siguiente ecuación:

$$V_y^{i+1} = V_y^i \times \frac{A_{curva}}{A_{bilineal}}$$

9. Repetir los pasos del 4 al 8.

2.4. DESEMPEÑO SÍSMICO

Es el comportamiento estructural que tiene una estructura ante una demanda sísmica. Se define el nivel de desempeño sísmico determinando el desplazamiento de la estructura ante cierto evento sísmico y comparándolo con ciertos límites de desplazamiento.

La Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC 15) especifica 4 niveles de desempeño: Operacional (1-A), Ocupación Inmediata (1-B), Seguridad de Vida (3-C) y Prevención al Colapso (5-E), ver Tabla 1.

	Nivel de Prevención al Colapso (5-E)	Nivel de Seguridad de Vida (5-E)	Nivel de Ocupación Inmediata (1-B)	Nivel Operacional (1-A)
Daño Global	Severo	Moderado	Ligero	Muy Ligero
General	Pequeña resistencia y rigidez residual, pero columnas y muros cargadores funcionando. Grandes derivas permanentes. Algunas salidas bloqueadas. Parapetos no asegurados que han fallado o tienen alguna falla incipiente. El edificio está cerca del colapso	Algo de resistencia y rigidez residual ha quedado en todos los pisos. Elementos que soportan cargas gravitacionales aún funcionando. Fallas en muros dentro de su plano o parapetos inclinados. Algo de deriva permanente. Daño en paredes divisorias. El Edificio se mantiene económicamente reparable	No hay deriva permanente. La estructura aún mantiene resistencia y rigidez originales. Fisuras menores en fachadas, paredes divisorias, cielos razos así como en elementos estructurales. Los ascensores aún pueden ser encendidos. Sistema contra incendios aún operable	No hay deriva permanente. La estructura aún mantiene la resistencia y rigidez originales. Fisuras menores en fachadas, paredes divisorias, y cielos razos así como en elementos estructurales. Todos los sistemas importantes para una operación normal están en funcionamiento
Componentes No Estructurales	Daño severo	Peligro de caída de objetos mitigado pero bastante daño en sistemas: arquitectónico, mecánico y eléctrico	Equipos y contenido están seguros de manera general, pero algunos no operan debido a fallas mecánicas o falta de utilidad	Ocurre daño insignificante. La energía eléctrica y otros servicios están disponibles, posiblemente por servicios de reserva

Tabla 1. Control de daños y Desempeños para edificios. (NEC 15)

Los límites de desplazamiento, que definen el Nivel de Desempeño, se determinan como fracciones del desplazamiento plástico (Δ_p) de la Curva de Capacidad. La Figura 7 muestra los Niveles de Desempeño y sus rangos.

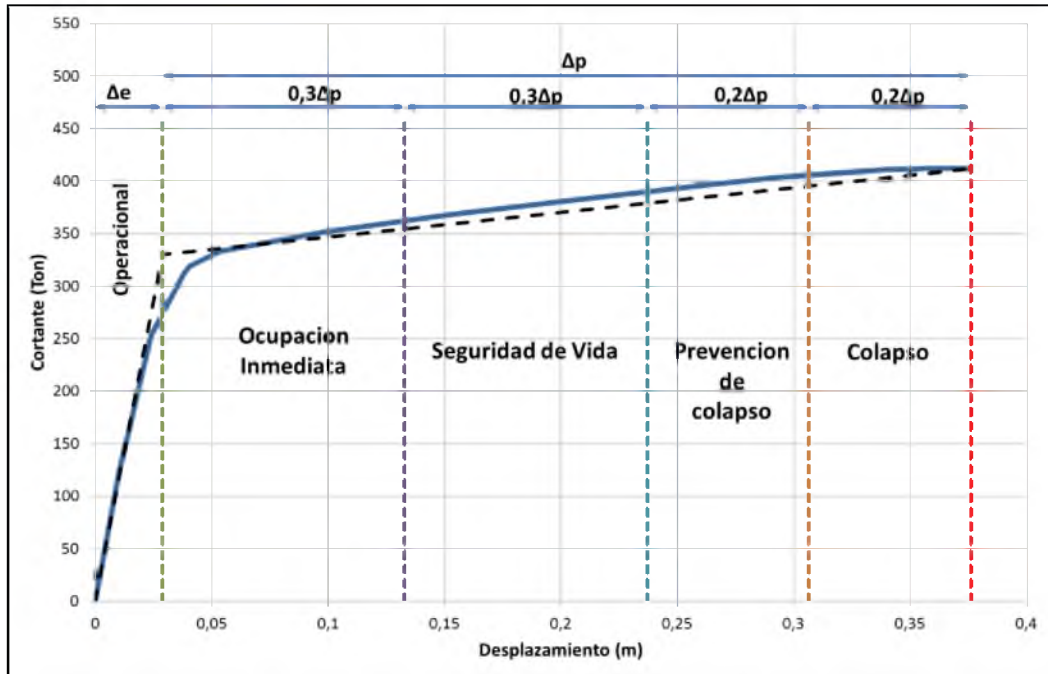


Figura 7. Sectorización de la curva de capacidad según NEC 15.

La Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC 15) establece diferentes niveles de Desempeño Sísmico según el tipo de estructura: normal, especial o esencial. Los niveles de Desempeño se muestran en la siguiente tabla:

Movimiento Sísmico	Nivel de desempeño del edificio			
	Operacional	Ocupación Inmediata	Seguridad de vida	Prevención al colapso
Frecuente	1	0	0	0
Ocasional	2	1	0	0
Raro	-	2	1	0
Muy Raro	-	-	2	1
0. Desempeño Inaceptable				
1. Edificios Normales y Edificios Ocupación Especial				
2. Edificios Esenciales				

Tabla 2. Objetivos de desempeño sísmico para las estructuras

2.5. DETERMINACIÓN DEL PUNTO DE DESEMPEÑO

A continuación se explicarán paso a paso los dos métodos más usados para la obtención del punto de desempeño de una estructura, estos son el Método de

los Coeficientes (ASCE 41-06) y el Método Espectro Capacidad (FEMA 440). Este último presenta tres procedimientos (A, B Y C) para la obtención del punto de desempeño, los cuales serán explicados por separado.

2.5.1. MÉTODO DE LOS COEFICIENTES (ASCE 41-06)

Este método busca estimar el punto de desempeño que tendrá la estructura ante una demanda sísmica, a partir de la curva de capacidad de la misma.

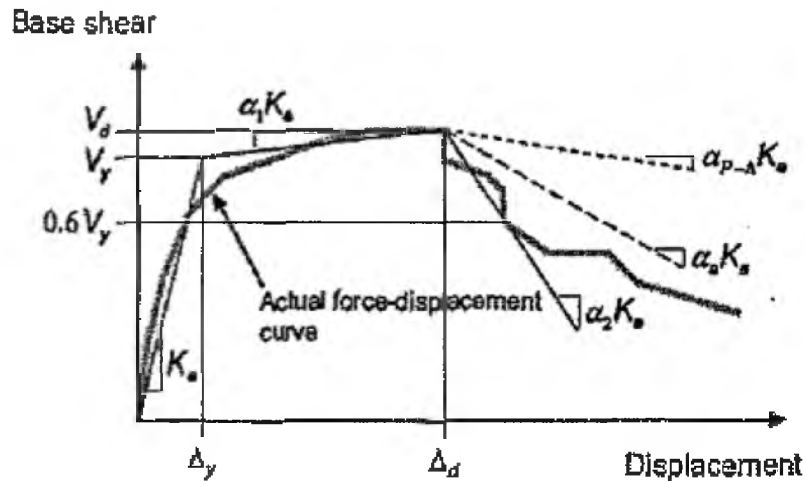


Figura 8. Curva Idealizada Fuerza – Desplazamiento

Los pasos para el cálculo del punto de desempeño son los siguientes (ASCE 41-06, 2010):

1. Generar la Curva de Capacidad para la estructura a analizar.
2. Desarrollar una representación bilineal de la Curva de Capacidad (Ver Capítulo 2.3.). Esto define la rigidez lateral efectiva, K_e , el cortante de Fluencia, V_y , y el desplazamiento de fluencia, D_y .
3. Calcular el periodo fundamental efectivo mediante la siguiente ecuación:

$$T_e = T_i * \sqrt{\frac{K_i}{K_e}}$$

Dónde:

T_i → Periodo Fundamental elástico del edificio

K_i → Rigidez lateral elástica del edificio

K_e → Rigidez lateral efectiva del edificio

4. Obtener el factor de modificación para relacionar el desplazamiento espectral de un sistema equivalente de un solo grado de libertad (SDOF), del desplazamiento de cubierta del edificio de un sistema de múltiples grados de libertad, C_0 , de la Tabla 3.

Table 3-2. Values for Modification Factor C_0 ¹

Number of Stories	Shear Buildings ²		Other Buildings
	Triangular Load Pattern (1.1, 1.2, 1.3)	Uniform Load Pattern (2.1)	Any Load Pattern
1	1.0	1.0	1.0
2	1.2	1.15	1.2
3	1.2	1.2	1.3
5	1.3	1.2	1.4
10+	1.3	1.2	1.5

¹Linear interpolation shall be used to calculate intermediate values.

²Buildings in which, for all stories, story drift decreases with increasing height.

Tabla 3. Valores del Factor de Modificación, C_0 .

(Tabla 3-2, ASCE 41-06)

5. Obtener el factor de masa efectiva, C_m , de la Tabla 4. Alternativamente, C_m se permitirá tomarla como el factor de participación de masa modal efectiva calculada para el modo fundamental usando un análisis de valores propios. C_m , se tomará como 1,0 si el período fundamental, T , es superior a 1,0 segundo.

Table 3-1. Values for Effective Mass Factor C_m ¹

No. of Stories	Concrete Moment Frame	Concrete Shear Wall	Concrete Pier-Spandrel	Steel Moment Frame	Steel Concentric Braced Frame	Steel Eccentric Braced Frame	Other
1-2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
3 or more	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0

¹ C_m shall be taken as 1.0 if the fundamental period, T , is greater than 1.0 sec.

Tabla 4. Valores del Factor de masa efectiva, C_m .

6. Calcular la relación de resistencia, R , con la siguiente ecuación:

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

Dónde:

S_a → Aceleración espectral en el periodo fundamental efectivo del edificio.

F_y → Cortante de fluencia

W → Peso sísmico del edificio

C_m → Factor de masa efectiva

7. Calcular el factor de modificación, C_1 , que relaciona los máximos desplazamientos inelásticos esperados con los desplazamientos calculados para la respuesta elástica lineal. Para periodos menores a 0,2 segundos, C_1 es igual a 0,2. Para periodos superiores a 1,0 segundo, $C_1 = 1,0$.

$$C_1 = 1 + \frac{R - 1}{a T_e^2}$$

Dónde:

R → Relación de resistencia.

a → Factor de clase de sitio

= 130 Clase de sitio A o B

= 90 Clase de sitio C

= 60 Clase de sitio D, E o F

T_e → Periodo fundamental efectivo

8. Calcular el factor de modificación, C_2 , para representar el efecto de forma de histéresis afectada, la degradación de la rigidez cíclica, y el deterioro de la fuerza en respuesta al máximo desplazamiento. Para periodos superiores a 0,7 segundos, $C_2 = 1,0$.

$$C_2 = 1 + \frac{1}{800} \left(\frac{R - 1}{T_e} \right)^2$$

Dónde:

R → Relación de resistencia.

T_e → Periodo fundamental efectivo

9. Calcular el desplazamiento máximo esperado, δ_t , con la siguiente ecuación (Eq. 3-14, ASCE 41-06):

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

2.5.2. MÉTODO ESPECTRO CAPACIDAD: ALTERNATIVA A (FEMA 440)

El objetivo de este método es el de estimar el desplazamiento máximo de un sistema no lineal mediante un sistema lineal equivalente usando el periodo efectivo, T_{eff} , y el amortiguamiento efectivo, β_{eff} .

En esta alternativa, la iteración se realiza para converger directamente en el punto de desempeño.

Para obtener el desplazamiento máximo y la aceleración máxima del edificio para una demanda sísmica se deben de seguir los siguientes pasos:

1. Seleccionar un espectro de demanda ($\beta_i=5\%$).
2. Modificar el espectro seleccionado, para la interacción suelo-estructura (SSI). Esto envuelve ambas reducciones potenciales en ordenadas espectrales para interacción cinemática y una modificación en el sistema de amortiguamiento para el valor inicial, β_i a β_0 , tomando en cuenta el amortiguamiento de la cimentación. Si el amortiguamiento de la cimentación es ignorado, β_0 es igual a β_i .
3. Convertir el espectro seleccionado, al formato espectro de respuesta aceleración – desplazamiento, de acuerdo a lo que indica el ATC-40. El espectro mostrado en la Figura 9. es la demanda ADRS inicial.

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} * S_a \text{ (ATC - 40 Pag. 8 - 12)}$$

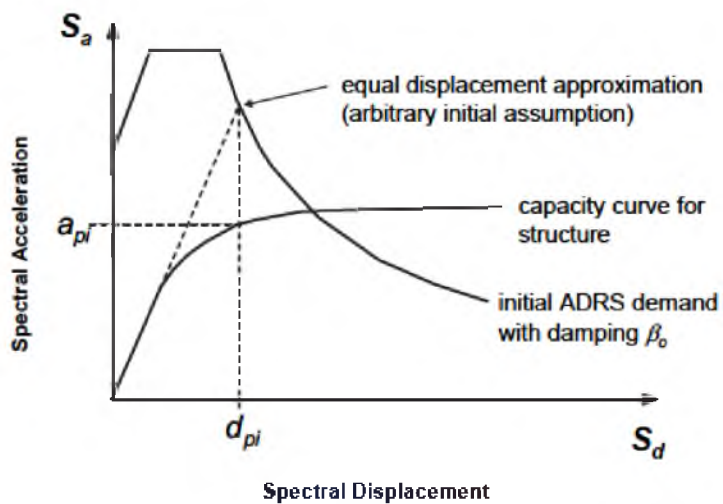


Figura 9. Espectro de demanda inicial y Espectro de capacidad (ADRS)

4. Generar la Curva de Capacidad para la estructura a analizar. Notar que la curva de capacidad (Ver Capítulo 2.2) está en coordenadas Fuerza - Desplazamiento. Convertir a formato ADRS de acuerdo a lo que indica el ATC-40 (ver Figura 10).

$$S_{a_i} = \frac{V_i/W}{\alpha_1} \quad (\text{ATC} - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

$$S_{d_i} = \frac{\delta_i}{PF_1 \times \phi_{1,roof}} \quad (\text{ATC} - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

Dónde:

α_1 → Coeficiente de masa modal

PF_1 → Factor de Participación para el primer modo de la estructura

$\phi_{1,roof}$ → Nivel de amplitud del techo en el primer modo.

V_i → Cualquier punto del Cortante en la Curva de Capacidad

W → Peso sísmico

δ_i → Cualquier punto del Desplazamiento en la Curva de Capacidad

5. Seleccionar un punto de desempeño inicial (aceleración máxima, a_{pi} , y desplazamiento máximo, d_{pi}).
6. Desarrollar una representación bilineal del espectro de capacidad (Ver Capítulo 2.3). Esto define el periodo inicial, T_0 , el desplazamiento de fluencia, d_y , y la aceleración de fluencia, a_y . (Ver Figura 10). Notar que estos parámetros pueden variar para diferentes valores asumidos de a_{pi} y d_{pi} .

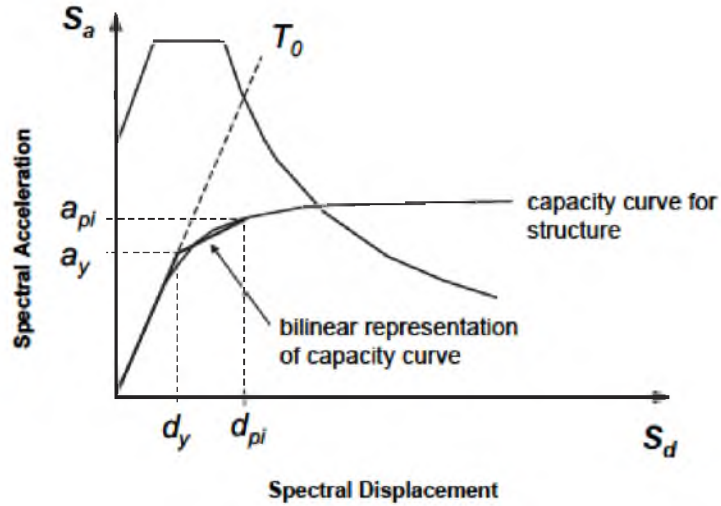


Figura 10. Representación Bilineal del Espectro de Capacidad

7. Para la representación bilineal desarrollada en el paso 6, calcular los valores de rigidez post-elástica, α , y ductilidad, μ :

$$\alpha = \frac{\left(\frac{a_{pi} - a_y}{d_{pi} - d_y}\right)}{\left(\frac{a_y}{d_y}\right)}$$

$$\mu = \frac{d_{pi}}{d_y}$$

8. Usando los valores calculados de rigidez post-elástica, α , y ductilidad, μ , del paso 7, calcular el amortiguamiento efectivo, β_{eff} , y periodo efectivo correspondiente, T_{eff} .

Para $1,0 < \mu < 4,0$:

$$\beta_{eff} = 4,9(\mu - 1)^2 - 1,1(\mu - 1)^3 + \beta_0$$

$$T_{eff} = \{0,20(\mu - 1)^2 - 0,038(\mu - 1)^3 + 1\}T_0$$

Para $4,0 < \mu < 6,5$:

$$\beta_{eff} = 14,0 + 0,32(\mu - 1) + \beta_0$$

$$T_{eff} = [0,28 + 0,13(\mu - 1)]T_0$$

Para $\mu > 6,5$:

$$\beta_{eff} = 19 \left[\frac{0,64(\mu - 1) - 1}{[0,64(\mu - 1)]^2} \right] \left(\frac{T_{eff}}{T_0} \right)^2 + \beta_0$$

$$T_{eff} = \left\{ 0,89 \left[\sqrt{\frac{(\mu - 1)}{1 + 0,05(\mu - 2)}} - 1 \right] + 1 \right\} T_0$$

Las ecuaciones son para cualquier Curva de capacidad, independientemente del tipo de modelo histórico o el valor alfa.

- Usando el amortiguamiento efectivo determinado en el paso 8, ajustar el ADRS inicial para β_{eff} .

$$B = \frac{4}{5,6 - \ln \beta_{eff}(\text{en } \%)}$$

$$(S_a)_\beta = \frac{(S_a)_0}{B(\beta_{eff})}$$

$$(S_d)_\beta = \frac{T^2}{4\pi^2} * (S_a)_\beta$$

- Determinar el desplazamiento máximo esperado, d_i , usando la intersección del periodo efectivo radial, T_{eff} , con el ADRS para β_{eff} . La

máxima aceleración esperada, a_i , es la correspondiente a d_i sobre la curva de capacidad (Ver Figura 11).

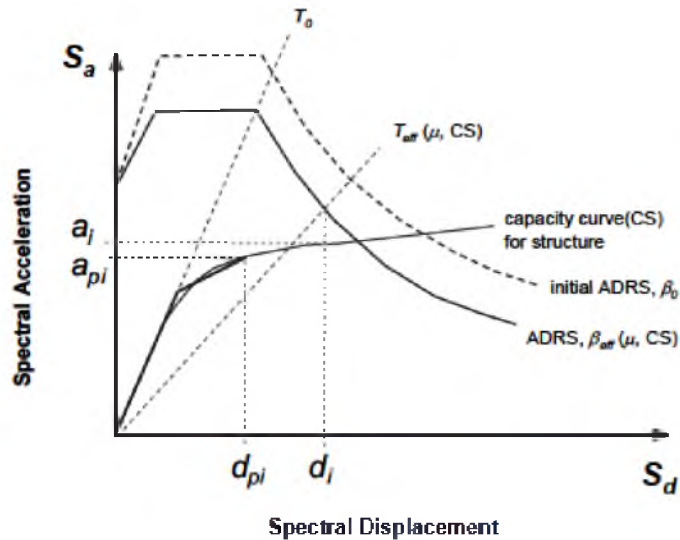


Figura 11. Determinación del máximo desplazamiento esperado usando la Alternativa A.

11. Comparar el máximo desplazamiento esperado, d_i , con la asunción inicial (o previa). Si esta tiene una tolerancia aceptable, el punto de desempeño corresponde a d_i y a_i . Si no tiene una tolerancia aceptable, repetir el proceso desde el paso 5 usando d_i y a_i como punto inicial.

2.5.3. MÉTODO ESPECTRO CAPACIDAD: ALTERNATIVA B (FEMA 440)

El objetivo de este método es el de estimar el desplazamiento máximo de un sistema no lineal mediante un sistema lineal equivalente usando el período efectivo, T_{eff} , y el amortiguamiento efectivo, β_{eff} .

En esta alternativa, el punto de desempeño es definido como la intersección del Espectro de Capacidad con el ADRS modificado (MADRS).

Para obtener el desplazamiento máximo y la aceleración máxima del edificio para una demanda sísmica se deben de seguir los siguientes pasos:

1. Seleccionar un espectro de demanda ($\beta_i=5\%$).
2. Modificar el espectro seleccionado, para la interacción suelo-estructura (SSI). Esto envuelve ambas reducciones potenciales en ordenadas espectrales para interacción cinemática y una modificación en el sistema de amortiguamiento para el valor inicial, β_i a β_0 , tomando en cuenta el amortiguamiento de la cimentación. Si el amortiguamiento de la cimentación es ignorado, β_0 es igual a β_i .
3. Convertir el espectro seleccionado, al formato espectro de respuesta aceleración – desplazamiento, de acuerdo a lo que indica el ATC-40. El espectro mostrado en la Figura 12 es la demanda ADRS inicial.

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} * S_a \text{ (ATC - 40 Pag. 8 - 12)}$$

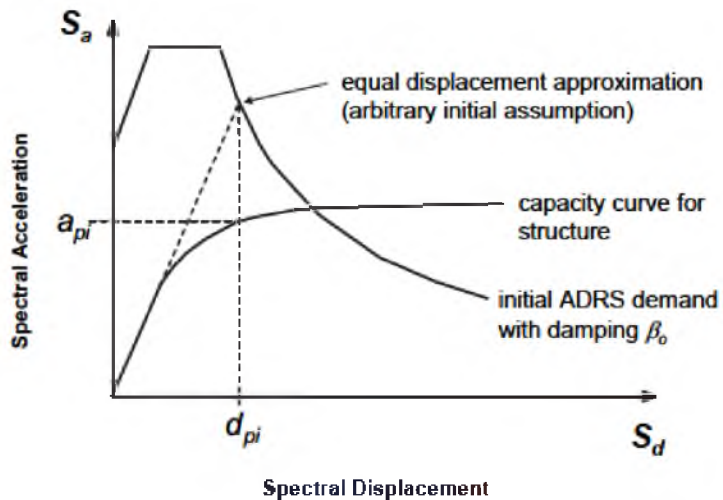


Figura 12. Espectro de demanda inicial y Espectro de capacidad (ADRS)

4. Generar la Curva de Capacidad para la estructura a analizar. Notar que la curva de capacidad (Ver Capítulo 2.2) está en coordenadas Fuerza - Desplazamiento. Convertir a formato ADRS de acuerdo a lo que indica el ATC-40 (ver Figura 12).

$$S_{a_i} = \frac{V_i/W}{\alpha_1} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

$$S_{d_i} = \frac{\delta_i}{PF_1 \times \phi_{1,roof}} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

Dónde:

α_1 → Coeficiente de masa modal

PF_1 → Factor de Participación para el primer modo de la estructura

$\phi_{1,roof}$ → Nivel de amplitud del techo en el primer modo.

V_i → Cualquier punto del Cortante en la Curva de Capacidad

W → Peso sísmico

δ_i → Cualquier punto del Desplazamiento en la Curva de Capacidad

5. Seleccionar un punto de desempeño inicial (aceleración máxima, a_{pi} , y desplazamiento máximo, d_{pi}).
6. Desarrollar una representación bilineal del espectro de capacidad (Ver Capítulo 2.3). Esto define el periodo inicial, T_0 , el desplazamiento de fluencia, d_y , y la aceleración de fluencia, a_y . (Ver Figura 13.). Notar que estos parámetros pueden variar para diferentes valores asumidos de a_{pi} y d_{pi} .

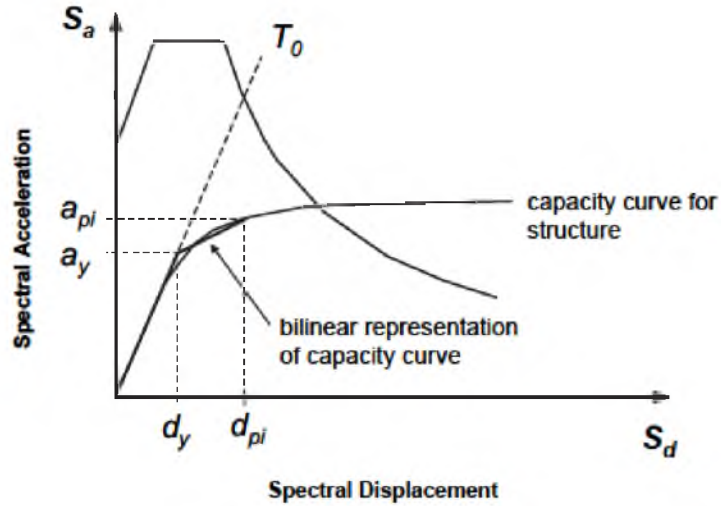


Figura 13. Representación Bilineal del Espectro de Capacidad

7. Para la representación bilineal desarrollada en el paso 6, calcular los valores de rigidez post-elástica, α , y ductilidad, μ :

$$\alpha = \frac{\left(\frac{a_{pi} - a_y}{d_{pi} - d_y}\right)}{\left(\frac{a_y}{d_y}\right)}$$

$$\mu = \frac{d_{pi}}{d_y}$$

8. Usando los valores calculados de rigidez post-elástica, α , y ductilidad, μ , del paso 7, calcular el amortiguamiento efectivo, β_{eff} , y periodo efectivo correspondiente, T_{eff} .

Para $1,0 < \mu < 4,0$:

$$\beta_{eff} = 4,9(\mu - 1)^2 - 1,1(\mu - 1)^3 + \beta_0$$

$$T_{eff} = \{0,20(\mu - 1)^2 - 0,038(\mu - 1)^3 + 1\}T_0$$

Para $4,0 < \mu < 6,5$:

$$\beta_{eff} = 14,0 + 0,32(\mu - 1) + \beta_0$$

$$T_{eff} = [0,28 + 0,13(\mu - 1)]T_0$$

Para $\mu > 6,5$:

$$\beta_{eff} = 19 \left[\frac{0,64(\mu - 1) - 1}{[0,64(\mu - 1)]^2} \right] \left(\frac{T_{eff}}{T_0} \right)^2 + \beta_0$$

$$T_{eff} = \left\{ 0,89 \left[\sqrt{\frac{(\mu - 1)}{1 + 0,05(\mu - 2)}} - 1 \right] + 1 \right\} T_0$$

Las ecuaciones son para cualquier Curva de capacidad, independientemente del tipo de modelo histórico o el valor alfa.

9. Usando el amortiguamiento efectivo determinado en el paso 8, ajustar el ADRS inicial para β_{eff} .

$$B = \frac{4}{5,6 - \ln \beta_{eff}(\text{en } \%)}$$

$$(S_a)_\beta = \frac{(S_a)_0}{B(\beta_{eff})}$$

$$(S_d)_\beta = \frac{T^2}{4\pi^2} * (S_a)_\beta$$

10. Multiplicar solo las ordenadas de aceleración, del ADRS para β_{eff} por el factor de modificación, M , determinado usando el periodo efectivo calculado, T_{eff} , para generar el espectro de respuesta modificado de aceleración – desplazamiento (MADRS).

$$M = \left(\frac{T_{eff}}{T_{sec}}\right)^2 = \left(\frac{T_{eff}}{T_0}\right)^2 \left(\frac{T_0}{T_{sec}}\right)^2$$

$$\left(\frac{T_0}{T_{sec}}\right)^2 = \frac{1 + \alpha(\mu - 1)}{\mu}$$

11. Determinar la aceleración máxima esperada, a_i , y el desplazamiento máximo esperado, d_i , como la intersección del MADRS con la curva de capacidad. (Ver Figura 14.)

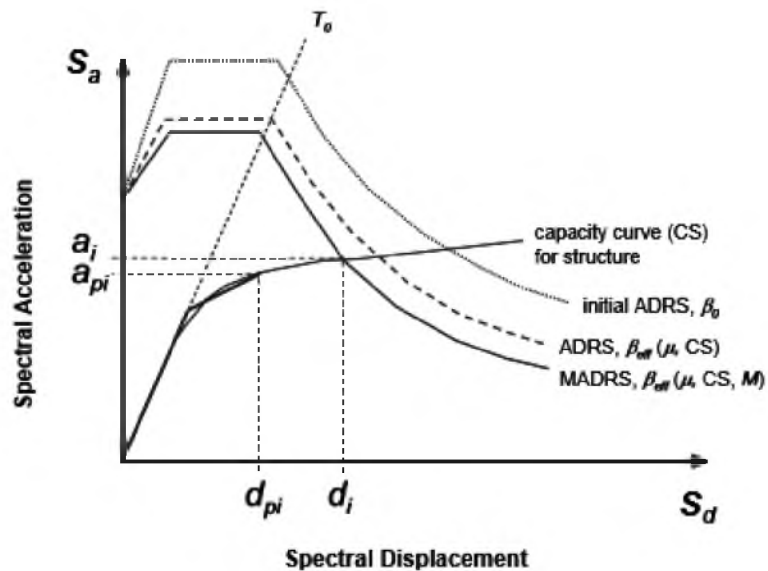


Figura 14. Determinación del máximo desplazamiento esperado usando la intersección del MADRS con el espectro de Capacidad – Alternativa B

12. Comparar el máximo desplazamiento esperado, d_i , con la asunción inicial (o previa). Si esta tiene una tolerancia aceptable, el punto de desempeño corresponde a d_i y a_i . Si no tiene una tolerancia aceptable, repetir el proceso desde el paso 5 usando d_i y a_i como punto inicial.

2.5.4. MÉTODO ESPECTRO CAPACIDAD: ALTERNATIVA C (FEMA 440)

El objetivo de este método es el de estimar el desplazamiento máximo de un sistema no lineal mediante un sistema lineal equivalente usando el periodo efectivo, T_{eff} , y el amortiguamiento efectivo, β_{eff} .

Esta alternativa usa el Espectro de respuesta de aceleración modificado para múltiples soluciones asumidas (a_{pi} y d_{pi}), y las correspondientes ductilidades para generar una línea uniendo los múltiples puntos de desempeño. El punto de desempeño actual está localizado en la intersección de la línea de los posibles puntos de desempeño con la curva de espectro de capacidad.

Para obtener el desplazamiento máximo y la aceleración máxima del edificio para una demanda sísmica se deben de seguir los siguientes pasos:

1. Seleccionar un espectro de demanda ($\beta_i=5\%$).

2. Modificar el espectro seleccionado, para la interacción suelo-estructura (SSI). Esto envuelve ambas reducciones potenciales en ordenadas espectrales para interacción cinemática y una modificación en el sistema de amortiguamiento para el valor inicial, β_i a β_0 , tomando en cuenta el amortiguamiento de la cimentación. Si el amortiguamiento de la cimentación es ignorado, β_0 es igual a β_i .
3. Convertir el espectro seleccionado, al formato espectro de respuesta aceleración – desplazamiento, de acuerdo a lo que indica el ATC-40. El espectro mostrado en la Figura 15 es la demanda ADRS inicial.

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} * S_a \text{ (ATC - 40 Pag. 8 - 12)}$$

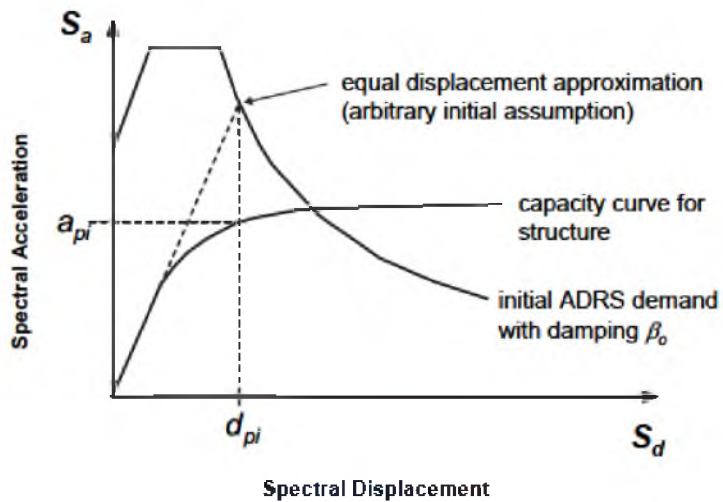


Figura 15. Espectro de demanda inicial y Espectro de capacidad (ADRS)

4. Generar la Curva de Capacidad para la estructura a analizar. Notar que la curva de capacidad (Ver Capítulo 2.2) está en coordenadas Fuerza - Desplazamiento. Convertir a formato ADRS de acuerdo a lo que indica el ATC-40 (ver Figura 15.).

$$S_{a_i} = \frac{V_i/W}{\alpha_1} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

$$S_{d_i} = \frac{\delta_i}{PF_1 \times \phi_{1,roof}} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

Dónde:

α_1 → Coeficiente de masa modal

PF_1 → Factor de Participación para el primer modo de la estructura

$\phi_{1,roof}$ → Nivel de amplitud del techo en el primer modo.

V_i → Cualquier punto del Cortante en la Curva de Capacidad

W → Peso sísmico

δ_i → Cualquier punto del Desplazamiento en la Curva de Capacidad

5. Seleccionar un punto de desempeño inicial (aceleración máxima, a_{pi} , y desplazamiento máximo, d_{pi}).
6. Desarrollar una representación bilineal del espectro de capacidad (Ver Capítulo 2.3). Esto define el periodo inicial, T_0 , el desplazamiento de fluencia, d_y , y la aceleración de fluencia, a_y . (Ver Figura 16.). Notar que estos parámetros pueden variar para diferentes valores asumidos de a_{pi} y d_{pi} .

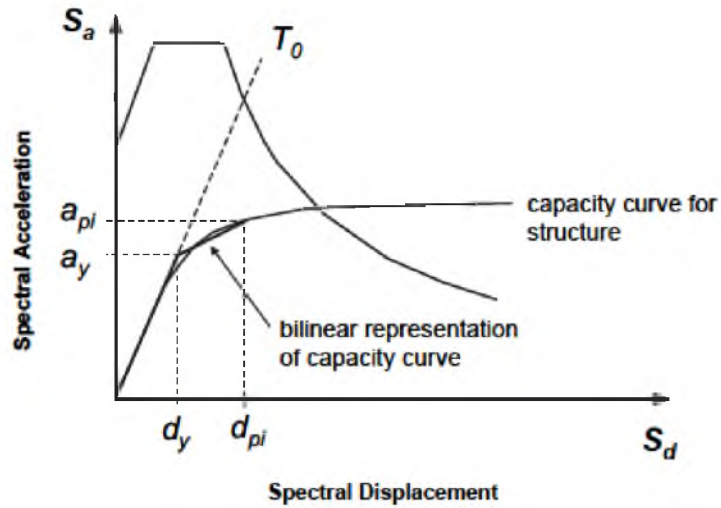


Figura 16. Representación Bilineal del Espectro de Capacidad

7. Para la representación bilineal desarrollada en el paso 6, calcular los valores de rigidez post-elástica, α , y ductilidad, μ :

$$\alpha = \frac{\left(\frac{a_{pi} - a_y}{d_{pi} - d_y}\right)}{\left(\frac{a_y}{d_y}\right)}$$

$$\mu = \frac{d_{pi}}{d_y}$$

8. Usando los valores calculados de rigidez post-elástica, α , y ductilidad, μ , del paso 7, calcular el amortiguamiento efectivo, β_{eff} , y periodo efectivo correspondiente, T_{eff} .

Para $1,0 < \mu < 4,0$:

$$\beta_{eff} = 4,9(\mu - 1)^2 - 1,1(\mu - 1)^3 + \beta_0$$

$$T_{eff} = \{0,20(\mu - 1)^2 - 0,038(\mu - 1)^3 + 1\}T_0$$

Para $4,0 < \mu < 6,5$:

$$\beta_{eff} = 14,0 + 0,32(\mu - 1) + \beta_0$$

$$T_{eff} = [0,28 + 0,13(\mu - 1)]T_0$$

Para $\mu > 6,5$:

$$\beta_{eff} = 19 \left[\frac{0,64(\mu - 1) - 1}{[0,64(\mu - 1)]^2} \right] \left(\frac{T_{eff}}{T_0} \right)^2 + \beta_0$$

$$T_{eff} = \left\{ 0,89 \left[\sqrt{\frac{(\mu - 1)}{1 + 0,05(\mu - 2)}} - 1 \right] + 1 \right\} T_0$$

Las ecuaciones son para cualquier Curva de capacidad, independientemente del tipo de modelo histórico o el valor alfa.

- Usando el amortiguamiento efectivo determinado en el paso 8, ajustar el ADRS inicial para β_{eff} .

$$B = \frac{4}{5,6 - \ln \beta_{eff}(\text{en } \%)}$$

$$(S_a)_\beta = \frac{(S_a)_0}{B(\beta_{eff})}$$

$$(S_d)_\beta = \frac{T^2}{4\pi^2} * (S_a)_\beta$$

10. Multiplicar solo las ordenadas de aceleración, del ADRS para β_{eff} por el factor de modificación, M, determinado usando el periodo efectivo calculado, T_{eff} , para generar el espectro de respuesta modificado de aceleración – desplazamiento (MADRS).

$$M = \left(\frac{T_{eff}}{T_{sec}}\right)^2 = \left(\frac{T_{eff}}{T_0}\right)^2 \left(\frac{T_0}{T_{sec}}\right)^2$$

$$\left(\frac{T_0}{T_{sec}}\right)^2 = \frac{1 + \alpha(\mu - 1)}{\mu}$$

11. Un posible punto de desempeño es generado por la intersección del periodo secante radial, T_{sec} , con el MADRS. (Ver Figura 17.)

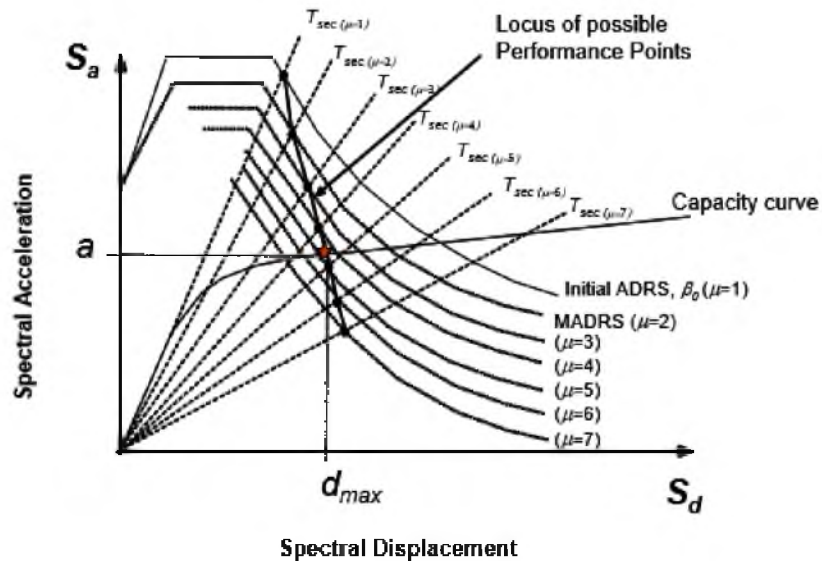


Figura 17. Determinación de Punto de Desempeño usando la Alternativa C

12. Aumentar o disminuir el punto de desempeño asumido y repetir el proceso para generar una serie de posibles puntos de desempeños.

13. El punto de desempeño actual es definido por la intersección de la unión de puntos del paso 12 con la curda de espectro de capacidad. (Ver Figura 17.)

2.6. COMPORTAMIENTO LINEAL Y NO LINEAL DEL EDIFICIO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL. (DAVID LOOR, 2015)

El trabajo “Comportamiento Lineal y No Lineal del Edificio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica Santiago de Guayaquil” (Loor, 2015) consistió en determinar el desempeño sísmico del edificio mencionado mediante un análisis Estático - No Lineal (Pushover). Para alcanzar este objetivo, el estudio se dividió en tres (3) partes: levantamiento estructural, análisis Lineal Dinámico (espectral) y análisis Estático No-Lineal (Pushover).

En el levantamiento estructural tuvo como objetivo obtener la geometría y diseño de los elementos estructurales, así como las propiedades de los materiales que los componen. Las distancias entre columnas y las alturas de pisos fueron tomadas en el sitio y verificadas con planos arquitectónicos. Debido a la ausencia de planos estructurales, las dimensiones de columnas y vigas fueron medidas en sitio. La resistencia del concreto fue estimada por medio del uso de un esclerómetro mecánico, y la posición y diámetro de varillas por medio de Escáner HILTI PS 200 Ferroscan. En el caso del equipamiento

usado para la determinación del diámetro de las varillas, este no entregaba resultados confiables si la superficie examinada poseía grandes recubrimientos o acabados, en este caso la cerámica de los pisos impidió una lectura confiable el armado de las vigas de piso. Por esta razón, se consultó con el diseñador de la estructura, y se diseñaron las vigas con los mismos métodos usados en la época; cabe recalcar que el diseñador mencionó que el acero utilizado era de 4200 kg/cm^2 de esfuerzo de fluencia.

Luego del levantamiento estructural, Loor (2015) realizó un análisis Lineal Dinámico siguiendo las normas vigentes. En este análisis se encontró que las columnas de planta baja a segundo piso alto no cumplían con el criterio de resistencia, ante las solicitaciones de cargas últimas del Código Nec-2015.

Finalmente, se realizó un análisis No-Lineal (Pushover), de la estructura en estudio para obtener su desempeño. Para el cálculo de la Curva de Capacidad, Loor (2015) utilizó tres (3) patrones de cargas distintos: distribución modal, distribución según la altura de los pisos, y distribución según las masas de los pisos; sin embargo, para los cálculos posteriores solo fue usada esta última

Se calculó del desempeño estructural tanto en dirección x (longitudinal) como en y (transversal) mediante dos (2) métodos: Método de los Coeficientes (ASCE 41-13 NSP) y Método Espectro Capacidad (FEMA 440). Se consideró, para ambos métodos, el espectro de demanda proporcionado por el programa de análisis estructural (Etabs) el cual sigue las recomendaciones del ASCE 7-10. Este espectro de demanda fue modificado de tal manera que simule el Espectro de Diseño especificado en la Norma Ecuatoriana de la Construcción.

Los resultados obtenidos mediante el Método Espectro Capacidad (FEMA 440) se muestran en las Figuras 18 y 19 siendo los puntos de desempeño 21.49 cm y 20.31 cm en dirección x y dirección y, respectivamente.

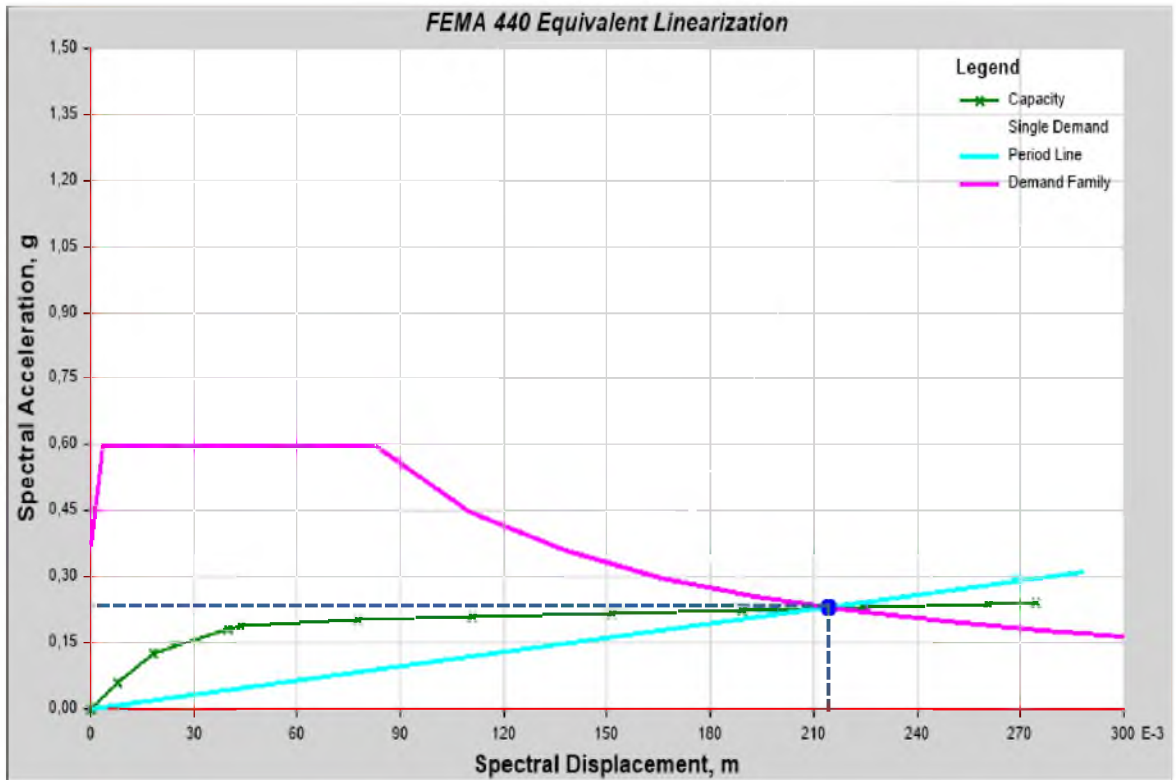


Figura 18. Espectro de capacidad de la estructura – Dirección X. (Loor, 2015)

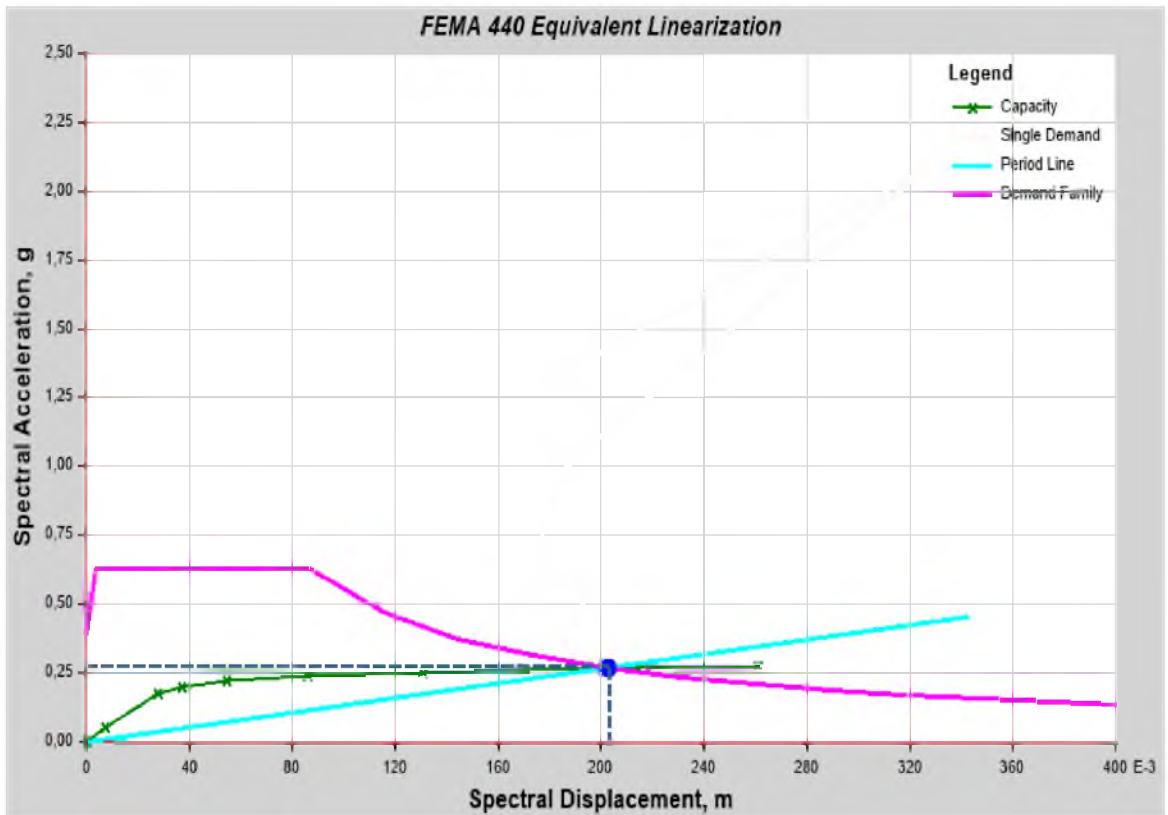


Figura 19. Espectro de capacidad de la estructura – Dirección Y. (Loor, 2015)

Los resultados obtenidos mediante el Método de los Coeficientes (ASCE 41-13) se muestran en las Figuras 20 y 21 siendo los puntos de desempeño 25.41 cm y 22.58 cm en dirección x y dirección y, respectivamente.

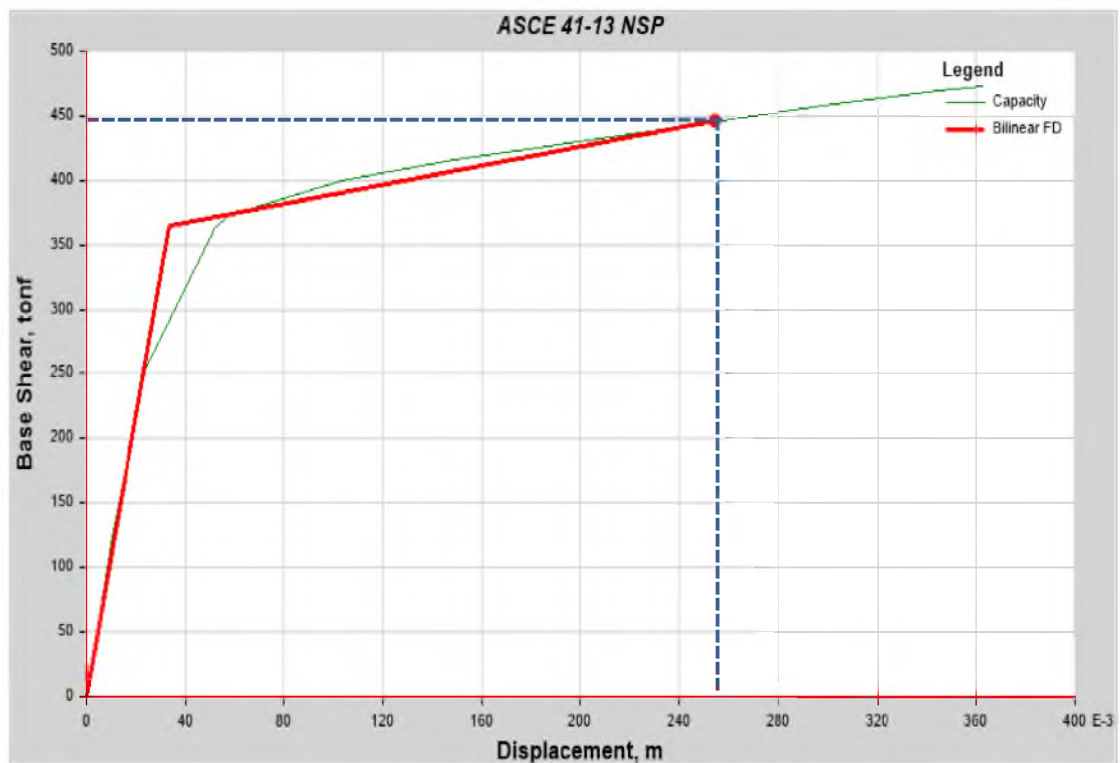


Figura 20. Curva de Capacidad - Método de los coeficientes– Dirección X. (Loor, 2015)

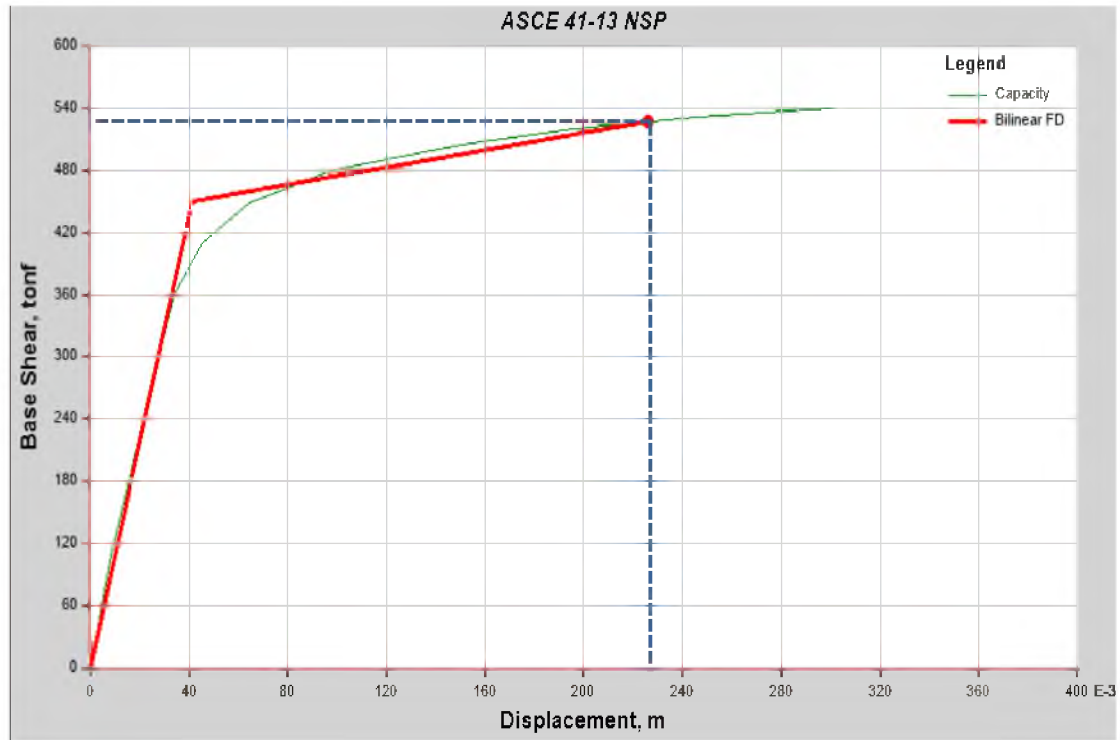


Figura 21. Curva de Capacidad - Método de los coeficientes – Dirección Y (Loor, 2015)

La Tabla 5 muestra un resumen de los resultados obtenidos con los dos (2) métodos, para ambas direcciones.

Comparación entre los dos Métodos aplicados				
	DIRECCIÓN X		DIRECCIÓN Y	
	Desplazamiento (cm)	Cortante (Ton)	Desplazamiento (cm)	Cortante (Ton)
Método Espectro de Capacidad	21.49	434.6	20.31	521.4
Método de los Coeficientes	25.41	445.93	22.578	526.66

Tabla 5. Comparación de los Métodos en ambas direcciones (Loor,2015)

En el trabajo de Loor (2015) se obtuvo el nivel de desempeño con los resultados del Método de los Coeficientes, por ser estos los más críticos. Los niveles de desempeño para la dirección X y Y se muestran en las Figuras 22 y 23, respectivamente.

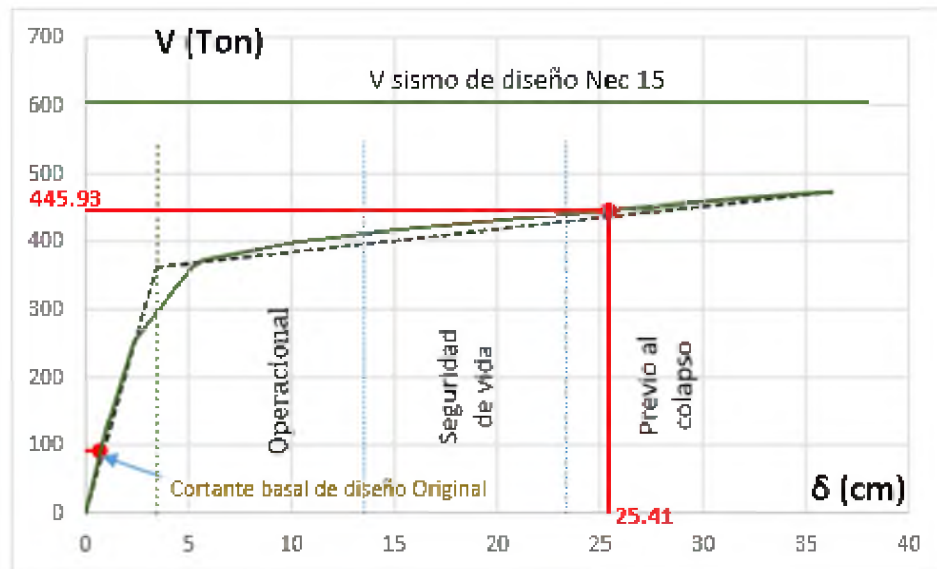


Figura 22. Curva de Capacidad – Dirección X. (Loor, 2015)

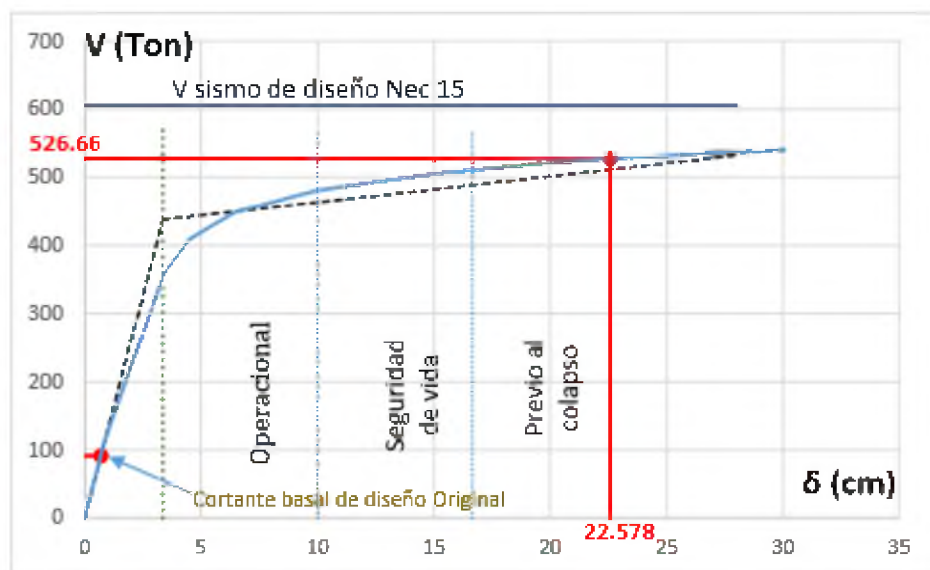


Figura 23. Curva de Capacidad – Dirección Y. (Loor, 2015)

En ambas direcciones el nivel de desempeño de la estructura es de “Previo al Colapso”. Este resultado no cumple con lo especificado en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC 15), el cual indica que para un sismo raro o de diseño la estructura debe de estar en un Nivel de Seguridad de Vida (Ver Capitulo 2.4.).

Debido a esto, una de las recomendación que presento David Loor en su trabajo de grado, fue la rehabilitación estructural mediante aisladores sísmicos, amortiguadores, etc.

CAPITULO 3: MODIFICACIONES AL TRABAJO DE GRADO “COMPORTAMIENTO LINEAL Y NO LINEAL DEL EDIFICIO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL.”

3.1. INTRODUCCIÓN

La protección estructural, basada en aisladores sísmicos, presentados en este trabajo de grado parte de la información presentada en un trabajo anterior realizado por David Loor (2015) titulado “Comportamiento Lineal y No Lineal

del Edificio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica Santiago de Guayaquil”.

En este capítulo se detallarán ciertas modificaciones realizadas al trabajo de David Loor (2015), las cuales se basan en información actualizada el diseño del edificio y en el uso de herramientas computacionales que provean resultados más acordes a las hipótesis usadas en el análisis. Debido a las modificaciones realizadas se recalculará el desempeño sísmico del edificio.

Entre las modificaciones realizadas al trabajo realizado por David Loor (2015) están las siguientes:

- a. Se consideró que el esfuerzo de fluencia de las varillas es de 2800 Kg/cm² en lugar de 4200 Kg/cm². Esta información fue corregida por profesionales consultados los cuales indicaron que en (poner año de construcción de la facultad) no llegaba aún al Ecuador las varillas de 4200 Kg/cm².
- b. Se consideró carga axial en el cálculo del momento-curvatura de las columnas. En el trabajo anterior todos los diagramas momento-curvatura consideraron carga axial cero.
- c. Se consideró el modelo de rótula plástica M2 y M3 desacoplados para las columnas. En el trabajo anterior se consideró en modelo de rótula plástica P-M2-M3 (fuerzas acopladas) cuyos valores son calculados automáticamente por el programa Etabs sin tener relación con los diagramas momento-curvatura presentados en el estudio.
- d. Se consideró el espectro especificado en el NEC 2015 en los métodos estático no lineal del programa Etabs. En el trabajo anterior se utilizó el espectro especificado en ASCE 7-10 modificado de tal manera que se parezca al espectro del NEC 2015

- e. Se realizó análisis estático no lineal para el sismo muy raro (2500 años de periodo de retorno). En el trabajo anterior se realizó el análisis solo para el sismo raro (475 años de periodo de retorno).
- f. Finalmente, se realizaron cálculos “a mano”, los cuales fueron comparados con los resultados presentados en el Etabs. En el trabajo anterior los resultados fueron tomados directamente del programa Etabs.

En las siguientes secciones se explicará en mayor detalle las modificaciones aplicadas y sus resultados. Así también, se justificará, en el caso de las vigas, porqué estas no fueron modificadas. Finalmente, se calculará el desempeño sísmico del edificio bajo las nuevas condiciones.

3.2. DIAGRAMA MOMENTO – CURVATURA DE COLUMNAS

En el caso de las columnas del edificio, todos los diagramas momento-curvatura fueron recalculados. Esto se debe a que había sido considerado anteriormente que el esfuerzo de fluencia de las varillas (f_y) era de 4200 kg/cm^2 cuando en realidad eran de 2800 kg/cm^2 . Además de esto, los diagramas de momento-curvatura calculados en el trabajo anterior, Loor (2015), no consideraron la carga axial correspondiente a cada columna.

Otra causa de diferencias en el diagrama momento-curvatura entre este trabajo y el anterior (Loor, 2015) es el uso de diferentes programas para el cálculo del mismo. En el trabajo anterior se obtuvo los diagramas de momento curvatura por medio del programa SAP 2000; en cambio en este trabajo se los obtuvo por medio del programa KSU_RC. A continuación se presenta la comparación de los diagramas de momento-curvatura para una misma columna a manera de ejemplo:

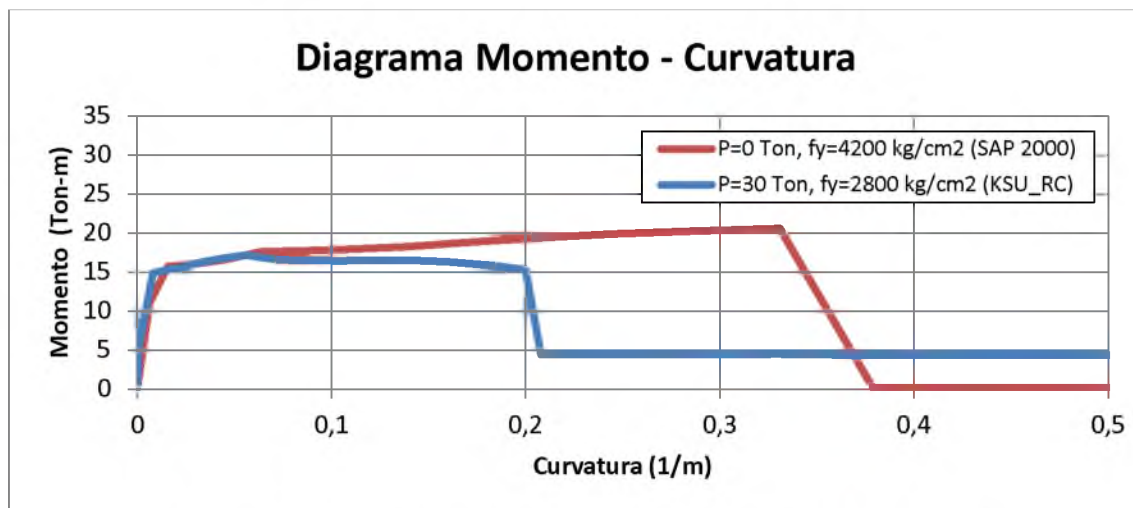


Figura 24. Comparación de Diagramas Momento – Curvatura
Columna de borde de Planta Alta 40x40

Los diagramas de momento-curvatura de todas las columnas consideradas en este estudio se presentan en el ANEXO A.

3.3. DIAGRAMA MOMENTO - CURVATURA EN VIGAS

Los diagramas momento-curvatura de las vigas no fueron modificadas. Esto debido a que el diseño (número y diámetro de varillas) de las vigas no fue obtenido del levantamiento estructural sino que fue calculado de acuerdo a la demanda en las mismas. Esto implica que, sin importar el tipo de acero utilizado, la capacidad de las vigas sería exactamente la misma y por ende el diagrama momento-curvatura no sería muy diferente.

3.4. RÓTULAS PLÁSTICAS DE COLUMNAS

Las rótulas plásticas de las columnas definidas en Loor (2015) fueron tipo P-M2-M3. Este tipo de rótula define una superficie de interacción en la cual los momentos en las dos direcciones y la carga axial están acoplados. Los diagramas momento-curvatura, tanto de Loor (2015) como de este trabajo, fueron calculados para una sola dirección y no fueron estudiados para diferentes cargas axiales por lo que la relación momento X, momento Y y carga axial es desconocida.

El programa Etabs calcula la superficie de interacción P-M2-M3 en base al número de varillas y diámetros ingresados en el programa, pero su precisión no fue comprobada ni en Loor (2015) ni en este trabajo.

Debido a la dificultad de confirmar si el tipo de rótula plástica P-M2-M3 considerada en el Etabs proporcionaba resultados correctos, se decidió utilizar rótulas plásticas tipo M2 y M3 no acopladas, y se consideró constante la carga axial sobre las columnas a lo largo del proceso del Pushover.

Los pasos para definir las rótulas plásticas se describen en el ANEXO B – “DEFINICIÓN DE RÓTULAS PLÁSTICAS”. A continuación se presenta un ejemplo del momento curvatura de una sección.

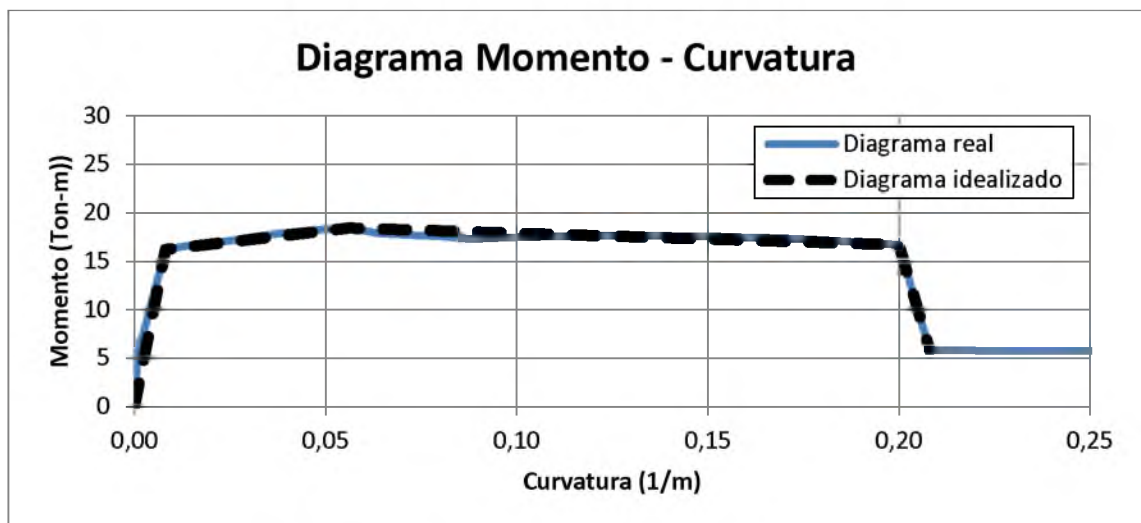


Figura 25. Diagrama Momento – Curvatura

3.5. CURVA DE CAPACIDAD (PUSHOVER) MODIFICADA

Debido a los cambios realizados las Curvas de Capacidad tanto en dirección X como en dirección Y fueron modificadas. A continuación se presentan las curvas modificadas y su comparación con la obtenida en Loor (2015).

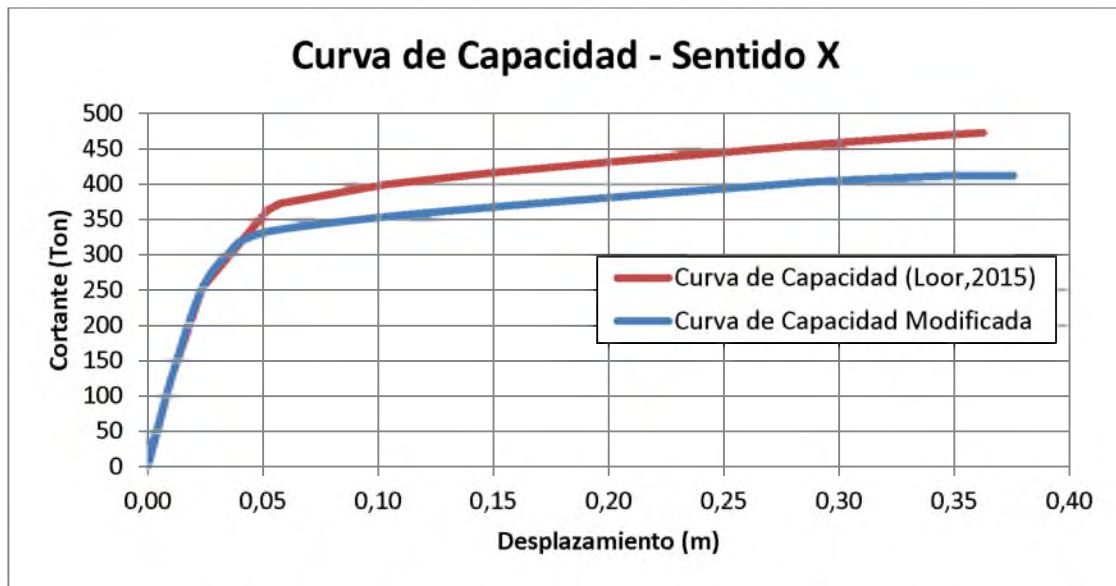


Figura 26. Comparación de Curvas de Capacidades – Sentido X

3.6. ESPECTRO DE DEMANDA

Se utilizará, para este trabajo, los espectros para sismo raro y muy raro especificados en el NEC 15 para suelo tipo D. A continuación se presenta ambos espectros:

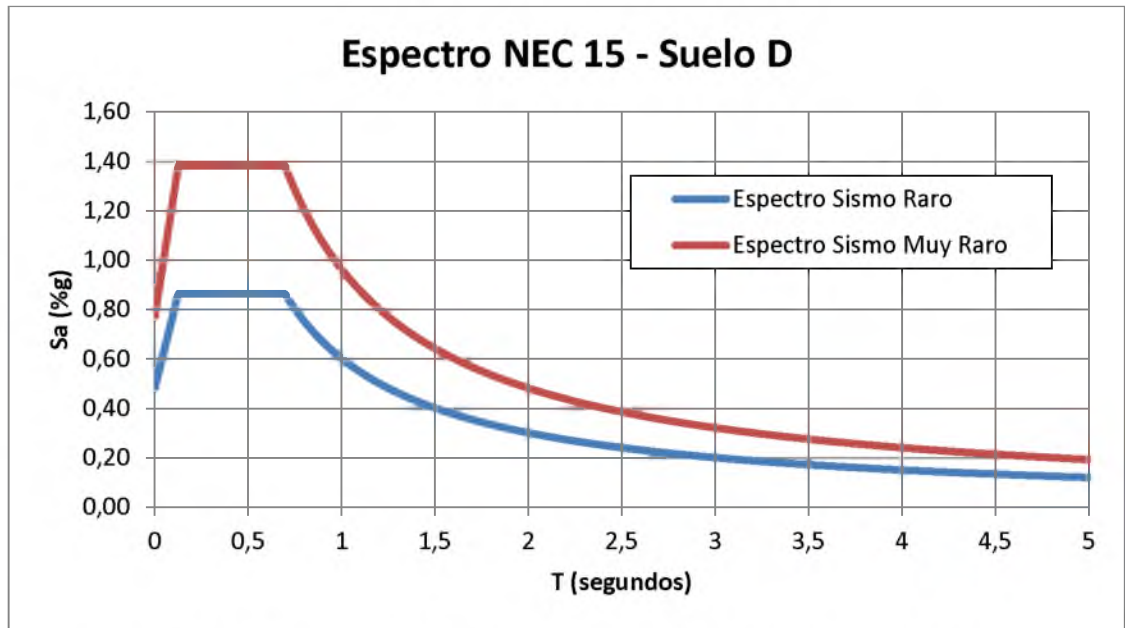


Figura 27. Espectros de Respuesta del NEC 15 para el Suelo Tipo D – Sismo Raro y Sismo muy Raro

3.7. PUNTO DE DESEMPEÑO:

Debido a que tanto la Curva de Capacidad como los Espectros de Demanda fueron modificados en este trabajo, se espera distintos puntos de desempeño. En el Capítulo 2.5 se explican los 4 métodos utilizados para la obtención del punto de desempeño. A continuación se presenta la aplicación de estos métodos para el cálculo de los nuevos puntos de desempeño.

3.7.1. MÉTODO DE LOS COEFICIENTES

Este método fue explicado en el Capítulo 2.5.1 de este trabajo. A continuación se presentan la aplicación del Método de los Coeficientes para los sismos Raro y Muy Raro, tanto para la dirección “x” como para la dirección “y”.

3.7.1.1. SISMO RARO. DIRECCIÓN X

En la Figura 28 se muestra la Curva de Capacidad en dirección “x” del edificio y su correspondiente idealización mediante la Curva Bilineal explicado en el Capítulo 2.3. El punto final de la curva bilineal se lo escoge arbitrariamente, donde este debe de dar igual al desplazamiento esperado, de no ser así se debe de iterar el punto inicial escogido usando el desplazamiento esperado de la iteración anterior.

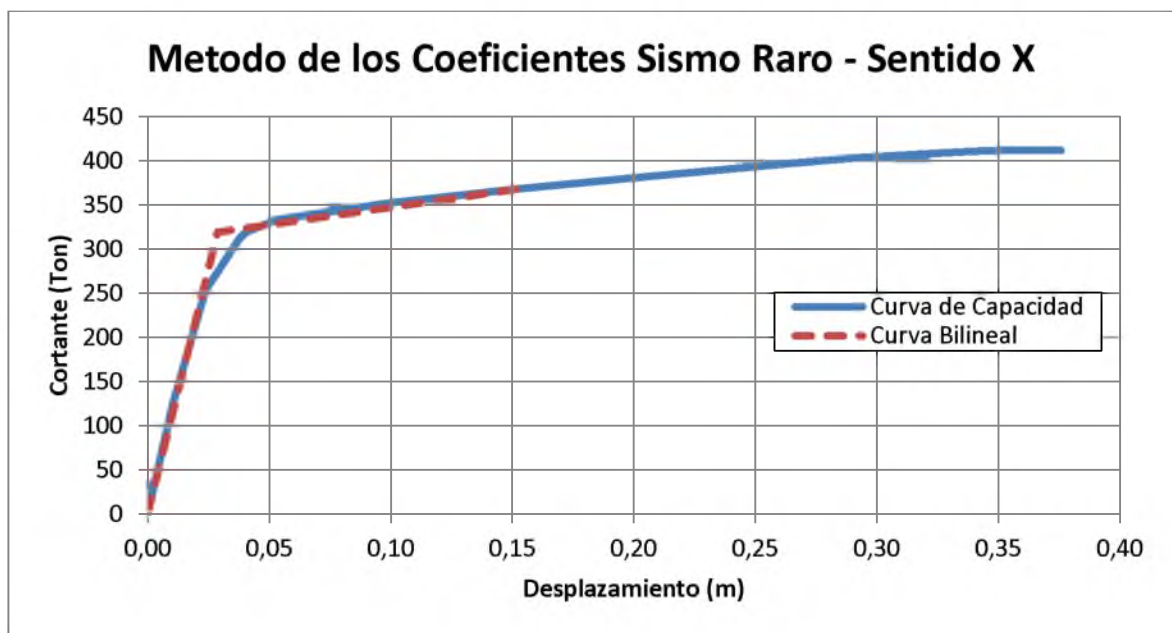


Figura 28. Método de los Coeficientes (ASCE 41-06) Sismo Raro – Sentido X

$$T_i = 0.706 \text{ seg} \quad (\text{Modelo estructural de ETABS 2015})$$

$$K_i = \frac{123,3 \text{ Ton}}{0,01015 \text{ m}} = 12155,86 \text{ Ton/m} \quad (\text{Ver Capitulo 2.5})$$

$$K_e = \frac{319 \text{ Ton}}{0,028758 \text{ m}} = 11092,566 \text{ Ton/m} \quad (\text{Ver Capitulo 2.5})$$

$$T_e = T_i * \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} = 0,74 \text{ seg} \quad (\text{Eq. 3 – 13 ASCE 41 – 06})$$

$$C_0 = 1,3 \quad (\text{Tabla 3 – 2 ASCE 41 – 06})$$

$$S_a = 0,784 \text{ (Ver Capitulo 2.5)}$$

$$V_y = 319 \text{ Ton (Cortante de fluencia, ver Capitulo 2.5)}$$

$$W = 2195 \text{ Ton (Peso sismico del edificio, ETABS 2015)}$$

$$C_m = 1 \text{ (Tabla 3 – 1 ASCE 41 – 06)}$$

$$\alpha = 60 \text{ (Suelo tipo D, ver Capitulo 2.5)}$$

$$R = \frac{S_a}{V_y * W} * C_m = 5,394 \text{ (Ver Capitulo 2.5)}$$

$$C_1 = 1 + \frac{R-1}{\alpha T^2} = 1,134 \text{ (Ver Capitulo 2.5)}$$

$$C_2 = 1 \text{ (Ver Capitulo 2.5)}$$

$$\partial_t = C_0 C_1 C_2 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g = 0,1568 \text{ mts (Eq. 3 – 14 ASCE 41 – 06)}$$

3.7.1.2. SISMO RARO. DIRECCIÓN Y

En la Figura 29 se muestra la Curva de Capacidad en dirección “y” del edificio y su correspondiente idealización mediante la Curva Bilineal explicado en el Capítulo 2.3. El punto final de la curva bilineal se lo escoge arbitrariamente, donde este debe de dar igual al desplazamiento esperado, de no ser así se debe de iterar el punto inicial escogido usando el desplazamiento esperado de la iteración anterior.

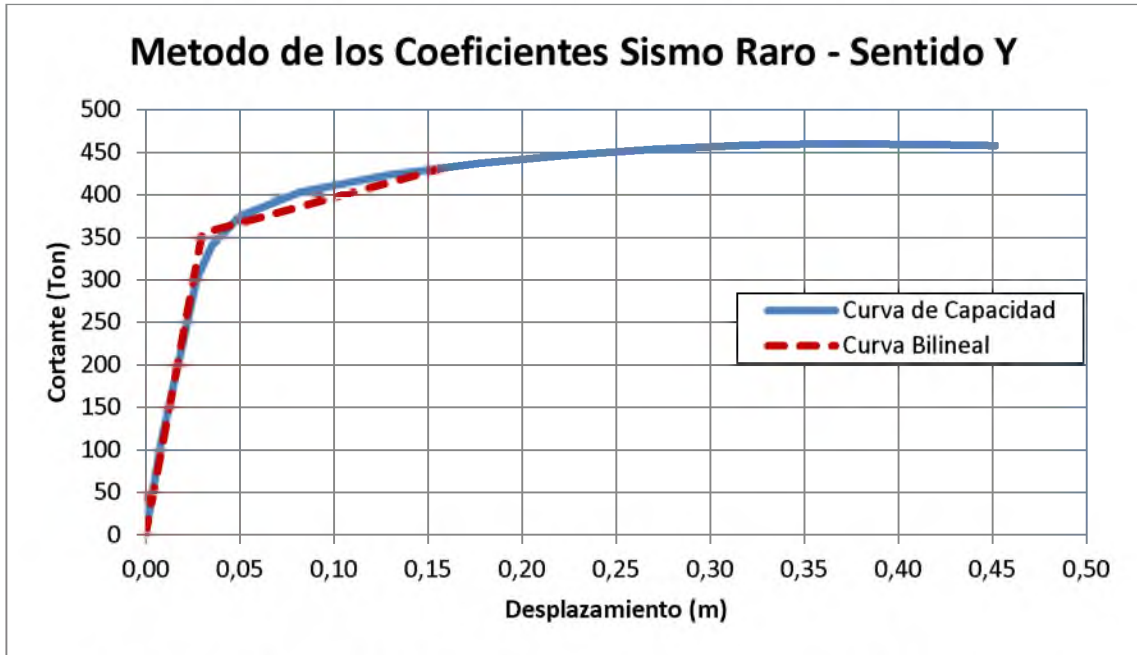


Figura 29. Método de los Coeficientes (ASCE 41-06) Sismo Raro – Sentido Y

$$T_i = 0,743 \text{ seg} \quad (\text{Modelo estructural de ETABS 2015})$$

$$K_i = \frac{107,95 \text{ Ton}}{0,00812 \text{ m}} = 13283,97 \text{ Ton/m} \quad (\text{Ver Capitulo 2.5})$$

$$K_e = \frac{355,10 \text{ Ton}}{0,03 \text{ m}} = 11836,66 \text{ Ton/m} \quad (\text{Ver Capitulo 2.5})$$

$$T_e = T_i * \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} = 0,787 \text{ seg} \quad (\text{Eq. 3 – 13 ASCE 41 – 06})$$

$$C_0 = 1,2 \quad (\text{Tabla 3 – 2 ASCE 41 – 06})$$

$$S_a = 0,773 \quad (\text{Ver Capitulo 2.5})$$

$$V_y = 355,10 \text{ Ton} \quad (\text{Cortante de fluencia, ver Capitulo 2.5})$$

$$W = 2195 \text{ Ton} \quad (\text{Peso sismico del edificio, ETABS 2015})$$

$$C_m = 1 \quad (\text{Tabla 3 – 1 ASCE 41 – 06})$$

$$\alpha = 60 \quad (\text{Suelo tipo D, ver Capitulo 2.5})$$

$$R = \frac{S_a}{V_y * W} * C_m = 4,78 \quad (\text{Ver Capitulo 2.5})$$

$$C_1 = 1 + \frac{R-1}{\alpha T^2} = 1,102 \text{ (Ver Capitulo 2.5)}$$

$$C_2 = 1 \text{ (Ver Capitulo 2.5)}$$

$$\partial_t = C_0 C_1 C_2 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g = 0,157 \text{ mts (Eq. 3 - 14 ASCE 41 - 06)}$$

3.7.1.3. SISMO MUY RARO. DIRECCIÓN X

En la Figura 30 se muestra la Curva de Capacidad en dirección “x” del edificio y su correspondiente idealización mediante la Curva Bilineal explicado en el Capítulo 2.3. El punto final de la curva bilineal se lo escoge arbitrariamente, donde este debe de dar igual al desplazamiento esperado, de no ser así se debe de iterar el punto inicial escogido usando el desplazamiento esperado de la iteración anterior.

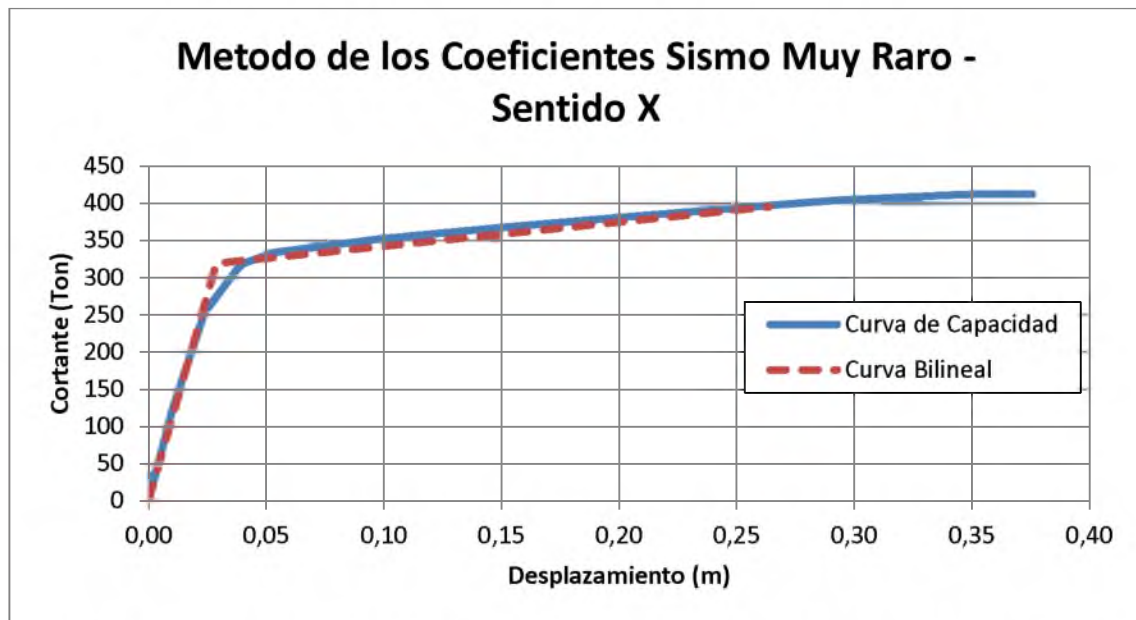


Figura 30. Método de los Coeficientes (ASCE 41-06) Sismo Muy Raro – Sentido X

$$T_i = 0.706 \text{ seg (Modelo estructural de ETABS 2015)}$$

$$K_i = \frac{123,3 \text{ Ton}}{0,01015 \text{ m}} = 12155,86 \text{ Ton/m (Ver Capitulo 2.5)}$$

$$K_e = \frac{319 \text{ Ton}}{0,028758 \text{ m}} = 11092,566 \text{ Ton/m (Ver Capitulo 2.5)}$$

$$T_e = T_i * \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} = 0,74 \text{ seg (Eq. 3 - 13 ASCE 41 - 06)}$$

$$C_0 = 1,3 \text{ (Tabla 3 - 2 ASCE 41 - 06)}$$

$$S_a = 1,304 \text{ (Ver Capitulo 2.5)}$$

$$V_y = 319 \text{ Ton (Cortante de fluencia, ver Capitulo 2.5)}$$

$$W = 2195 \text{ Ton (Peso sismico del edificio, ETABS 2015)}$$

$$C_m = 1 \text{ (Tabla 3 - 1 ASCE 41 - 06)}$$

$$\alpha = 60 \text{ (Suelo tipo D, ver Capitulo 2.5)}$$

$$R = \frac{S_a}{V_y * W} * C_m = 8,97 \text{ (Ver Capitulo 2.5)}$$

$$C_1 = 1 + \frac{R-1}{\alpha T^2} = 1,243 \text{ (Ver Capitulo 2.5)}$$

$$C_2 = 1 \text{ (Ver Capitulo 2.5)}$$

$$\partial_t = C_0 C_1 C_2 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g = 0,264 \text{ mts (Eq. 3 - 14 ASCE 41 - 06)}$$

3.7.1.4. SISMO MUY RARO. DIRECCIÓN Y

En la Figura 31 se muestra la Curva de Capacidad en dirección “y” del edificio y su correspondiente idealización mediante la Curva Bilineal explicado en el Capítulo 2.3. El punto final de la curva bilineal se lo escoge arbitrariamente, donde este debe de dar igual al desplazamiento esperado, de no ser así se debe de iterar el punto inicial escogido usando el desplazamiento esperado de la iteración anterior.

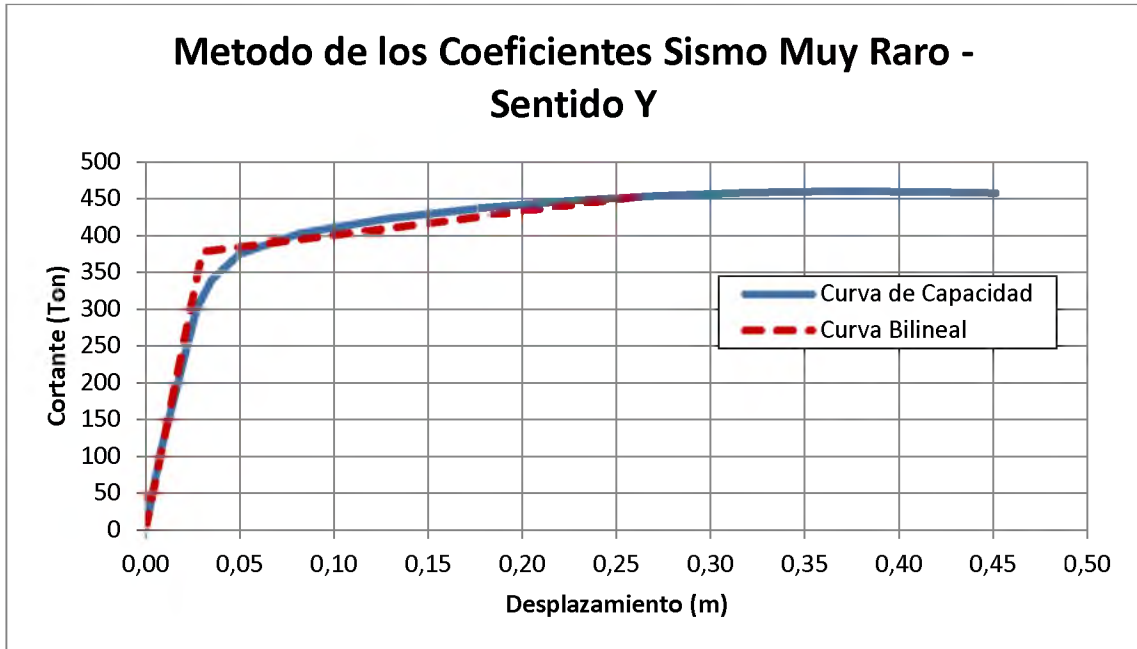


Figura 31. Método de los Coeficientes (ASCE 41-06) Sismo Muy Raro – Sentido Y

$$T_i = 0,743 \text{ seg} \quad (\text{Modelo estructural de ETABS 2015})$$

$$K_t = \frac{107,95 \text{ Ton}}{0,00812 \text{ m}} = 13283,97 \text{ Ton/m} \quad (\text{Ver Capitulo 2.5})$$

$$K_e = \frac{378 \text{ Ton}}{0,03 \text{ m}} = 12600 \text{ Ton/m} \quad (\text{Ver Capitulo 2.5})$$

$$T_e = T_i * \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} = 0,763 \text{ seg} \quad (\text{Eq. 3 – 13 ASCE 41 – 06})$$

$$C_0 = 1,2 \quad (\text{Tabla 3 – 2 ASCE 41 – 06})$$

$$S_a = 1,27 \quad (\text{Ver Capitulo 2.5})$$

$$V_y = 378 \text{ Ton} \quad (\text{Cortante de fluencia, ver Capitulo 2.5})$$

$$W = 2195 \text{ Ton} \quad (\text{Peso sismico del edificio, ETABS 2015})$$

$$C_m = 1 \quad (\text{Tabla 3 – 1 ASCE 41 – 06})$$

$$\alpha = 60 \quad (\text{Suelo tipo D, ver Capitulo 2.5})$$

$$R = \frac{S_a}{V_y * W} * C_m = 7,37 \quad (\text{Ver Capitulo 2.5})$$

$$C_1 = 1 + \frac{R-1}{\alpha T^2} = 1,18 \quad (\text{Ver Capitulo 2.5})$$

$$C_2 = 1 \quad (\text{Ver Capitulo 2.5})$$

$$\partial_t = C_0 C_1 C_2 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g = 0,26 \text{ mts (Eq. 3 – 14 ASCE 41 – 06)}$$

3.7.2. MÉTODO ESPECTRO DE CAPACIDAD. ALTERNATIVA A (ITERACIÓN DIRECTA).

En el Capítulo 2.5.2 de este trabajo se explica detalladamente la aplicación del Método Espectro de Capacidad Alternativa A especificado en el FEMA 440. A continuación se muestran los resultados obtenidos del uso de este método para hallar el punto de desempeño del Edificio de la Facultad de Ingeniería tanto para el sismo raro como para el sismo muy raro.

3.7.2.1. SISMO RARO. DIRECCIÓN X

Se transformó el espectro de demanda para el Sismo Raro al formato Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento (ADRS) por medio de la siguiente fórmula:

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} * S_a \text{ (ATC – 40 Pag. 8 – 12)}$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento en formato ADRS para el Sismo Raro se muestra en la Figura 32.

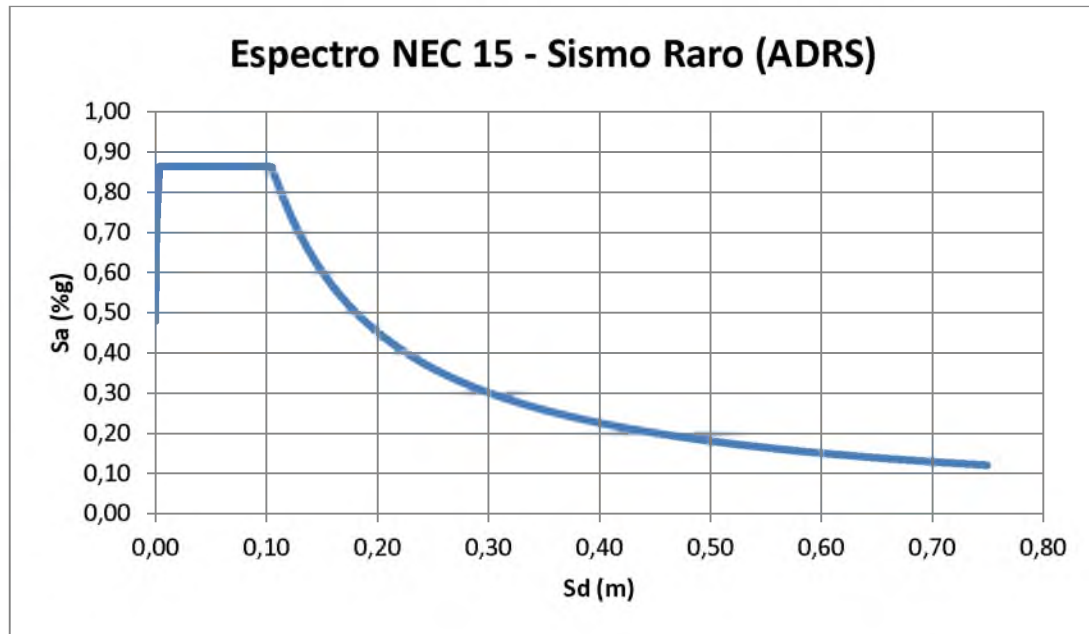


Figura 32. Espectro de Respuesta del Sismo Raro en formato ADRS

La curva de capacidad, obtenida del programa Etabs y mostrada en el Capítulo 2.2 de este trabajo, fue transformada también a formato ADRS por medio de las siguientes expresiones:

$$S_{a_i} = \frac{V_i/W}{\alpha_1} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

$$S_{a_i} = \frac{\delta_i}{PF_1 \times \phi_{1,roof}} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

α_1 , PF_1 y $\phi_{1,roof}$ fueron obtenidos del análisis modal del programa Etabs y sus valores son los siguientes:

$$\alpha_1 = 0,97$$

$$PF_1 \times \phi_{1,roof} = 1,23$$

En la Figura 33 se muestra la conversión de la Curva de Capacidad al formato ADRS.

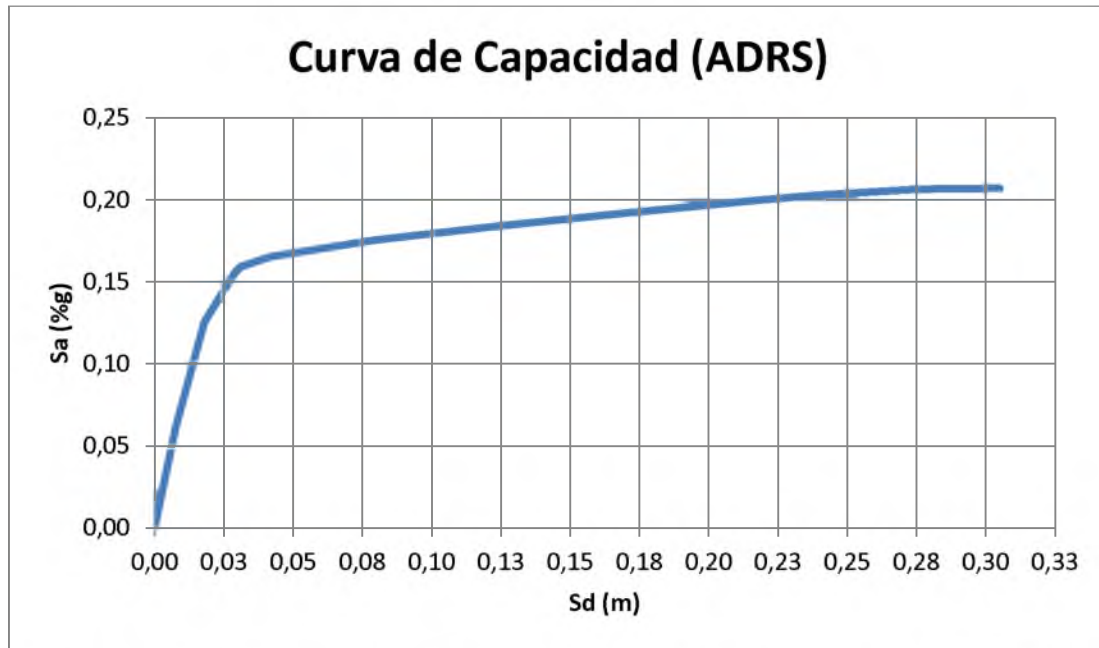


Figura 33. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido X

De la Curva de Espectro de Capacidad se seleccionó un punto de desempeño el cual deberá ser verificado luego si es correcto o no. En este caso es punto de desempeño (d_{pi}, a_{pi}) tiene los siguientes valores:

$$a_{pi} = 0,187 (\%g)$$

$$d_{pi} = 0,142 m$$

Con el punto de desempeño seleccionado se desarrolló la curva bilineal, ver Capítulo 2.3. Como se muestran en la Figura 34 de la curva bilineal se obtiene el desplazamiento de fluencia, d_y , y la aceleración de fluencia, a_y . Estos valores se muestran a continuación:

$$a_y = 0,1535 (\%g)$$

$$d_y = 0,0175 m$$

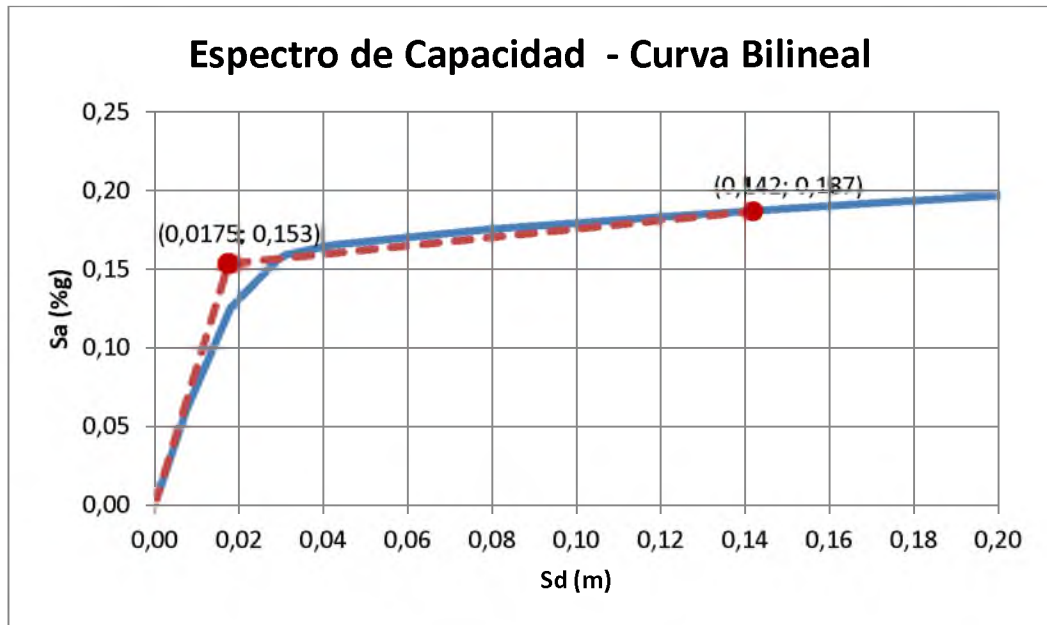


Figura 34. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido X

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{d_y}{a_y * g}} = 0,677 \text{ seg}$$

Como se indicó en el Capítulo 2.5.2 de este trabajo, la rigidez post-elástica, α , y la ductilidad, μ , se obtienen con las siguientes ecuaciones:

$$\alpha = \frac{\left(\frac{a_{pi} - a_y}{d_{pi} - d_y}\right)}{\left(\frac{a_y}{d_y}\right)} = 0,03735$$

$$\mu = \frac{d_{pi}}{d_y} = 8,1142$$

Para el cálculo del amortiguamiento efectivo y periodo efectivo se utilizaron ecuaciones aproximadas explicadas en el Capítulo 2.5.2 de este trabajo. Estas expresiones son independientes del tipo de modelo histórico y del valor de alfa.

Para $\mu > 6,5$

$$T_{eff} = \left\{ 0,89 \left[\sqrt{\frac{(\mu - 1)}{1 + 0,05(\mu - 2)}} - 1 \right] + 1 \right\} T_0 = 1,4812 \text{ seg}$$

$$\beta_{eff} = 19 \left[\frac{0,64(\mu - 1) - 1}{[0,64(\mu - 1)]^2} \right] \left(\frac{T_{eff}}{T_0} \right)^2 + \beta_0 = 20,58\%$$

El Espectro de Demanda Amortiguado, $(S_a)_\beta$ vs $(S_d)_\beta$, se obtiene a partir del coeficiente de amortiguamiento, B, calculado a continuación:

$$B = \frac{4}{5,6 - \ln \beta_{eff}(\text{en } \%)} = 1,553$$

En la Figura 35 se muestra el Espectro de Demanda y el Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS para este caso. El Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS se obtiene con las ecuaciones.

$$(S_a)_\beta = \frac{(S_a)_0}{B(\beta_{eff})}$$

$$(S_d)_\beta = \frac{T^2}{4\pi^2} * (S_a)_\beta$$

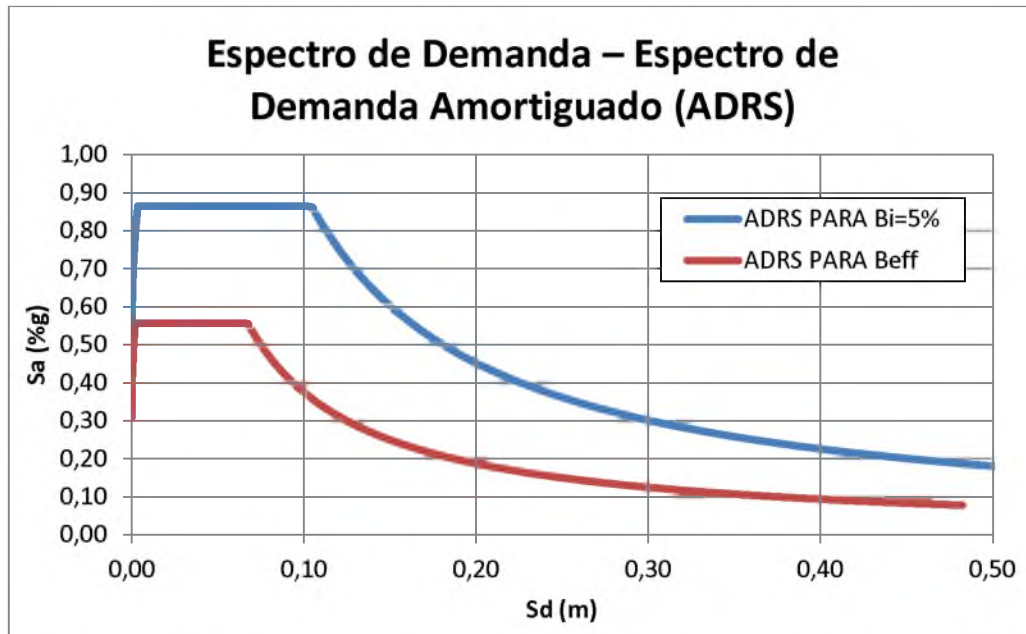


Figura 35. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Raro

El máximo desplazamiento esperado, d_i , se determina usando la intersección del periodo efectivo T_{eff} con el Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS. La máxima aceleración esperada, a_i , es la que corresponde al desplazamiento d_i en la curva de capacidad (ver Figura 36).

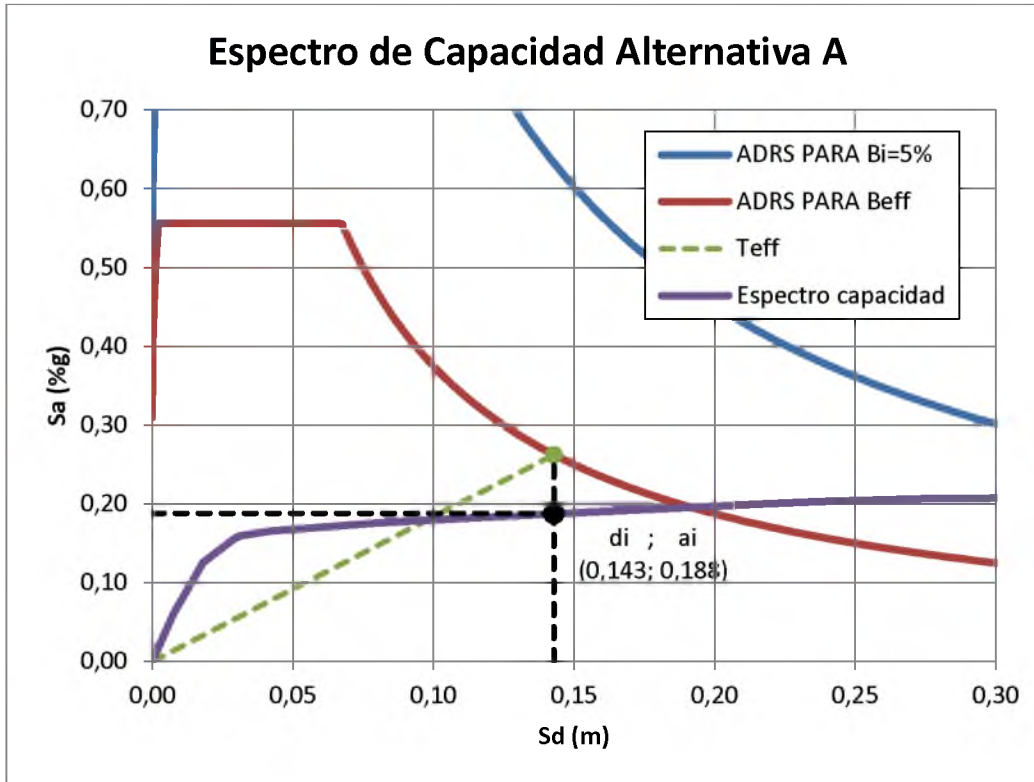


Figura 36. Método Espectro de Capacidad Alternativa A (Sismo Raro) – Sentido X

El máximo desplazamiento esperado y la máxima aceleración esperada tuvieron los siguientes valores:

$$a_i = 0,188 (\%g)$$

$$d_i = 0,14283 m$$

Como se muestra a continuación, estos valores deben ser comparados con los asumidos inicialmente; debido a que sus valores son los mismos (o muy cercanos) se acepta como correctos.

$$a_{pi} = 0,187 \rightarrow a_i = 0,188 \quad \underline{OK}$$

$$d_{pi} = 0,142 m \rightarrow d_i = 0,14283 m \quad \underline{OK}$$

El desplazamiento espectral debe ser convertido nuevamente a desplazamiento de la estructura por medio de la siguiente ecuación:

$$\delta_{max} = d_i \times PF_1 \times \phi_{1,roof} = 17,48 \text{ cm}$$

El desplazamiento máximo de la estructura en su parte más alta, de acuerdo al Método Espectro Capacidad Alternativa A, para el (MarcadorDePosición1)Sismo Raro en dirección X resultó igual a 17,48 cm

3.7.2.2. SISMO RARO. DIRECCIÓN Y

Se transformó el espectro de demanda para el Sismo Raro al formato Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento (ADRS) por medio de la siguiente fórmula:

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} * S_a \text{ (ATC - 40 Pag. 8 - 12)}$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento en formato ADRS para el Sismo Raro se muestra en la Figura 37:

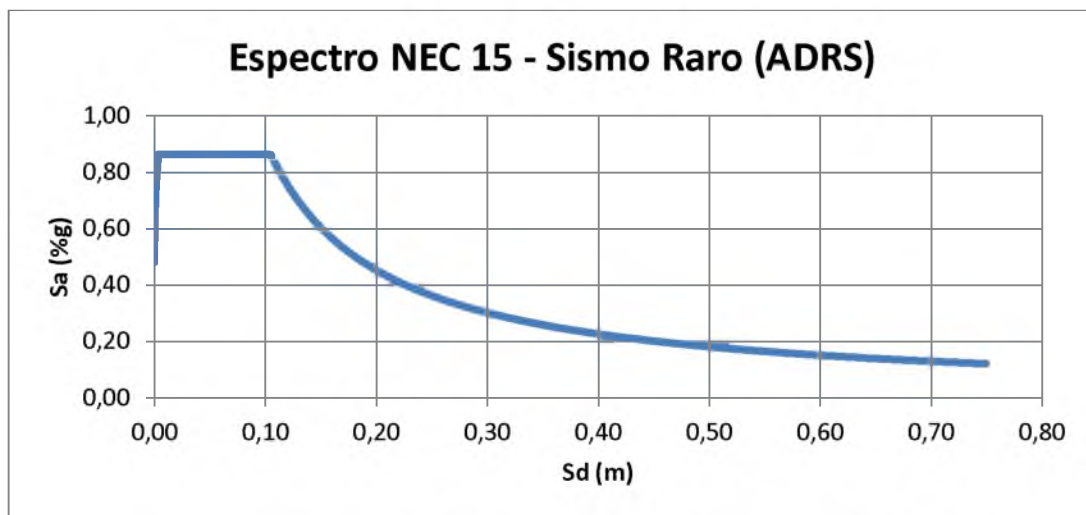


Figura 37. Espectro de Respuesta del Sismo Raro en formato ADRS

La curva de capacidad, obtenida del programa Etabs y mostrada en Capitulo 2.2 de este trabajo, fue transformada también a formato ADRS por medio de las siguientes expresiones:

$$S_{a_i} = \frac{V_i/W}{\alpha_1} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

$$S_{d_i} = \frac{\delta_i}{PF_1 \times \phi_{1,roof}} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

α_1 , PF_1 y $\phi_{1,roof}$ fueron obtenidos del análisis modal del programa Etabs y sus valores son los siguientes:

$$\alpha_1 = 0,93$$

$$PF_1 \times \phi_{1,roof} = 1,17$$

En la Figura 38 se muestra la conversión de la Curva de Capacidad al formato ADRS.

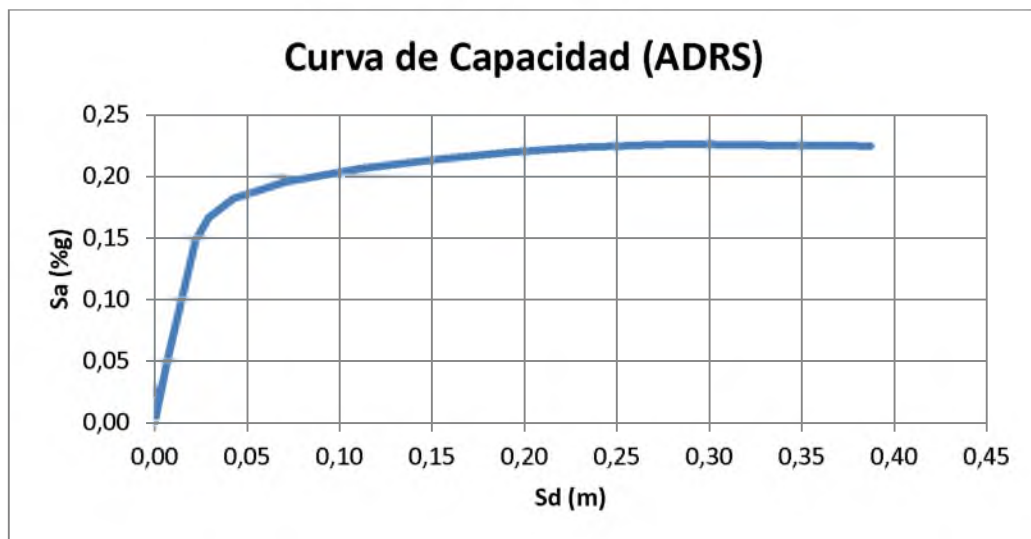


Figura 38. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido Y

De la Curva de Espectro de Capacidad se seleccionó un punto de desempeño el cual deberá ser verificado luego si es correcto o no. En este caso es punto de desempeño (d_{pi}, a_{pi}) tiene los siguientes valores:

$$a_{pi} = 0,21 (\%g)$$

$$d_{pi} = 0,134 m$$

Con el punto de desempeño seleccionado se desarrolló la curva bilineal, ver Capítulo 2.3. Como se muestran en la Figura 39, de la curva bilineal se obtiene el desplazamiento de fluencia, d_y , y la aceleración de fluencia, a_y . Estos valores se muestran a continuación:

$$a_y = 0,167 (\%g)$$

$$d_y = 0,018 m$$

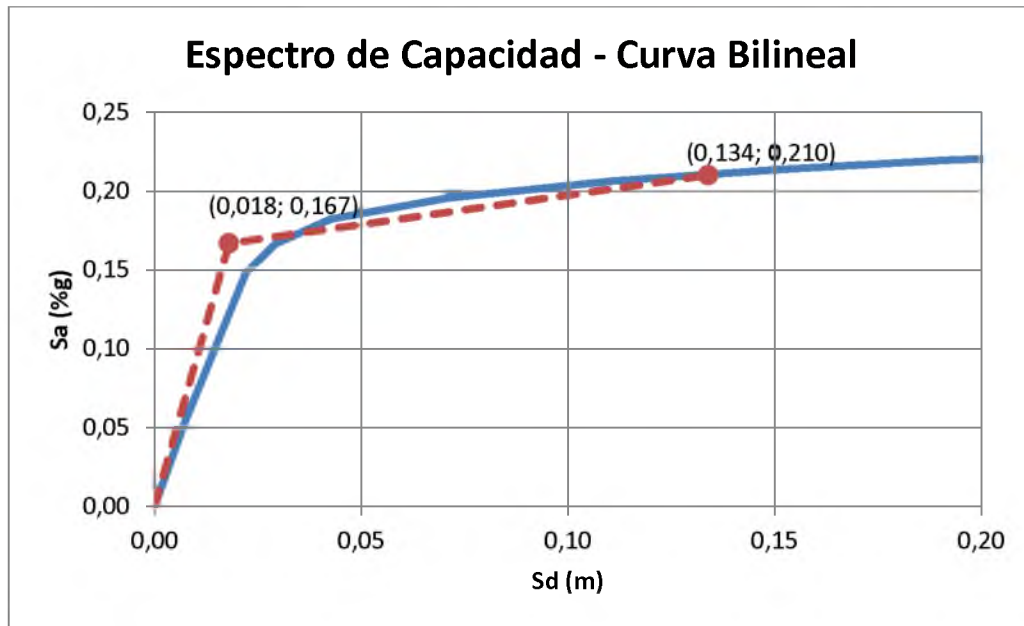


Figura 39. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido Y

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{d_y}{a_y * g}} = 0,658 \text{ seg}$$

Como se indicó en el Capítulo 2.5.2 de este trabajo, la rigidez post-elástica, α , y la ductilidad, μ , se obtienen con las siguientes ecuaciones.

$$\alpha = \frac{\left(\frac{a_{pi} - a_y}{d_{pi} - d_y}\right)}{\left(\frac{a_y}{d_y}\right)} = 0,04$$

$$\mu = \frac{d_{pi}}{d_y} = 7,44$$

Para el cálculo del amortiguamiento efectivo y periodo efectivo se utilizaron ecuaciones aproximadas explicadas en el Capítulo 2.5.2 de este trabajo. Estas expresiones son independientes del tipo de modelo histórico y del valor de alfa.

Para $\mu > 6,5$

$$T_{eff} = \left\{ 0,89 \left[\sqrt{\frac{(\mu - 1)}{1 + 0,05(\mu - 2)}} - 1 \right] + 1 \right\} T_0 = 1,39 \text{ seg}$$

$$\beta_{eff} = 19 \left[\frac{0,64(\mu - 1) - 1}{[0,64(\mu - 1)]^2} \right] \left(\frac{T_{eff}}{T_0} \right)^2 + \beta_0 = 20,58\%$$

El Espectro de Demanda Amortiguado, $(S_a)_\beta$ vs $(S_d)_\beta$, se obtiene a partir del coeficiente de amortiguamiento, B , calculado a continuación:

$$B = \frac{4}{5,6 - \ln \beta_{eff} (en \%)} = 1,553$$

El Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS se obtiene con las siguientes ecuaciones. En la Figura 40 se muestra el Espectro de Demanda y el Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS para este caso.

$$(S_a)_\beta = \frac{(S_a)_0}{B(\beta_{eff})}$$

$$(S_d)_\beta = \frac{T^2}{4\pi^2} * (S_a)_\beta$$

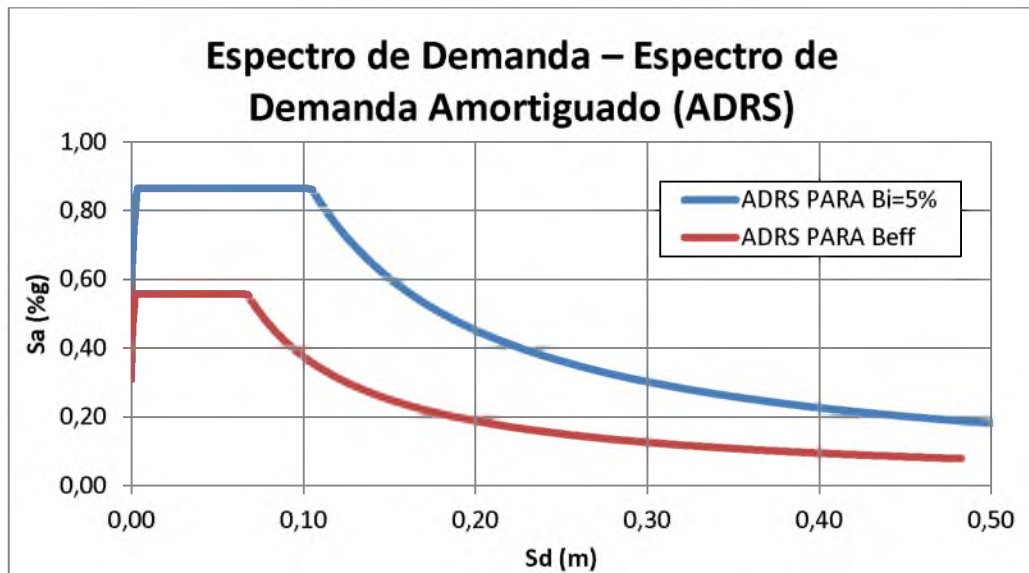


Figura 40. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Raro

El máximo desplazamiento esperado, d_i , se determina usando la intersección del periodo efectivo T_{eff} con el Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS. La máxima aceleración esperada, a_i , es la que corresponde al desplazamiento d_i en la curva de capacidad (ver Figura 41).

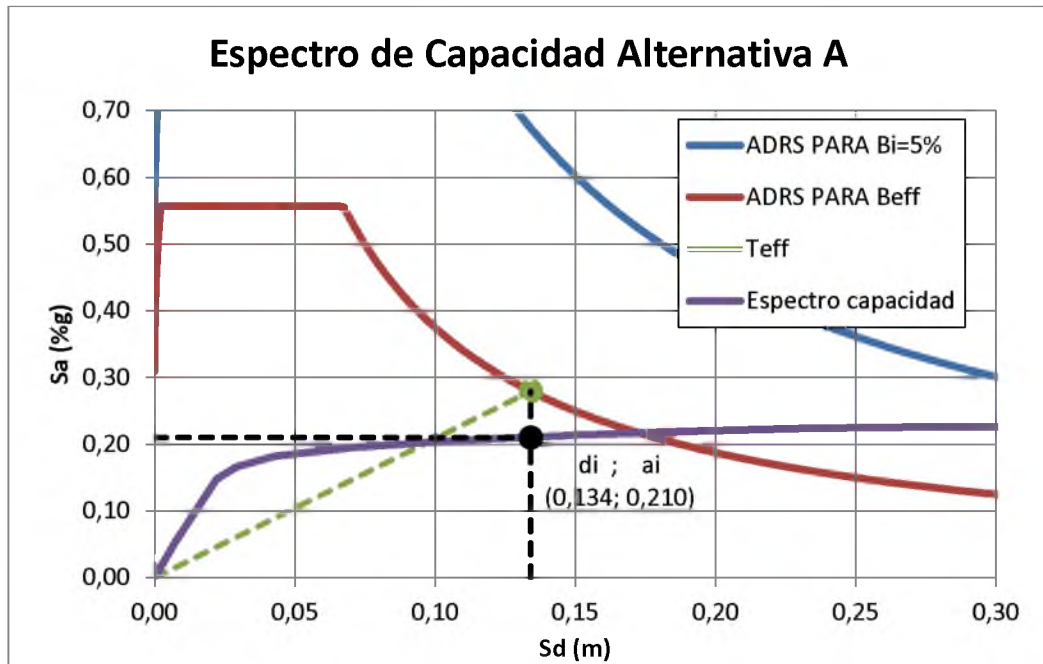


Figura 41. Método Espectro de Capacidad Alternativa A (Sismo Raro) – Sentido Y

El máximo desplazamiento esperado y la máxima aceleración esperada tuvieron los siguientes valores:

$$a_i = 0,21 (\%g)$$

$$d_i = 0,134 m$$

Como se muestra a continuación, estos valores deben ser comparados con los asumidos inicialmente; debido a que sus valores son los mismos (o muy cercanos) se acepta como correctos.

$$a_{pi} = 0,21 \rightarrow a_i = 0,21 \quad \underline{OK}$$

$$d_{pi} = 0,134 m \rightarrow d_i = 0,134 m \quad \underline{OK}$$

El desplazamiento espectral debe ser convertido nuevamente a desplazamiento de la estructura por medio de la siguiente ecuación.

$$\delta_{max} = d_i \times PF_1 \times \phi_{1,roof} = 15,70 \text{ cm}$$

El desplazamiento máximo de la estructura en su parte más alta, de acuerdo al Método Espectro Capacidad Alternativa A, para el Sismo Raro en dirección Y resultó igual a 15,70 cm.

3.7.2.3. SISMO MUY RARO. DIRECCIÓN X

Se transformó el espectro de demanda para el Sismo Raro al formato Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento (ADRS) por medio de la siguiente fórmula:

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} * S_a \text{ (ATC - 40 Pag. 8 - 12)}$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento en formato ADRS para el Sismo Raro se muestra en la Figura 42:

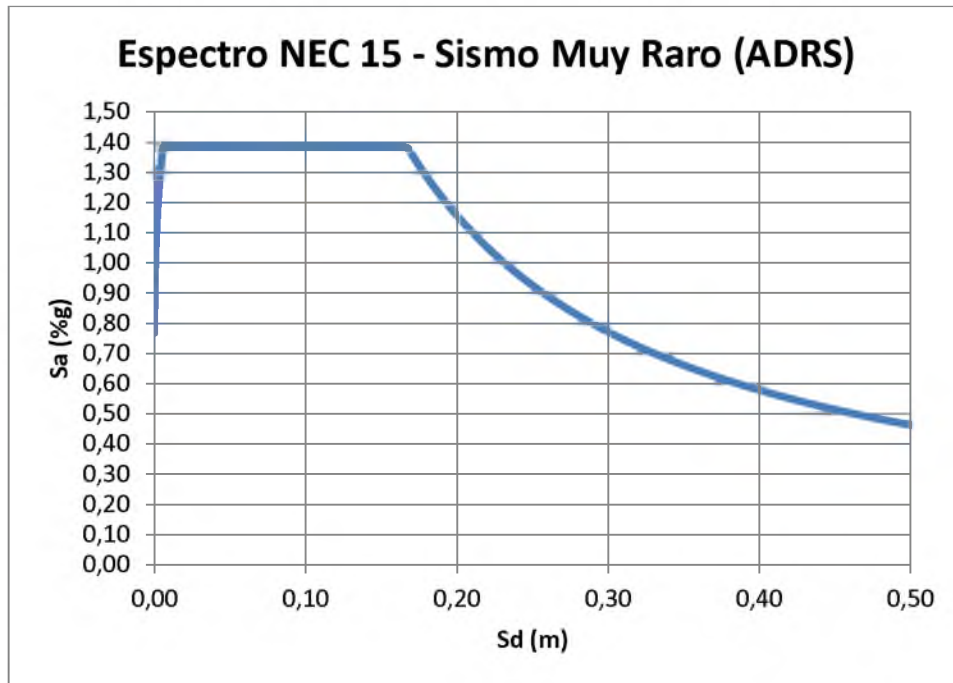


Figura 42. Espectro de Respuesta del Sismo Muy Raro en formato ADRS

La curva de capacidad, obtenida del programa Etabs y mostrada en el Capítulo 2.2 de este trabajo, fue transformada también a formato ADRS por medio de las siguientes expresiones:

$$S_{a_i} = \frac{V_i/W}{\alpha_1} \quad (\text{ATC} - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

$$S_{d_i} = \frac{\delta_i}{PF_1 \times \phi_{1,roof}} \quad (\text{ATC} - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

α_1 , PF_1 y $\phi_{1,roof}$ fueron obtenidos del análisis modal del programa Etabs y sus valores son los siguientes:

$$\alpha_1 = 0,97$$

$$PF_1 \times \phi_{1,roof} = 1,23$$

En la Figura 43 se muestra la conversión de la Curva de Capacidad al formato ADRS.

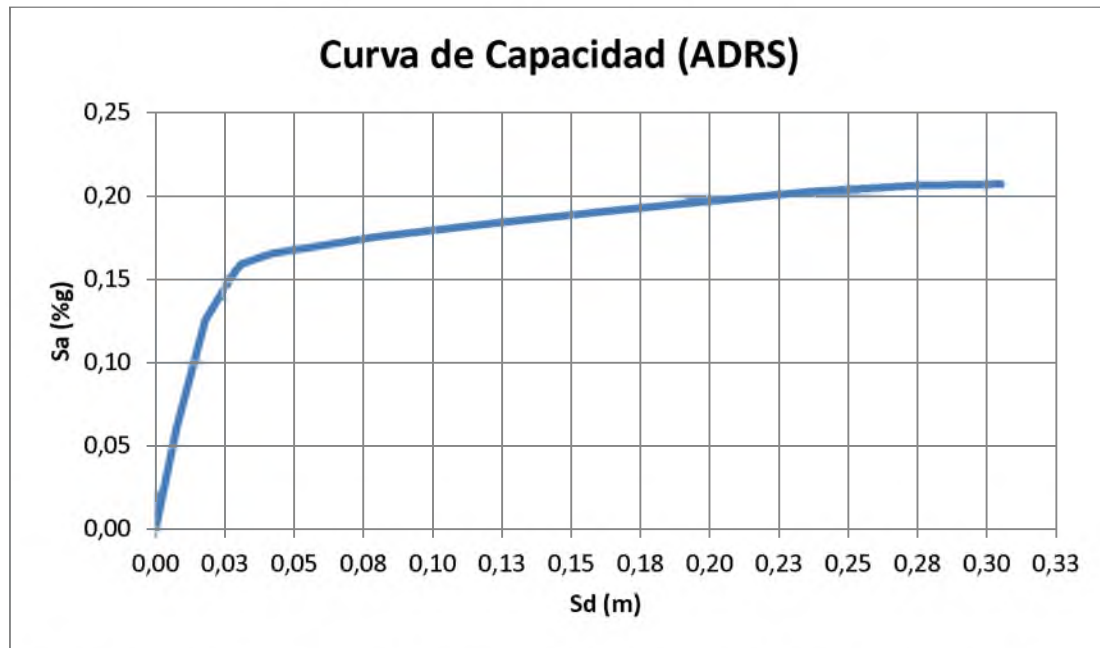


Figura 43. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido X

De la Curva de Espectro de Capacidad se seleccionó un punto de desempeño el cual deberá ser verificado luego si es correcto o no. En este caso es punto de desempeño (d_{pi}, a_{pi}) tiene los siguientes valores:

$$a_{pi} = 0,207 (\%g)$$

$$d_{pi} = 0,30 \text{ m}$$

Con el punto de desempeño seleccionado se desarrolló la curva bilineal, ver Capítulo 2.3. Como se muestran en la Figura 44, de la curva bilineal se obtiene el desplazamiento de fluencia, d_y , y la aceleración de fluencia, a_y . Estos valores se muestran a continuación:

$$a_y = 0,161 (\%g)$$

$$d_y = 0,0175 \text{ m}$$

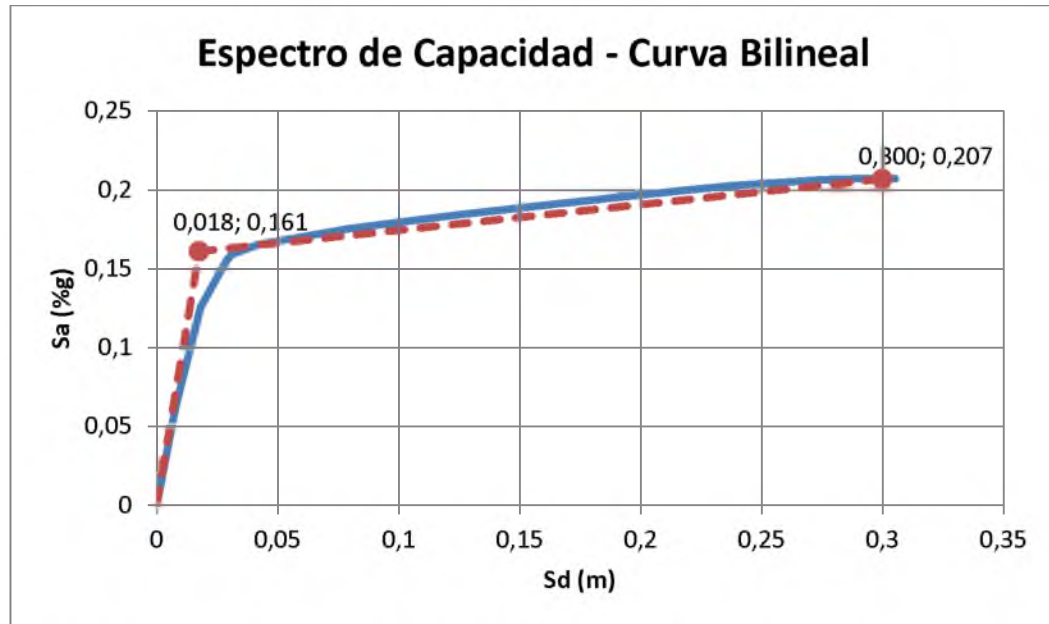


Figura 44. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido X

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{d_y}{a_y * g}} = 0,661 \text{ seg}$$

Como se indicó en el Capítulo 2.5.2 de este trabajo, la rigidez post-elástica, α , y la ductilidad, μ , se obtienen con las siguientes ecuaciones.

$$\alpha = \frac{\left(\frac{a_{pi} - a_y}{d_{pi} - d_y}\right)}{\left(\frac{a_y}{d_y}\right)} = 0,0176$$

$$\mu = \frac{d_{pi}}{d_y} = 17,14$$

Para el cálculo del amortiguamiento efectivo y periodo efectivo se utilizaron ecuaciones aproximadas explicadas en el Capítulo 2.5.2 de este trabajo. Estas expresiones son independientes del tipo de modelo histórico y del valor de alfa.

Para $\mu > 6,5$

$$T_{eff} = \left\{ 0,89 \left[\sqrt{\frac{(\mu - 1)}{1 + 0,05(\mu - 2)}} - 1 \right] + 1 \right\} T_0 = 1,856 \text{ seg}$$

$$\beta_{eff} = 19 \left[\frac{0,64(\mu - 1) - 1}{[0,64(\mu - 1)]^2} \right] \left(\frac{T_{eff}}{T_0} \right)^2 + \beta_0 = 18,09\%$$

El Espectro de Demanda Amortiguado, $(S_a)_\beta$ vs $(S_d)_\beta$, se obtiene a partir del coeficiente de amortiguamiento, B, calculado a continuación:

$$B = \frac{4}{5,6 - \ln \beta_{eff}(\text{en } \%)} = 1,479$$

El Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS se obtiene con las siguientes ecuaciones. En la Figura 45 se muestra el Espectro de Demanda y el Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS para este caso.

$$(S_a)_\beta = \frac{(S_a)_0}{B(\beta_{eff})}$$

$$(S_d)_\beta = \frac{T^2}{4\pi^2} * (S_a)_\beta$$

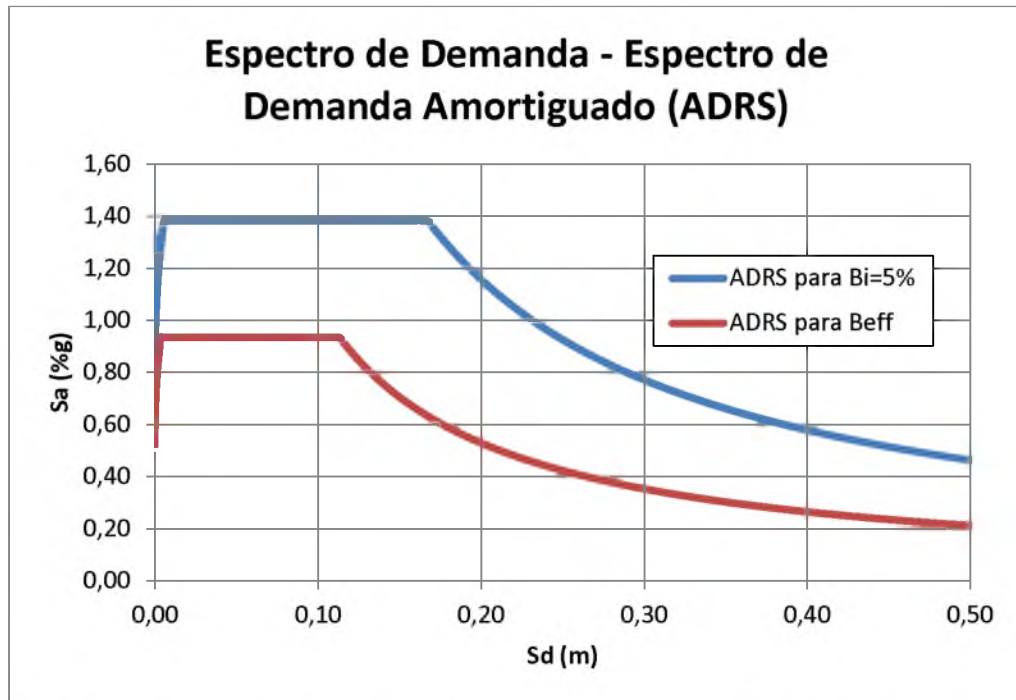


Figura 45. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Muy Raro

El máximo desplazamiento esperado, d_i , se determina usando la intersección del periodo efectivo T_{eff} con el Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS. La máxima aceleración esperada, a_i , es la que corresponde al desplazamiento d_i en la curva de capacidad (ver Figura 46).

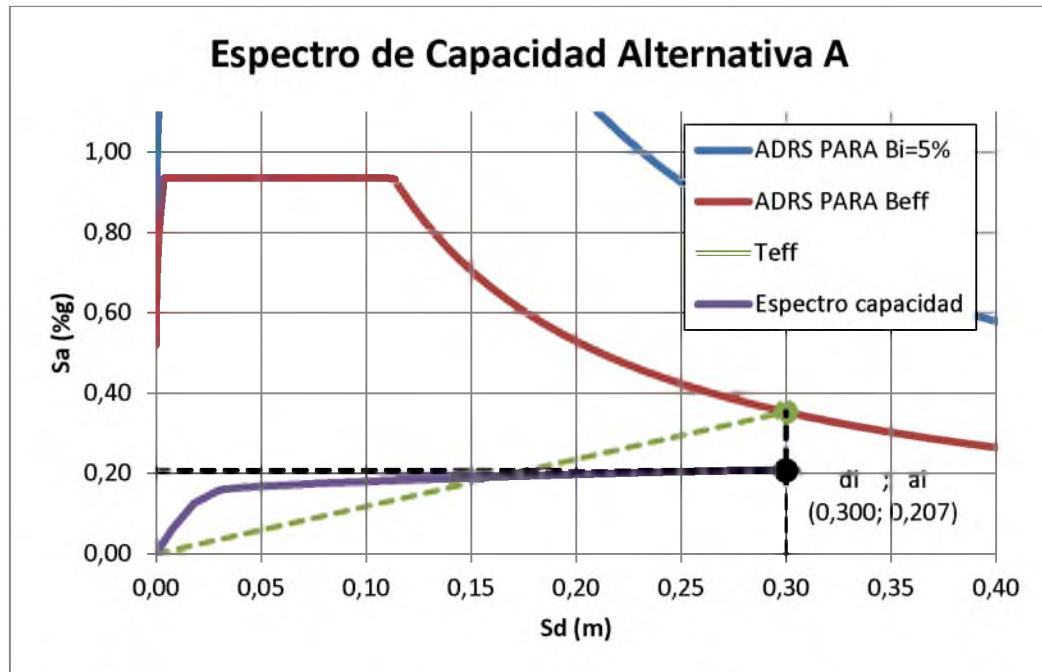


Figura 46. Método Espectro de Capacidad Alternativa A (Sismo Raro) – Sentido X

El máximo desplazamiento esperado y la máxima aceleración esperada tuvieron los siguientes valores:

$$a_i = 0,207 \text{ (\%g)}$$

$$d_i = 0,30 \text{ m}$$

Como se muestra a continuación, estos valores deben ser comparados con los asumidos inicialmente; debido a que sus valores son los mismos (o muy cercanos) se acepta como correctos.

$$a_{pi} = 0,207 \rightarrow a_i = 0,207 \quad \underline{OK}$$

$$d_{pi} = 0,30 \text{ m} \rightarrow d_i = 0,30 \text{ m} \quad \underline{OK}$$

El desplazamiento espectral debe ser convertido nuevamente a desplazamiento de la estructura por medio de la siguiente ecuación.

$$\delta_{max} = d_i \times PF_1 \times \phi_{1,roof} = 37,00 \text{ cm}$$

El desplazamiento máximo de la estructura en su parte más alta, de acuerdo al Método Espectro Capacidad Alternativa A, para el Sismo Muy Raro en dirección X resultó igual a 37,00 cm.

3.7.2.4. SISMO MUY RARO. DIRECCIÓN Y

Se transformó el espectro de demanda para el Sismo Raro al formato Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento (ADRS) por medio de la siguiente fórmula:

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} * S_a \text{ (ATC - 40 Pag. 8 - 12)}$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento en formato ADRS para el Sismo Raro se muestra en la Figura 47:

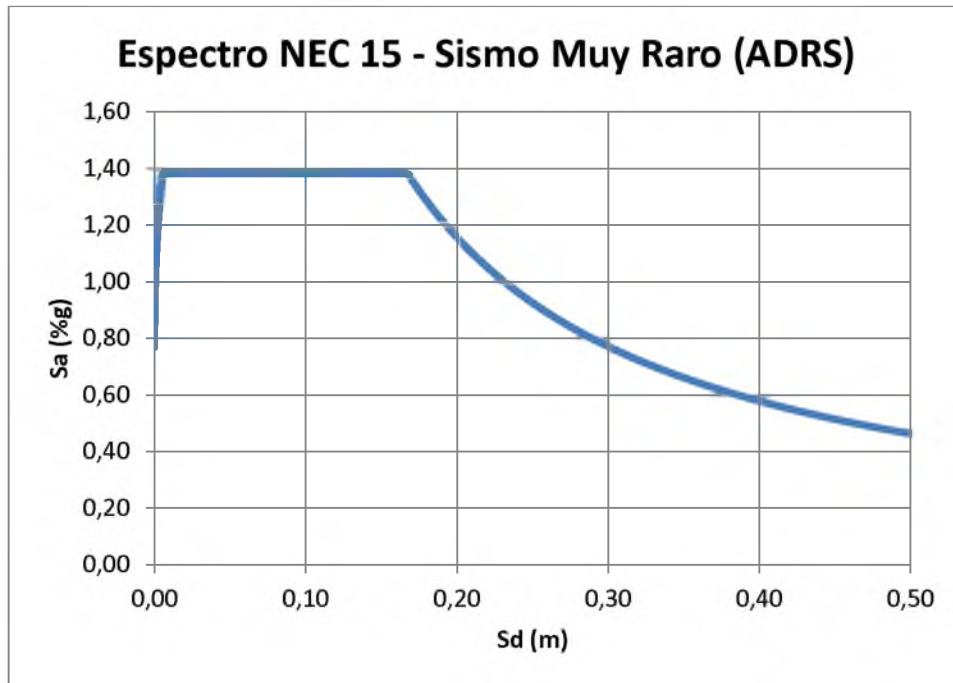


Figura 47. Espectro de Respuesta del Sismo Muy Raro en formato ADRS

La curva de capacidad, obtenida del programa Etabs y mostrada en Capítulo 2.2 de este trabajo, fue transformada también a formato ADRS por medio de las siguientes expresiones:

$$S_{a_i} = \frac{V_i/W}{\alpha_1} \quad (\text{ATC} - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

$$S_{d_i} = \frac{\delta_i}{PF_1 \times \phi_{1,roof}} \quad (\text{ATC} - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

α_1 , PF_1 y $\phi_{1,roof}$ fueron obtenidos del análisis modal del programa Etabs y sus valores son los siguientes:

$$\alpha_1 = 0,93$$

$$PF_1 \times \phi_{1,roof} = 1,17$$

En la Figura 48 se muestra la conversión de la Curva de Capacidad al formato ADRS.

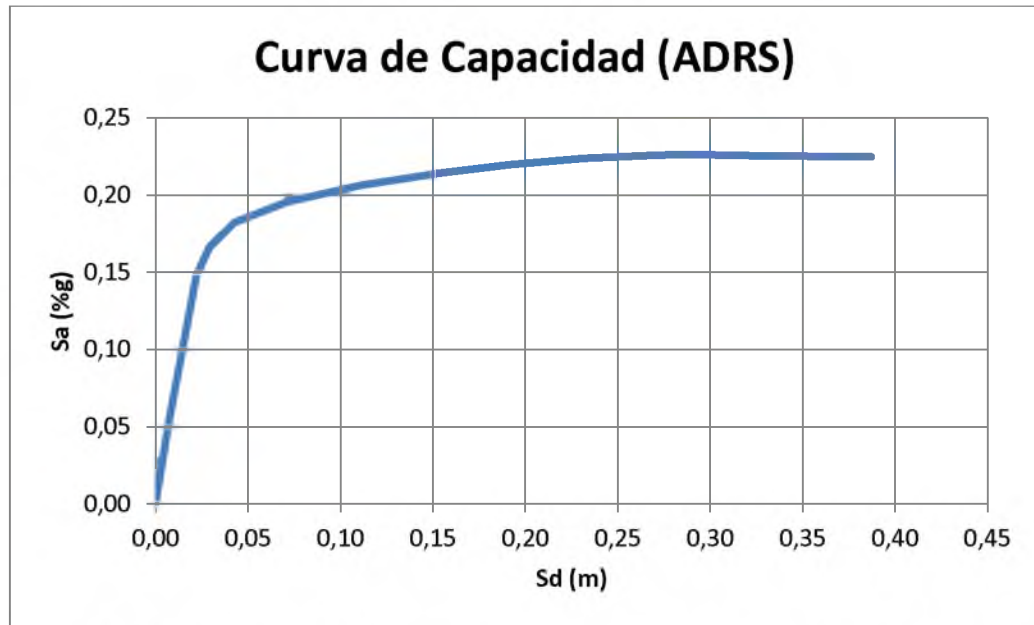


Figura 48. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido Y

De la Curva de Espectro de Capacidad se seleccionó un punto de desempeño el cual deberá ser verificado luego si es correcto o no. En este caso es punto de desempeño (d_{pi}, a_{pi}) tiene los siguientes valores:

$$a_{pi} = 0,225 (\%g)$$

$$d_{pi} = 0,275 \text{ m}$$

Con el punto de desempeño seleccionado se desarrolló la curva bilineal, ver Capítulo 2.3. Como se muestran en la Figura 49, de la curva bilineal se obtiene el desplazamiento de fluencia, d_y , y la aceleración de fluencia, a_y . Estos valores se muestran a continuación:

$$a_y = 0,182 (\%g)$$

$$d_y = 0,018 \text{ m}$$

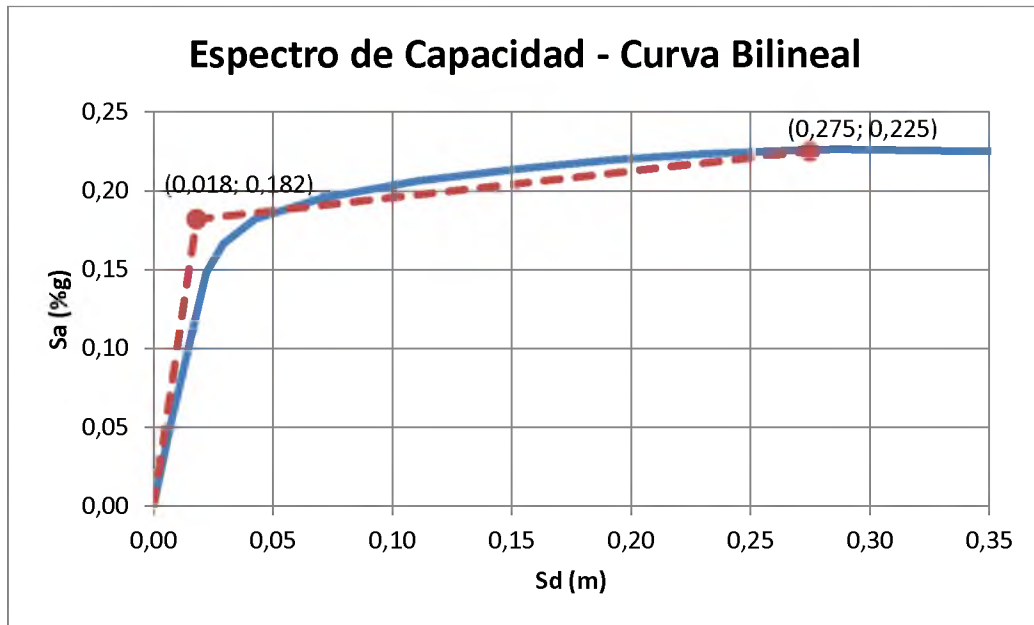


Figura 49. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido Y

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{d_y}{a_y * g}} = 0,63 \text{ seg}$$

Como se indicó en el Capítulo 2.5.2 de este trabajo, la rigidez post-elástica, α , y la ductilidad, μ , se obtienen con las siguientes ecuaciones.

$$\alpha = \frac{\left(\frac{a_{pi} - a_y}{d_{pi} - d_y}\right)}{\left(\frac{a_y}{d_y}\right)} = 0,0165$$

$$\mu = \frac{d_{pi}}{d_y} = 15,27$$

Para el cálculo del amortiguamiento efectivo y periodo efectivo se utilizaron ecuaciones aproximadas explicadas en el Capítulo 2.5.2 de este trabajo. Estas expresiones son independientes del tipo de modelo histórico y del valor de alfa.

Para $\mu > 6,5$

$$T_{eff} = \left\{ 0,89 \left[\sqrt{\frac{(\mu - 1)}{1 + 0,05(\mu - 2)}} - 1 \right] + 1 \right\} T_0 = 1,714 \text{ seg}$$

$$\beta_{eff} = 19 \left[\frac{0,64(\mu - 1) - 1}{[0,64(\mu - 1)]^2} \right] \left(\frac{T_{eff}}{T_0} \right)^2 + \beta_0 = 18,67\%$$

El Espectro de Demanda Amortiguado, $(S_a)_\beta$ vs $(S_d)_\beta$, se obtiene a partir del coeficiente de amortiguamiento, B, calculado a continuación:

$$B = \frac{4}{5,6 - \ln \beta_{eff}(\text{en } \%)} = 1,49$$

El Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS se obtiene con las siguientes ecuaciones. En la Figura 50 se muestra el Espectro de Demanda y el Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS para este caso.

$$(S_a)_\beta = \frac{(S_a)_0}{B(\beta_{eff})}$$

$$(S_d)_\beta = \frac{T^2}{4\pi^2} * (S_a)_\beta$$

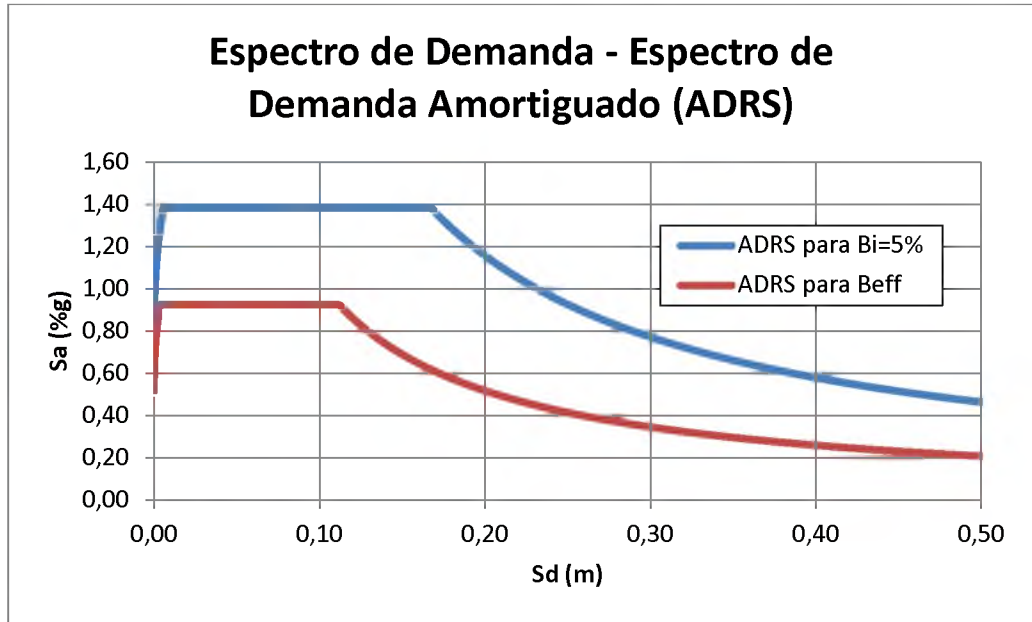


Figura 50. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Muy Raro

El máximo desplazamiento esperado, d_i , se determina usando la intersección del periodo efectivo T_{eff} con el Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS. La máxima aceleración esperada, a_i , es la que corresponde al desplazamiento d_i en la curva de capacidad (ver Figura 51).

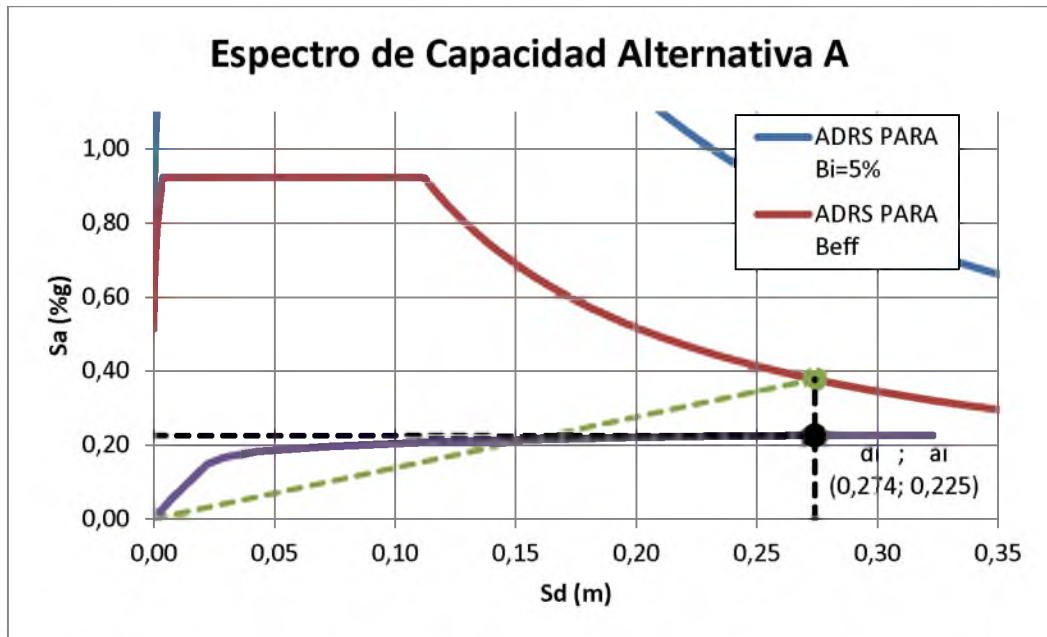


Figura 51. Método Espectro de Capacidad Alternativa A (Sismo Muy Raro) – Sentido Y

El máximo desplazamiento esperado y la máxima aceleración esperada tuvieron los siguientes valores:

$$a_i = 0,225 (\%g)$$

$$d_i = 0,274 m$$

Como se muestra a continuación, estos valores deben ser comparados con los asumidos inicialmente; debido a que sus valores son los mismos (o muy cercanos) se acepta como correctos.

$$a_{pi} = 0,225 \rightarrow a_i = 0,225 \quad \underline{OK}$$

$$d_{pi} = 0,275 m \rightarrow d_i = 0,274 m \quad \underline{OK}$$

El desplazamiento espectral debe ser convertido nuevamente a desplazamiento de la estructura por medio de la siguiente ecuación.

$$\delta_{max} = d_i \times PF_1 \times \phi_{1,roof} = 32,00 cm$$

El desplazamiento máximo de la estructura en su parte más alta, de acuerdo al Método Espectro Capacidad Alternativa A, para el Sismo Muy Raro en dirección Y resultó igual a 32,00 cm.

3.7.3. MÉTODO ESPECTRO DE CAPACIDAD. ALTERNATIVA B (ITERACIÓN CON MADRS).

En el Capítulo 2.5.3 de este trabajo se explica detalladamente la aplicación del Método Espectro de Capacidad Alternativa B especificado en el FEMA 440. A continuación se muestran los resultados obtenidos del uso de este método para

hallar el punto de desempeño del Edificio de la Facultad de Ingeniería tanto para el sismo raro como para el sismo muy raro.

Algunos de los cálculos realizados en este método son iguales a la Alternativa A del Método Espectro de Capacidad. Estos cálculos se mostrarán nuevamente para que su desarrollo sea más claro.

3.7.3.1. SISMO RARO. DIRECCIÓN X

Se transformó el espectro de demanda para el Sismo Raro al formato Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento (ADRS) por medio de la siguiente fórmula:

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} * S_a \text{ (ATC - 40 Pag. 8 - 12)}$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento en formato ADRS para el Sismo Raro se muestra en la Figura 52:

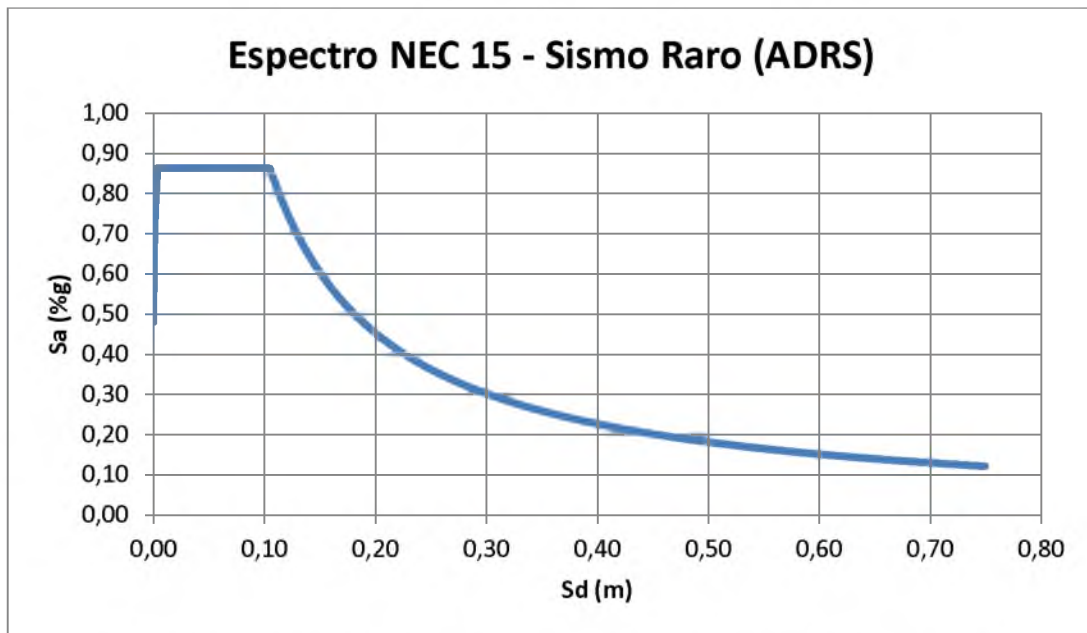


Figura 52. Espectro de Respuesta del Sismo Raro en formato ADRS

La curva de capacidad, obtenida del programa Etabs y mostrada en el Capítulo 2.2 de este trabajo, fue transformada también a formato ADRS por medio de las siguientes expresiones:

$$S_{a_i} = \frac{V_i/W}{\alpha_1} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

$$S_{d_i} = \frac{\delta_i}{PF_1 \times \phi_{1,roof}} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

α_1 , PF_1 y $\phi_{1,roof}$ fueron obtenidos del análisis modal del programa Etabs y sus valores son los siguientes:

$$\alpha_1 = 0,97$$

$$PF_1 \times \phi_{1,roof} = 1,23$$

En la Figura 53 se muestra la conversión de la Curva de Capacidad al formato ADRS.

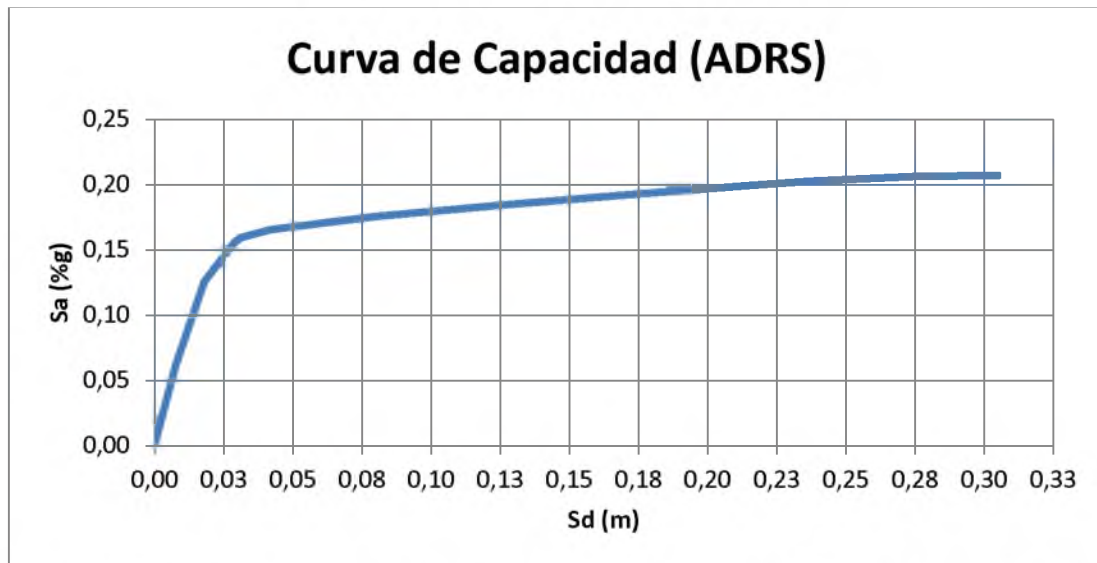


Figura 53. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido X

De la Curva Espectro de Capacidad se seleccionó un punto de desempeño el cual deberá ser verificado luego si es correcto o no. En este caso es punto de desempeño (d_{pi}, a_{pi}) tiene los siguientes valores:

$$a_{pi} = 0,187 (\%g)$$

$$d_{pi} = 0,142 m$$

Con el punto de desempeño seleccionado se desarrolló la curva bilineal, ver Capitulo 2.3. Como se muestran en la Figura 54, de la curva bilineal se obtiene el desplazamiento de fluencia, d_y , y la aceleración de fluencia, a_y . Estos valores se muestran a continuación:

$$a_y = 0,1535 (\%g)$$

$$d_y = 0,0175 m$$

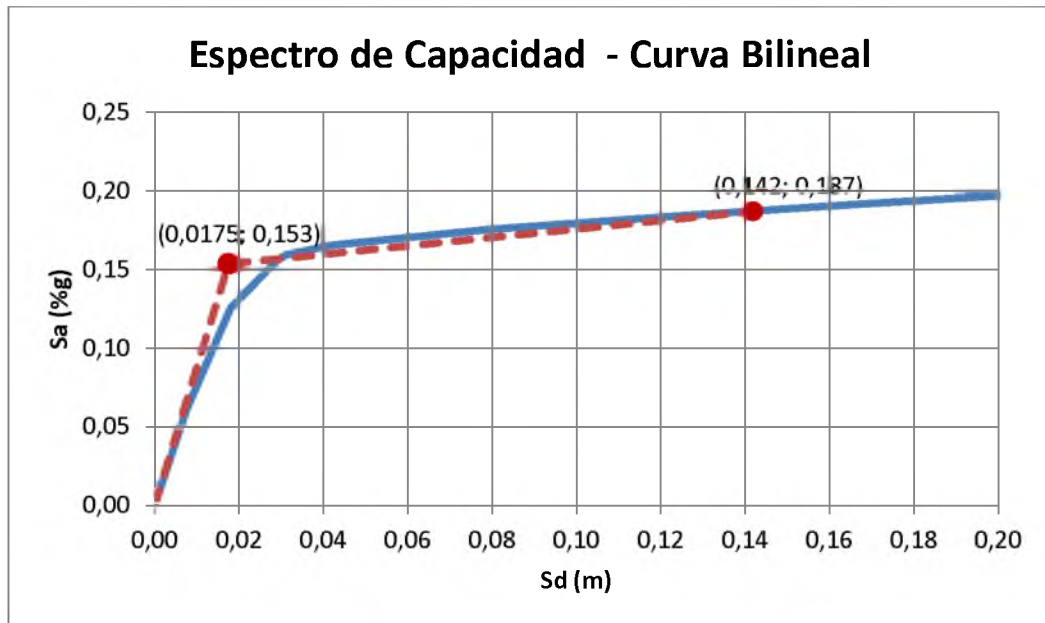


Figura 54. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido X

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{d_y}{a_y * g}} = 0,677 \text{ seg}$$

Como se indicó en el Capítulo 2.5.3 de este trabajo, la rigidez post-elástica, α , y la ductilidad, μ , se obtienen con las siguientes ecuaciones:

$$\alpha = \frac{\left(\frac{a_{pi} - a_y}{d_{pi} - d_y}\right)}{\left(\frac{a_y}{d_y}\right)} = 0,03735$$

$$\mu = \frac{d_{pi}}{d_y} = 8,1142$$

Para el cálculo del amortiguamiento efectivo y periodo efectivo se utilizaron ecuaciones aproximadas explicadas en el Capítulo 2.5.3 de este trabajo. Estas expresiones son independientes del tipo de modelo histórico y del valor de alfa.

Para $\mu > 6,5$

$$T_{eff} = \left\{ 0,89 \left[\sqrt{\frac{(\mu - 1)}{1 + 0,05(\mu - 2)}} - 1 \right] + 1 \right\} T_0 = 1,4812 \text{ seg}$$

$$\beta_{eff} = 19 \left[\frac{0,64(\mu - 1) - 1}{[0,64(\mu - 1)]^2} \right] \left(\frac{T_{eff}}{T_0} \right)^2 + \beta_0 = 20,58\%$$

El Espectro de Demanda Amortiguado, $(S_a)_\beta$ vs $(S_d)_\beta$, se obtiene a partir del coeficiente de amortiguamiento, B , calculado a continuación:

$$B = \frac{4}{5,6 - \ln \beta_{eff}(\text{en } \%)} = 1,553$$

El Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS se obtiene con las siguientes ecuaciones. En la Figura 55 se muestra el Espectro de Demanda y el Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS para este caso.

$$(S_a)_\beta = \frac{(S_a)_0}{B(\beta_{eff})}$$

$$(S_d)_\beta = \frac{T^2}{4\pi^2} * (S_a)_\beta$$

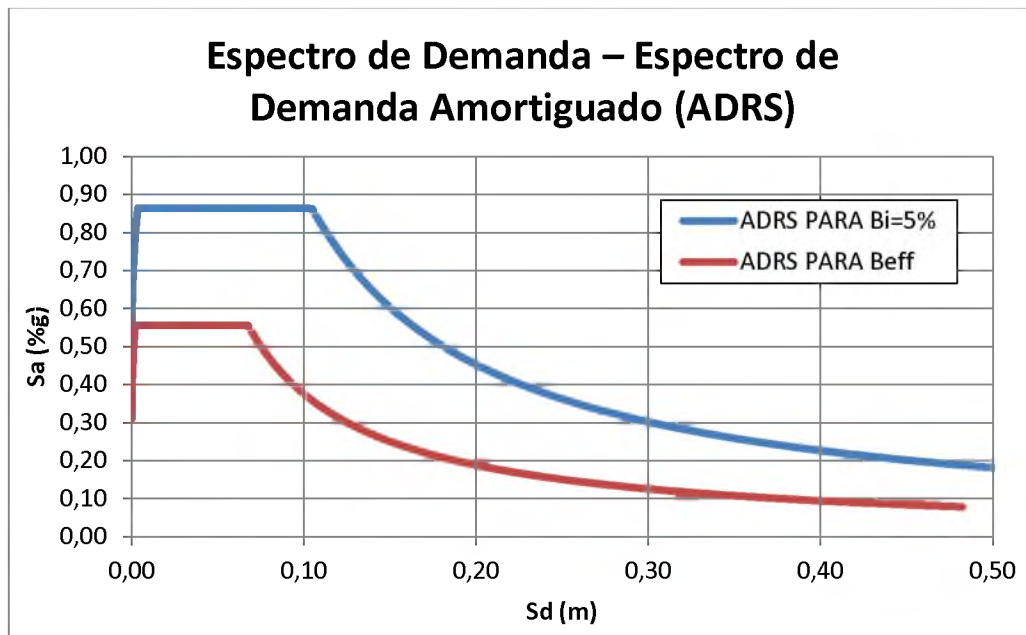


Figura 55. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Raro

Se calculó el factor de modificación, M, por medio de la ecuación presentada en el Capítulo 2.5.3 de este trabajo, como se muestra a continuación:

$$M = \left(\frac{T_{eff}}{T_0}\right)^2 \left(\frac{T_0}{T_{sec}}\right)^2 = \left(\frac{T_{eff}}{T_0}\right)^2 \left(\frac{1 + \alpha(\mu - 1)}{\mu}\right) = 0,7179$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento Modificado (MADRS) se obtiene dividiendo las ordenadas de aceleración (ADRS) para el factor M. En la Figura 56 se muestra el Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento Modificado (MADRS)

$$(S_a)_{MADRS} = (S_a)_\beta \times M$$

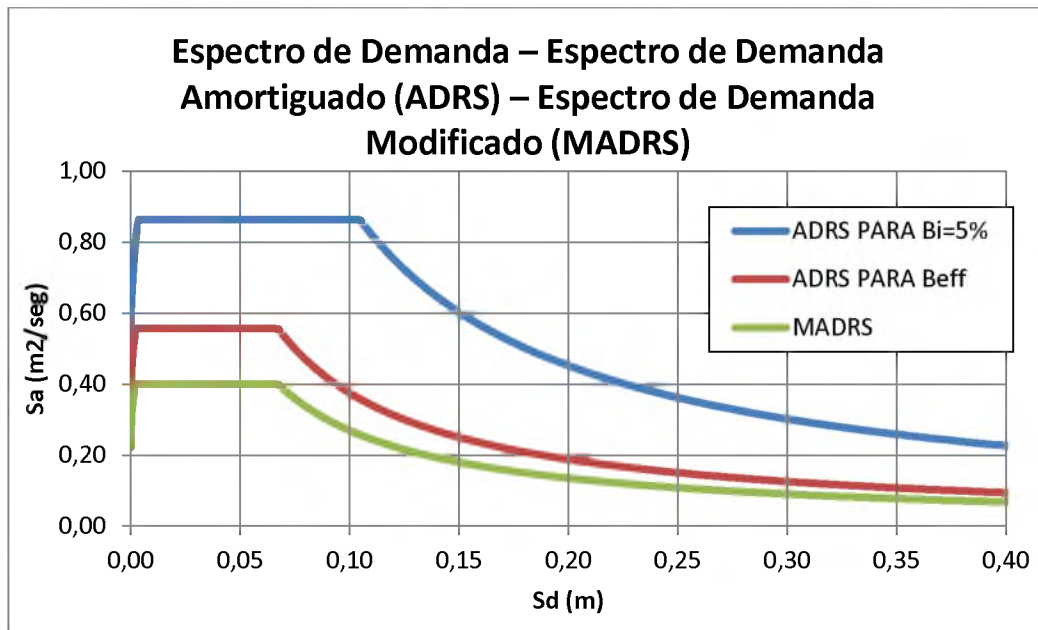


Figura 56. Espectro de demanda Modificado (MADRS) – Sismo Raro

El punto de desempeño (d_i , a_i) se encontrar en la intersección de la Curva de Capacidad con el Espectro de Demanda Aceleración-Desplazamiento Modificado (ver Figura 57)

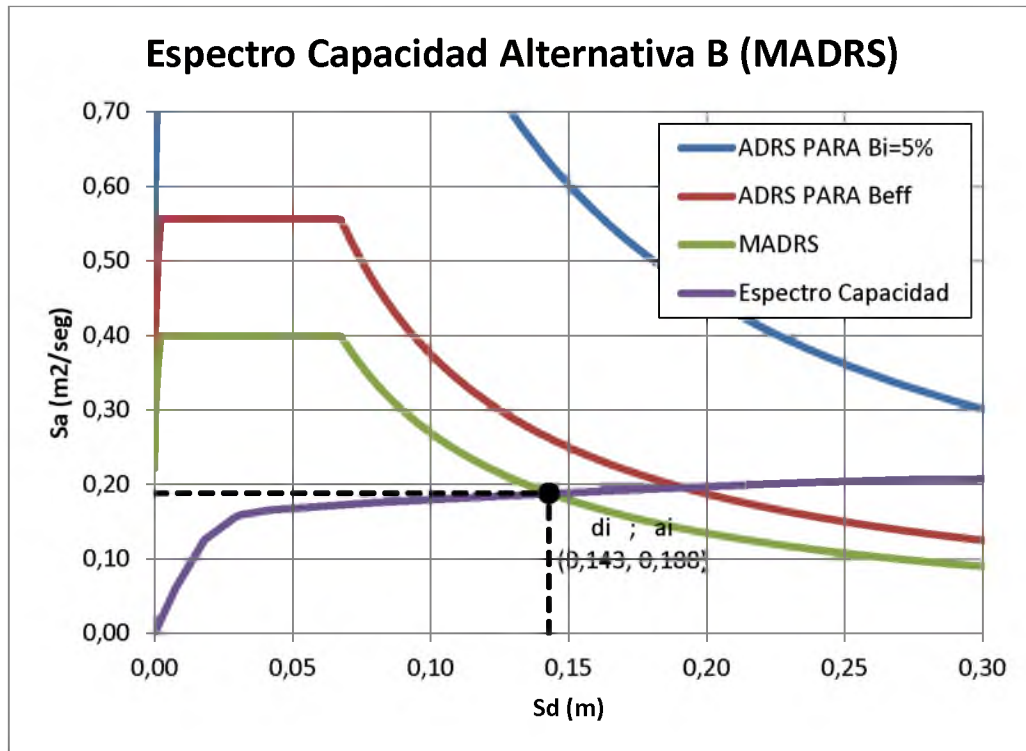


Figura 57. Método Espectro de Capacidad Alternativa B (Sismo raro) – Sentido X

El máximo desplazamiento esperado y la máxima aceleración esperada tuvieron los siguientes valores:

$$a_i = 0,187 (\%g)$$

$$d_i = 0,142 m$$

Como se muestra a continuación, estos valores deben ser comparados con los asumidos inicialmente; debido a que sus valores son los mismos (o muy cercanos) se acepta como correctos.

$$a_{pi} = 0,187 \rightarrow a_i = 0,187 \quad \underline{OK}$$

$$d_{pi} = 0,142 m \rightarrow d_i = 0,142 m \quad \underline{OK}$$

El desplazamiento espectral debe ser convertido nuevamente a desplazamiento de la estructura por medio de la siguiente ecuación.

$$\delta_{max} = d_i \times PF_1 \times \phi_{1,roof} = 17,48 \text{ cm}$$

El desplazamiento máximo de la estructura en su parte más alta, de acuerdo al Método Espectro Capacidad Alternativa B, para el Sismo Raro en dirección X resultó igual a 17,48 cm.

3.7.3.2. SISMO RARO. DIRECCIÓN Y

Se transformó el espectro de demanda para el Sismo Raro al formato Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento (ADRS) por medio de la siguiente fórmula:

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} * S_a \text{ (ATC - 40 Pag. 8 - 12)}$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento en formato ADRS para el Sismo Raro se muestra en la Figura 58:

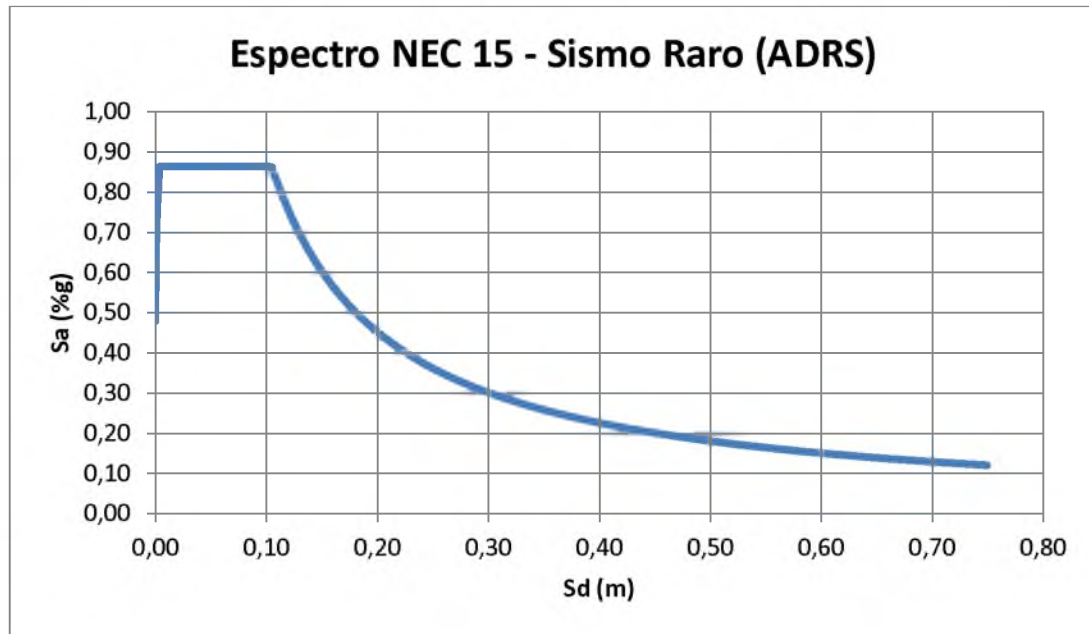


Figura 58. Espectro de Respuesta del Sismo Raro en formato ADRS

La curva de capacidad, obtenida del programa Etabs y mostrada en Capítulo 2.2 de este trabajo, fue transformada también a formato ADRS por medio de las siguientes expresiones:

$$S_{a_i} = \frac{V_i/W}{\alpha_1} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

$$S_{d_i} = \frac{\delta_i}{PF_1 \times \phi_{1,roof}} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

α_1 , PF_1 y $\phi_{1,roof}$ fueron obtenidos del análisis modal del programa Etabs y sus valores son los siguientes:

$$\alpha_1 = 0,93$$

$$PF_1 \times \phi_{1,roof} = 1,17$$

En la Figura 59 se muestra la conversión de la Curva de Capacidad al formato ADRS.

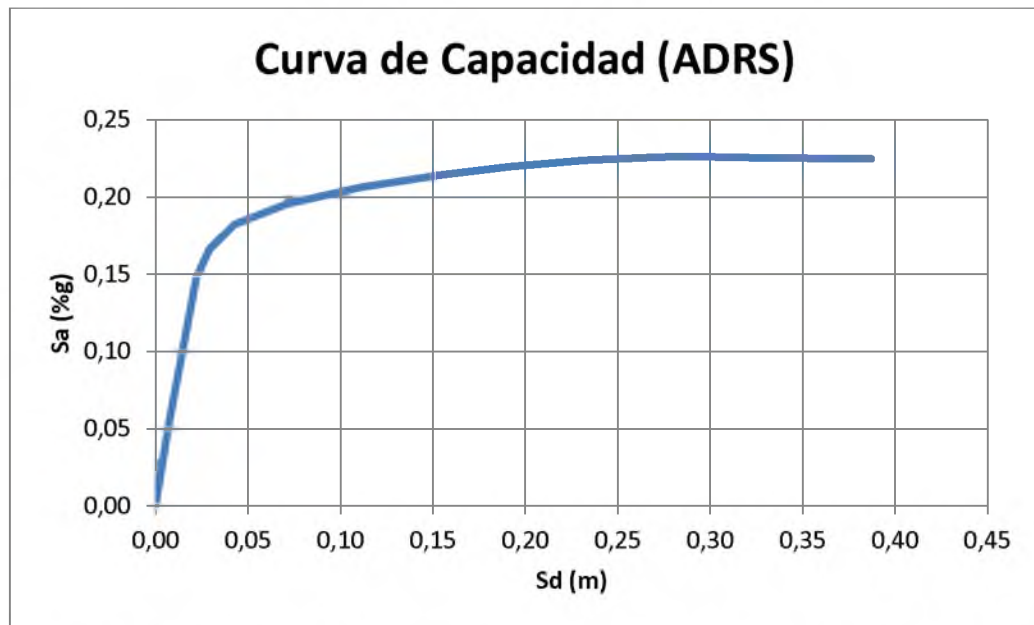


Figura 59. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido Y

De la Curva de Espectro de Capacidad se seleccionó un punto de desempeño el cual deberá ser verificado luego si es correcto o no. En este caso es punto de desempeño (d_{pi}, a_{pi}) tiene los siguientes valores:

$$a_{pi} = 0,21 (\%g)$$

$$d_{pi} = 0,134 m$$

Con el punto de desempeño seleccionado se desarrolló la curva bilineal, ver Capítulo 2.3. Como se muestran en la Figura 60, de la curva bilineal se obtiene el desplazamiento de fluencia, d_y , y la aceleración de fluencia, a_y . Estos valores se muestran a continuación:

$$a_y = 0,167 (\%g)$$

$$d_y = 0,018 m$$

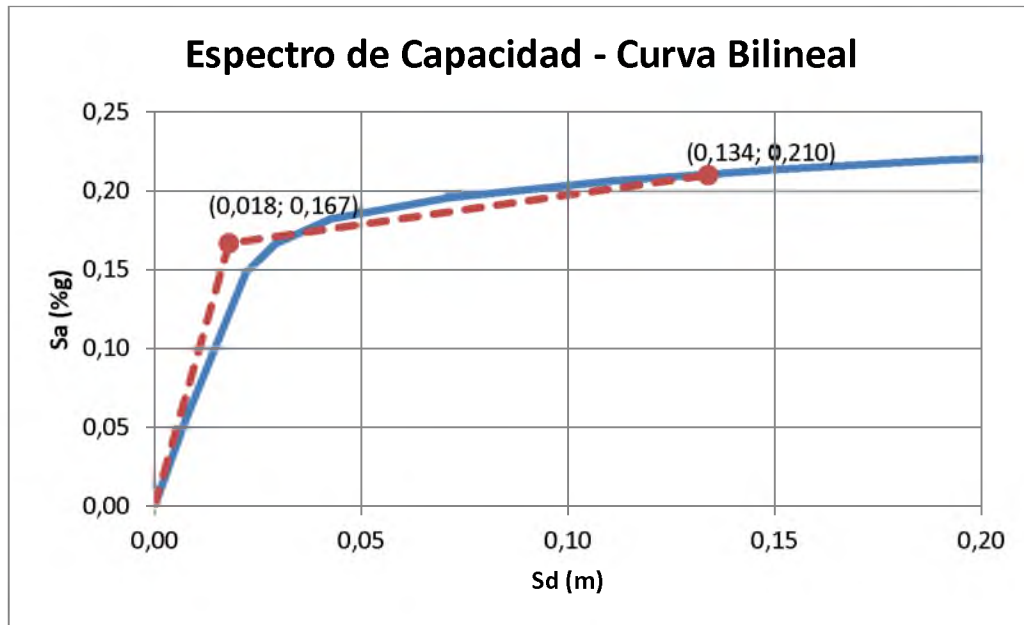


Figura 60. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido Y

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{d_y}{a_y * g}} = 0,658 \text{ seg}$$

Como se indicó en el Capítulo 2.5.3 de este trabajo, la rigidez post-elástica, α , y la ductilidad, μ , se obtienen con las siguientes ecuaciones.

$$\alpha = \frac{\left(\frac{a_{pi} - a_y}{d_{pi} - d_y}\right)}{\left(\frac{a_y}{d_y}\right)} = 0,04$$

$$\mu = \frac{d_{pi}}{d_y} = 7,44$$

Para el cálculo del amortiguamiento efectivo y periodo efectivo se utilizaron ecuaciones aproximadas explicadas en el Capítulo 2.5.3 de este trabajo. Estas expresiones son independientes del tipo de modelo histórico y del valor de alfa.

Para $\mu > 6,5$

$$T_{eff} = \left\{ 0,89 \left[\sqrt{\frac{(\mu - 1)}{1 + 0,05(\mu - 2)}} - 1 \right] + 1 \right\} T_0 = 1,39 \text{ seg}$$

$$\beta_{eff} = 19 \left[\frac{0,64(\mu - 1) - 1}{[0,64(\mu - 1)]^2} \right] \left(\frac{T_{eff}}{T_0} \right)^2 + \beta_0 = 20,58\%$$

El Espectro de Demanda Amortiguado, $(S_a)_\beta$ vs $(S_d)_\beta$, se obtiene a partir del coeficiente de amortiguamiento, B, calculado a continuación:

$$B = \frac{4}{5,6 - \ln \beta_{eff}(\text{en } \%)} = 1,553$$

El Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS se obtiene con las siguientes ecuaciones. En la Figura 61 se muestra el Espectro de Demanda y el Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS para este caso.

$$(S_a)_\beta = \frac{(S_a)_0}{B(\beta_{eff})}$$

$$(S_d)_\beta = \frac{T^2}{4\pi^2} * (S_a)_\beta$$

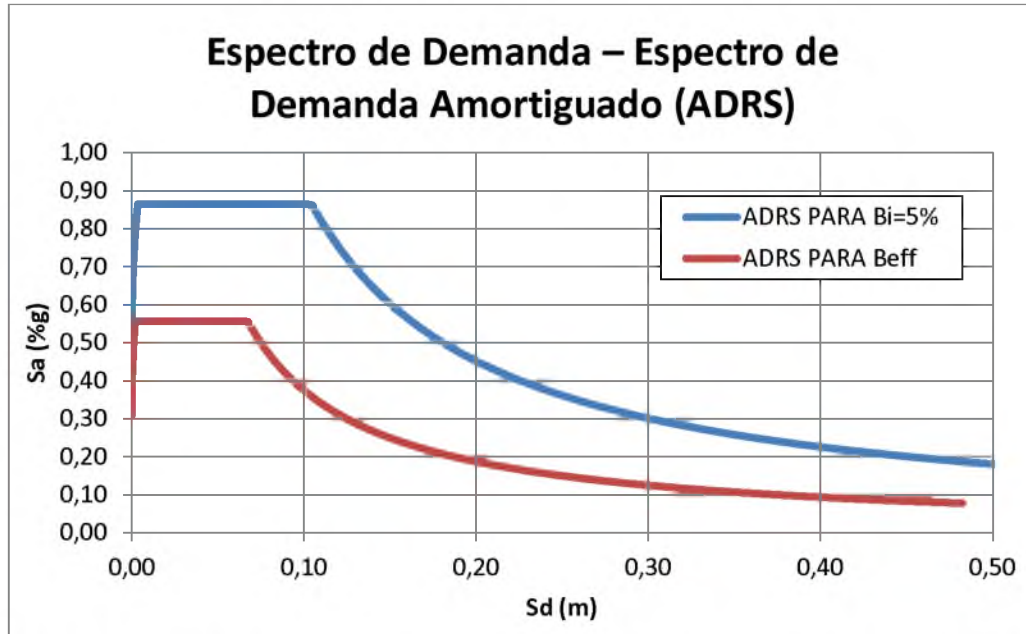


Figura 61. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Raro

Se calculó el factor de modificación, M , por medio de la ecuación presentada en el Capítulo 2.5.3 de este trabajo, como se muestra a continuación:

$$M = \left(\frac{T_{eff}}{T_0}\right)^2 \left(\frac{T_0}{T_{sec}}\right)^2 = \left(\frac{T_{eff}}{T_0}\right)^2 \left(\frac{1 + \alpha(\mu - 1)}{\mu}\right) = 0,755$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento Modificado (MADRS) se obtiene dividiendo las ordenadas de aceleración (ADRS) para el factor M . En la Figura 62 se muestra el Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento Modificado (MADRS)

$$(S_a)_{MADRS} = (S_a)_\beta \times M$$

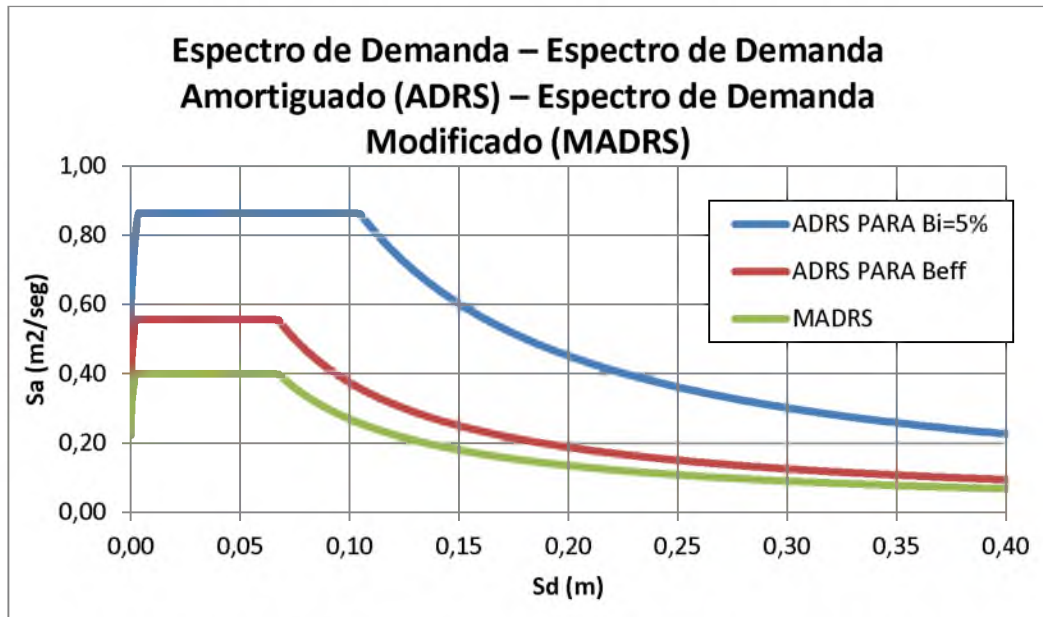


Figura 62. Espectro de demanda Modificado (MADRS) – Sismo Raro

El punto de desempeño (d_i , a_i) se encontrar en la intersección de la Curva de Capacidad con el Espectro de Demanda Aceleración-Desplazamiento Modificado (ver Figura63)

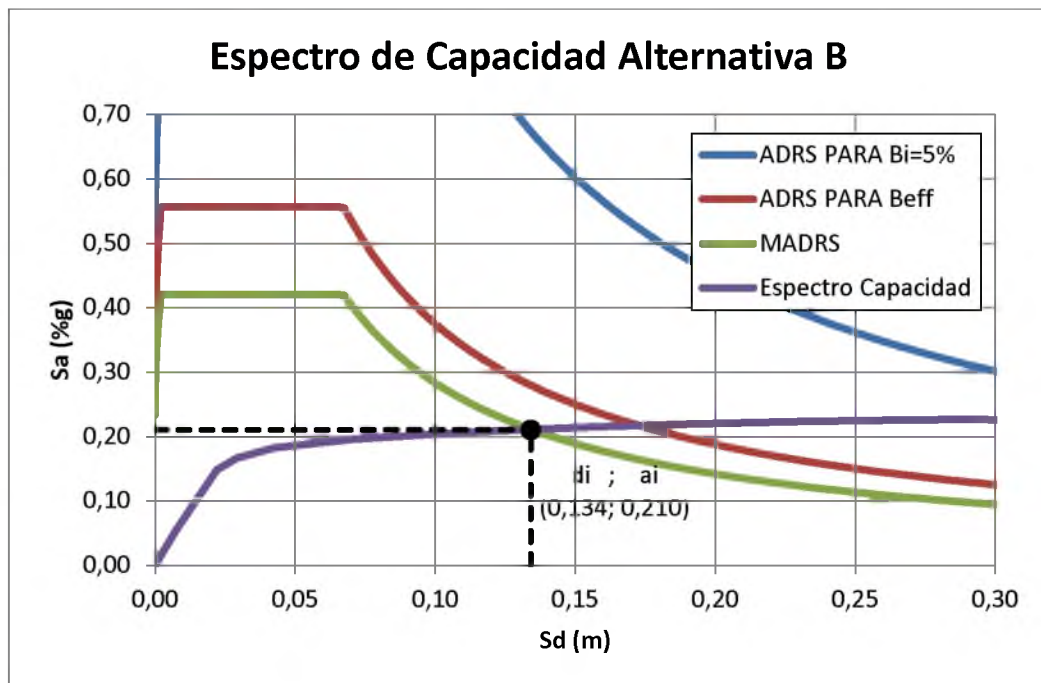


Figura 63. Método Espectro de Capacidad Alternativa B (Sismo raro) – Sentido Y

El máximo desplazamiento esperado y la máxima aceleración esperada tuvieron los siguientes valores:

$$a_i = 0,21 (\%g)$$

$$d_i = 0,134 m$$

Como se muestra a continuación, estos valores deben ser comparados con los asumidos inicialmente; debido a que sus valores son los mismos (o muy cercanos) se acepta como correctos.

$$a_{pi} = 0,21 \rightarrow a_i = 0,21 \quad \underline{OK}$$

$$d_{pi} = 0,134 m \rightarrow d_i = 0,134 m \quad \underline{OK}$$

El desplazamiento espectral debe ser convertido nuevamente a desplazamiento de la estructura por medio de la siguiente ecuación.

$$\delta_{max} = d_i \times PF_1 \times \phi_{1,roof} = 15,70 cm$$

El desplazamiento máximo de la estructura en su parte más alta, de acuerdo al Método Espectro Capacidad Alternativa B, para el Sismo Raro en dirección Y resultó igual a 15,70 cm.

3.7.3.3. SISMO MUY RARO. DIRECCIÓN X

Se transformó el espectro de demanda para el Sismo Raro al formato Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento (ADRS) por medio de la siguiente fórmula:

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} * S_a \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento en formato ADRS para el Sismo Raro se muestra en la Figura 64:

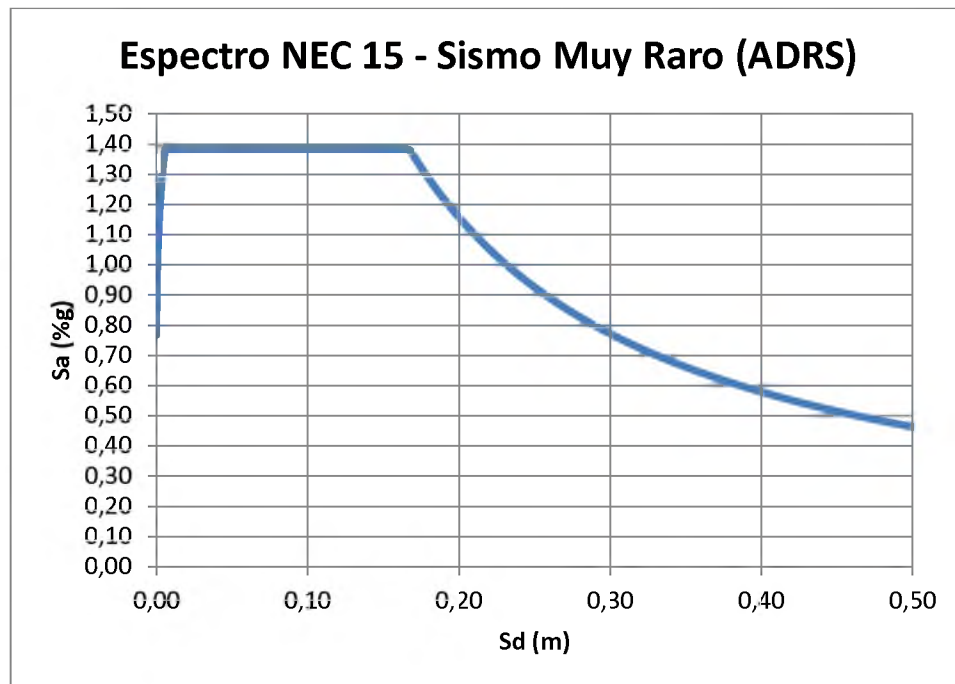


Figura 64. Espectro de Respuesta del Sismo Muy Raro en formato ADRS

La curva de capacidad, obtenida del programa Etabs y mostrada en el Capítulo 2.2 de este trabajo, fue transformada también a formato ADRS por medio de las siguientes expresiones:

$$S_{a_i} = \frac{V_i/W}{\alpha_1} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

$$S_{d_i} = \frac{\delta_i}{PF_1 \times \phi_{1,roof}} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

α_1 , PF_1 y $\phi_{1,roof}$ fueron obtenidos del análisis modal del programa Etabs y sus valores son los siguientes:

$$\alpha_1 = 0,97$$

$$PF_1 \times \phi_{1,roof} = 1,23$$

En la Figura 65 se muestra la conversión de la Curva de Capacidad al formato ADRS.

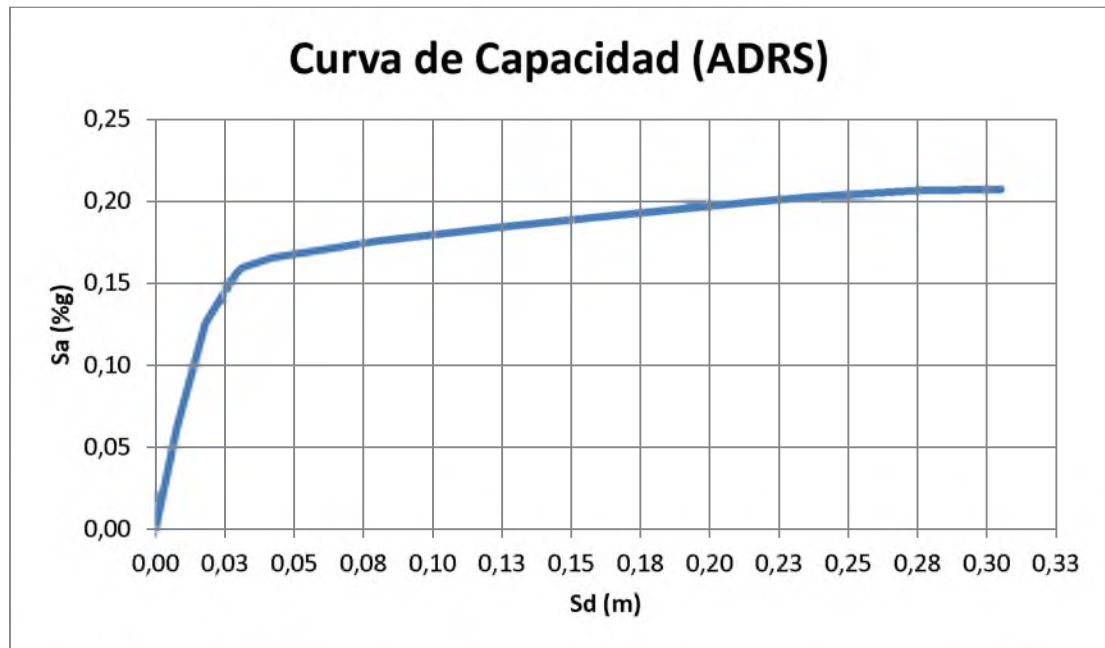


Figura 65. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido X

De la Curva de Espectro de Capacidad se seleccionó un punto de desempeño el cual deberá ser verificado luego si es correcto o no. En este caso es punto de desempeño (d_{pi} , a_{pi}) tiene los siguientes valores:

$$a_{pi} = 0,207 (\%g)$$

$$d_{pi} = 0,30 \text{ m}$$

Con el punto de desempeño seleccionado se desarrolló la curva bilineal, ver Capítulo 2.3. Como se muestran en la Figura 66, de la curva bilineal se obtiene el desplazamiento de fluencia, d_y , y la aceleración de fluencia, a_y . Estos valores se muestran a continuación:

$$a_y = 0,161 (\%g)$$

$$d_y = 0,0175 \text{ m}$$

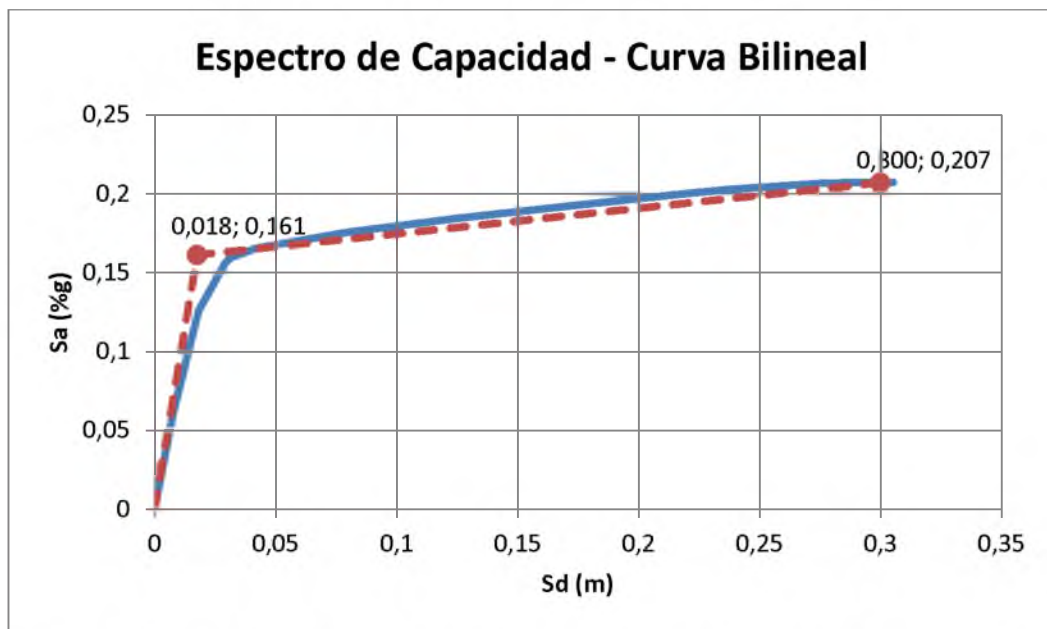


Figura 66. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido X

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{d_y}{a_y * g}} = 0,661 \text{ seg}$$

Como se indicó en el Capítulo 2.5.3 de este trabajo, la rigidez post-elástica, α , y la ductilidad, μ , se obtienen con las siguientes ecuaciones.

$$\alpha = \frac{\left(\frac{a_{pi} - a_y}{d_{pi} - d_y}\right)}{\left(\frac{a_y}{d_y}\right)} = 0,0176$$

$$\mu = \frac{d_{pi}}{d_y} = 17,14$$

Para el cálculo del amortiguamiento efectivo y periodo efectivo se utilizaron ecuaciones aproximadas explicadas en el Capítulo 2.5.3 de este trabajo. Estas expresiones son independientes del tipo de modelo histórico y del valor de alfa.

Para $\mu > 6,5$

$$T_{eff} = \left\{ 0,89 \left[\sqrt{\frac{(\mu - 1)}{1 + 0,05(\mu - 2)}} - 1 \right] + 1 \right\} T_0 = 1,856 \text{ seg}$$

$$\beta_{eff} = 19 \left[\frac{0,64(\mu - 1) - 1}{[0,64(\mu - 1)]^2} \right] \left(\frac{T_{eff}}{T_0} \right)^2 + \beta_0 = 18,09\%$$

El Espectro de Demanda Amortiguado, $(S_a)_\beta$ vs $(S_d)_\beta$, se obtiene a partir del coeficiente de amortiguamiento, B, calculado a continuación:

$$B = \frac{4}{5,6 - \ln \beta_{eff}(\text{en } \%)} = 1,479$$

El Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS se obtiene con las siguientes ecuaciones. En la Figura 67 se muestra el Espectro de Demanda y el Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS para este caso.

$$(S_a)_\beta = \frac{(S_a)_0}{B(\beta_{eff})}$$

$$(S_d)_\beta = \frac{T^2}{4\pi^2} * (S_a)_\beta$$

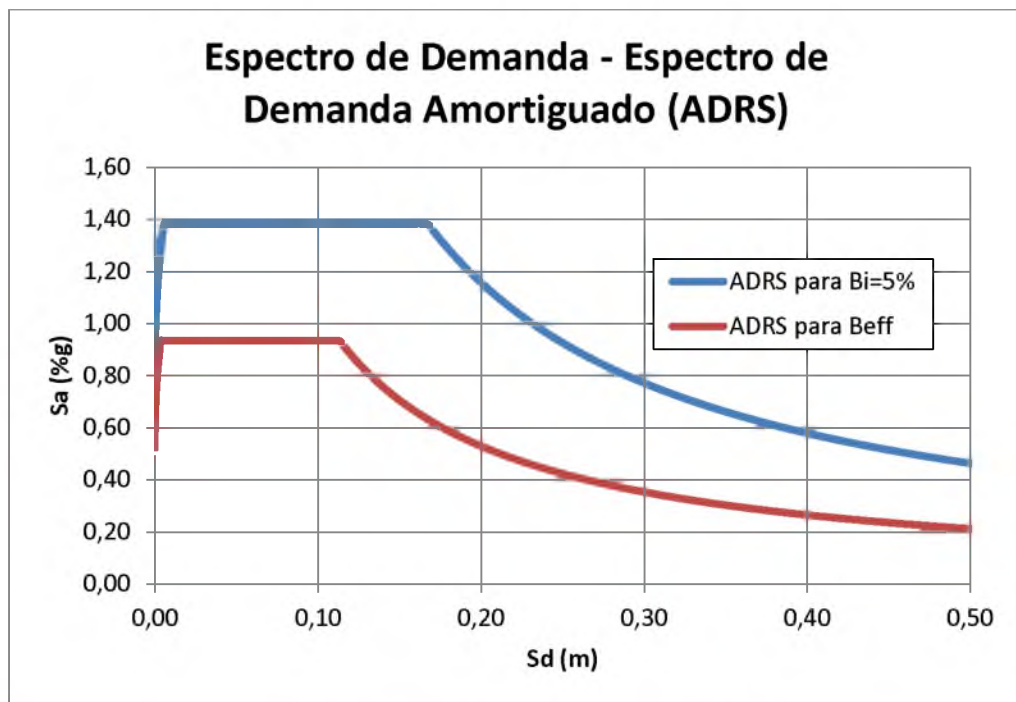


Figura 67. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Muy Raro

Se calculó el factor de modificación, M, por medio de la siguiente ecuación presentada en el Capítulo 2.5.3 de este trabajo, como se muestra a continuación:

$$M = \left(\frac{T_{eff}}{T_0}\right)^2 \left(\frac{T_0}{T_{sec}}\right)^2 = \left(\frac{T_{eff}}{T_0}\right)^2 \left(\frac{1 + \alpha(\mu - 1)}{\mu}\right) = 0,59$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento Modificado (MADRS) se obtiene dividiendo las ordenadas de aceleración (ADRS) para el factor M. En la Figura 68 se muestra el Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento Modificado (MADRS)

$$(S_a)_{MADRS} = (S_a)_\beta \times M$$

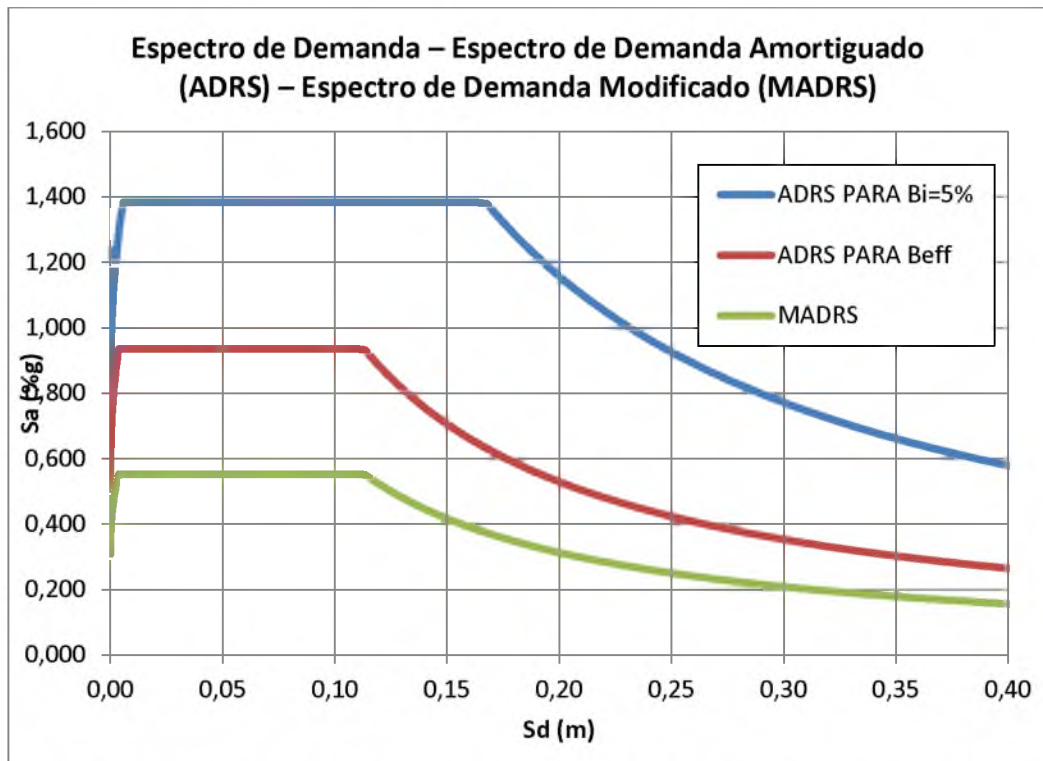


Figura 68. Espectro de demanda Modificado (MADRS) – Sismo Muy Raro

El punto de desempeño (d_i, a_i) se encontrar en la intersección de la Curva de Capacidad con el Espectro de Demanda Aceleración-Desplazamiento Modificado (ver Figura 69).

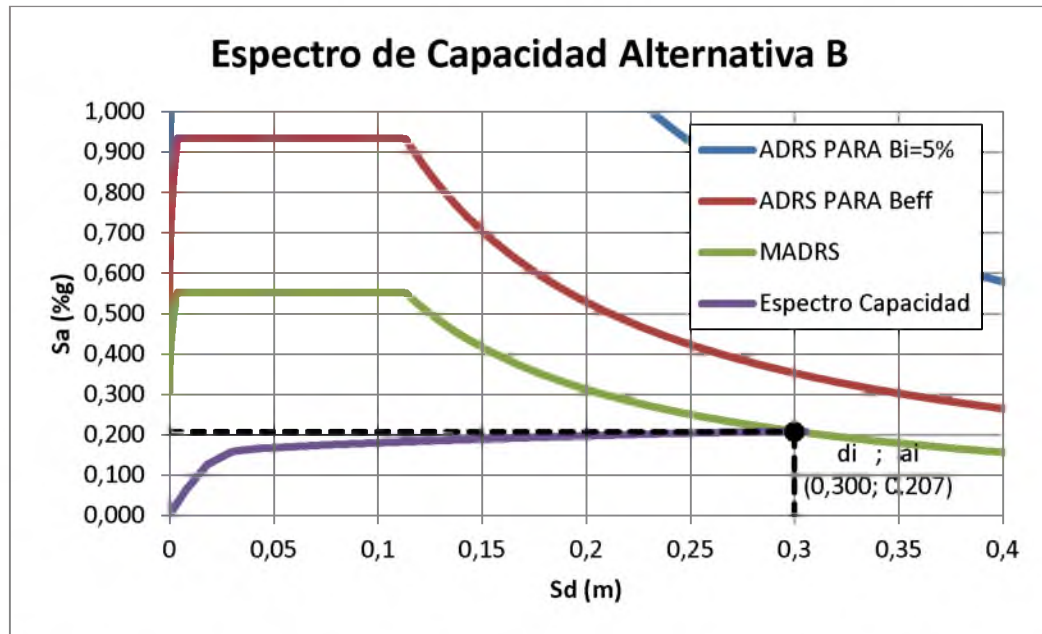


Figura 69. Método Espectro de Capacidad Alternativa B (Sismo Muy Raro) – Sentido X

El máximo desplazamiento esperado y la máxima aceleración esperada tuvieron los siguientes valores:

$$a_i = 0,207 \text{ (\%g)}$$

$$d_i = 0,30 \text{ m}$$

Como se muestra a continuación, estos valores deben ser comparados con los asumidos inicialmente; debido a que sus valores son los mismos (o muy cercanos) se acepta como correctos.

$$a_{pi} = 0,207 \rightarrow a_i = 0,207 \quad \underline{OK}$$

$$d_{pi} = 0,30 \text{ m} \rightarrow d_i = 0,30 \text{ m} \quad \underline{OK}$$

El desplazamiento espectral debe ser convertido nuevamente a desplazamiento de la estructura por medio de la siguiente ecuación.

$$\delta_{max} = d_i \times PF_1 \times \phi_{1,roof} = 37,00 \text{ cm}$$

El desplazamiento máximo de la estructura en su parte más alta, de acuerdo al Método Espectro Capacidad Alternativa B, para el Sismo Muy Raro en dirección X resultó igual a 37,00 cm.

3.7.3.4. SISMO MUY RARO. DIRECCIÓN Y

Se transformó el espectro de demanda para el Sismo Raro al formato Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento (ADRS) por medio de la siguiente fórmula:

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} * S_a \text{ (ATC - 40 Pag. 8 - 12)}$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento en formato ADRS para el Sismo Raro se muestra en la Figura 70:

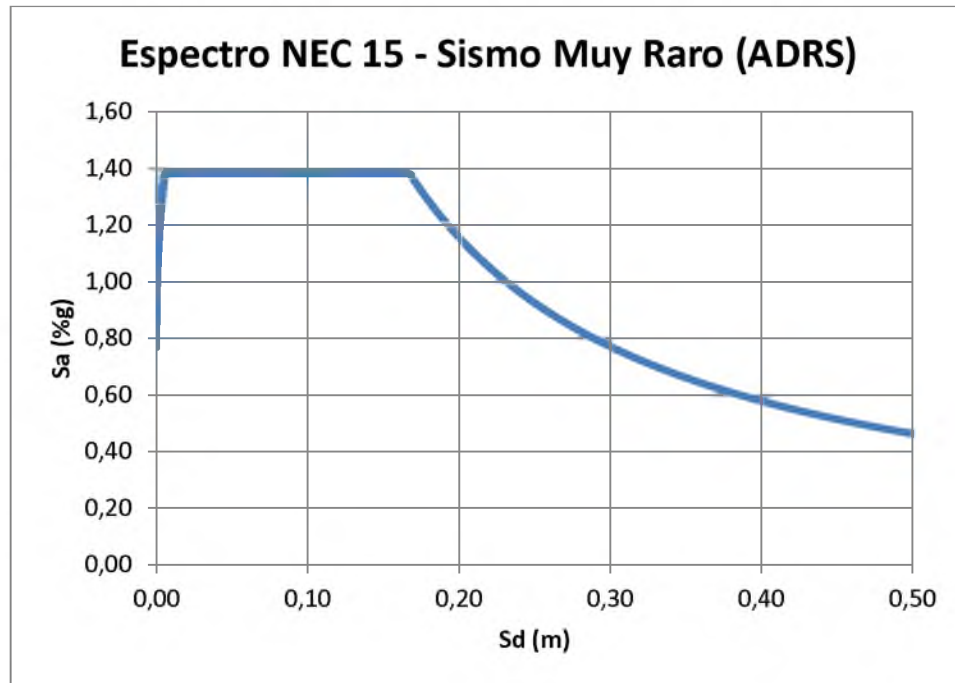


Figura 70. Espectro de Respuesta del Sismo Muy Raro en formato ADRS

La curva de capacidad, obtenida del programa Etabs y mostrada en Capítulo 2.2 de este trabajo, fue transformada también a formato ADRS por medio de las siguientes expresiones:

$$S_{a_i} = \frac{V_i/W}{\alpha_1} \quad (\text{ATC} - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

$$S_{d_i} = \frac{\delta_i}{PF_1 \times \phi_{1,roof}} \quad (\text{ATC} - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

α_1 , PF_1 y $\phi_{1,roof}$ fueron obtenidos del análisis modal del programa Etabs y sus valores son los siguientes:

$$\alpha_1 = 0,93$$

$$PF_1 \times \phi_{1,roof} = 1,17$$

En la Figura 71 se muestra la conversión de la Curva de Capacidad al formato ADRS.

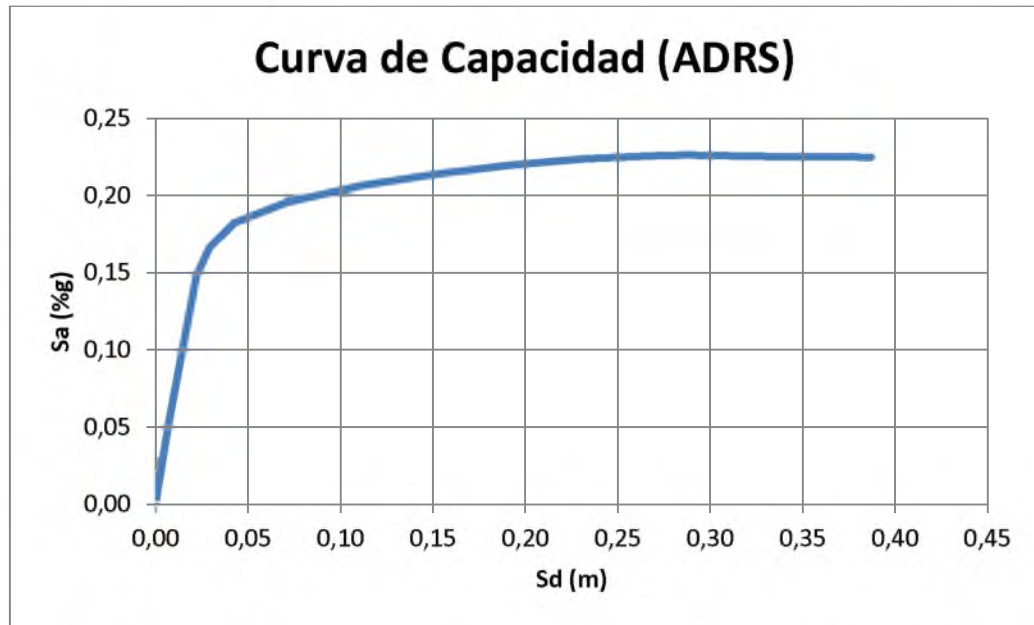


Figura 71. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido Y

De la Curva de Espectro de Capacidad se seleccionó un punto de desempeño el cual deberá ser verificado luego si es correcto o no. En este caso es punto de desempeño (d_{pi} , a_{pi}) tiene los siguientes valores:

$$a_{pi} = 0,225 (\%g)$$

$$d_{pi} = 0,275 m$$

Con el punto de desempeño seleccionado se desarrolló la curva bilineal, ver Capítulo 2.3. Como se muestran en la Figura 72, de la curva bilineal se obtiene el desplazamiento de fluencia, d_y , y la aceleración de fluencia, a_y . Estos valores se muestran a continuación:

$$a_y = 0,182 (\%g)$$

$$d_y = 0,018 m$$

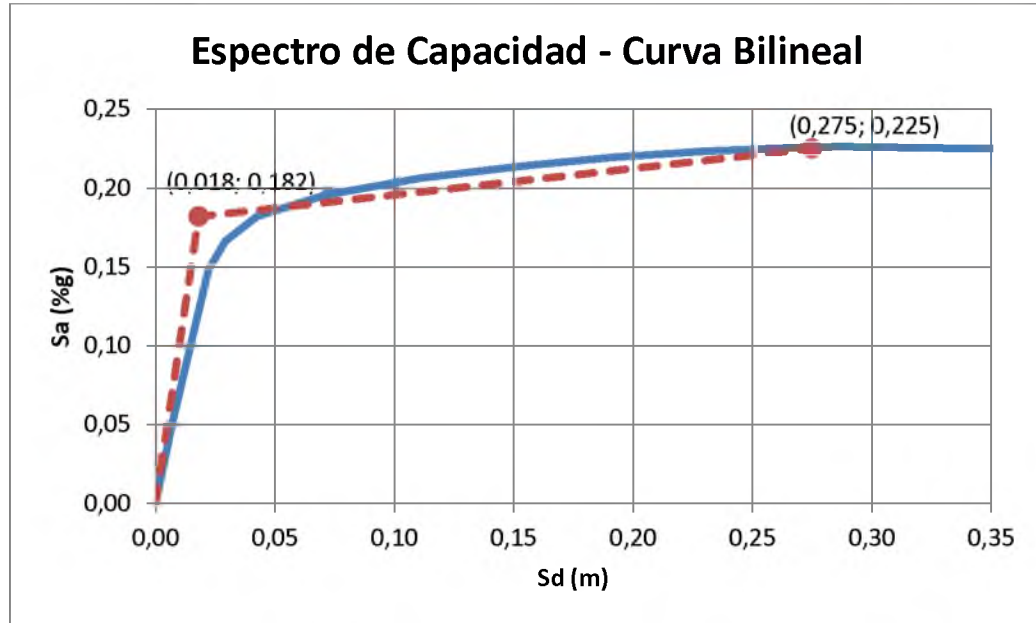


Figura 72. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido Y

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{d_y}{a_y * g}} = 0,63 \text{ seg}$$

Como se indicó en el Capítulo 2.5.3 de este trabajo, la rigidez post-elástica, α , y la ductilidad, μ , se obtienen con las siguientes ecuaciones.

$$\alpha = \frac{\left(\frac{a_{pi} - a_y}{d_{pi} - d_y}\right)}{\left(\frac{a_y}{d_y}\right)} = 0,0165$$

$$\mu = \frac{d_{pi}}{d_y} = 15,27$$

Para el cálculo del amortiguamiento efectivo y periodo efectivo se utilizaron ecuaciones aproximadas explicadas en el Capítulo 2.5.3 de este trabajo. Estas expresiones son independientes del tipo de modelo histórico y del valor de alfa.

Para $\mu > 6,5$

$$T_{eff} = \left\{ 0,89 \left[\sqrt{\frac{(\mu - 1)}{1 + 0,05(\mu - 2)}} - 1 \right] + 1 \right\} T_0 = 1,714 \text{ seg}$$

$$\beta_{eff} = 19 \left[\frac{0,64(\mu - 1) - 1}{[0,64(\mu - 1)]^2} \right] \left(\frac{T_{eff}}{T_0} \right)^2 + \beta_0 = 18,67\%$$

El Espectro de Demanda Amortiguado, $(S_a)_\beta$ vs $(S_d)_\beta$, se obtiene a partir del coeficiente de amortiguamiento, B, calculado a continuación:

$$B = \frac{4}{5,6 - \ln \beta_{eff}(\text{en } \%)} = 1,49$$

El Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS se obtiene con las siguientes ecuaciones. En la Figura 73 se muestra el Espectro de Demanda y el Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS para este caso.

$$(S_a)_\beta = \frac{(S_a)_0}{B(\beta_{eff})}$$

$$(S_d)_\beta = \frac{T^2}{4\pi^2} * (S_a)_\beta$$

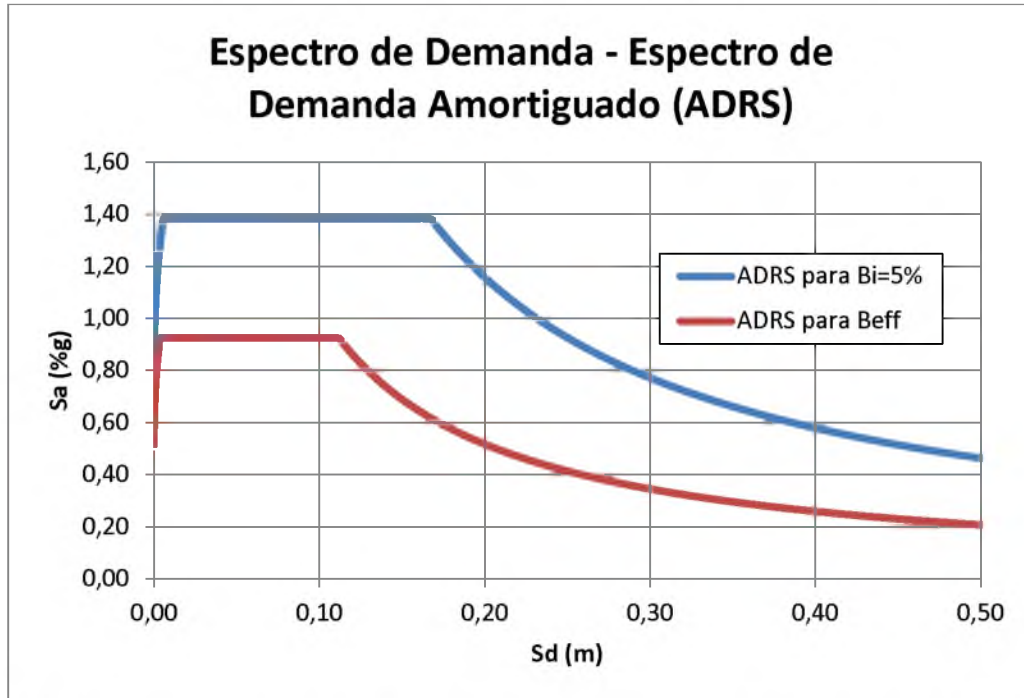


Figura 73. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Muy Raro

Se calculó el factor de modificación, M , por medio de la ecuación presentada en el Capítulo 2.5.3 de este trabajo, como se muestra a continuación:

$$M = \left(\frac{T_{eff}}{T_0}\right)^2 \left(\frac{T_0}{T_{sec}}\right)^2 = \left(\frac{T_{eff}}{T_0}\right)^2 \left(\frac{1 + \alpha(\mu - 1)}{\mu}\right) = 0,597$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento Modificado (MADRS) se obtiene dividiendo las ordenadas de aceleración (ADRS) para el factor M . En la Figura 74 se muestra el Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento Modificado (MADRS)

$$(S_a)_{MADRS} = (S_a)_\beta \times M$$

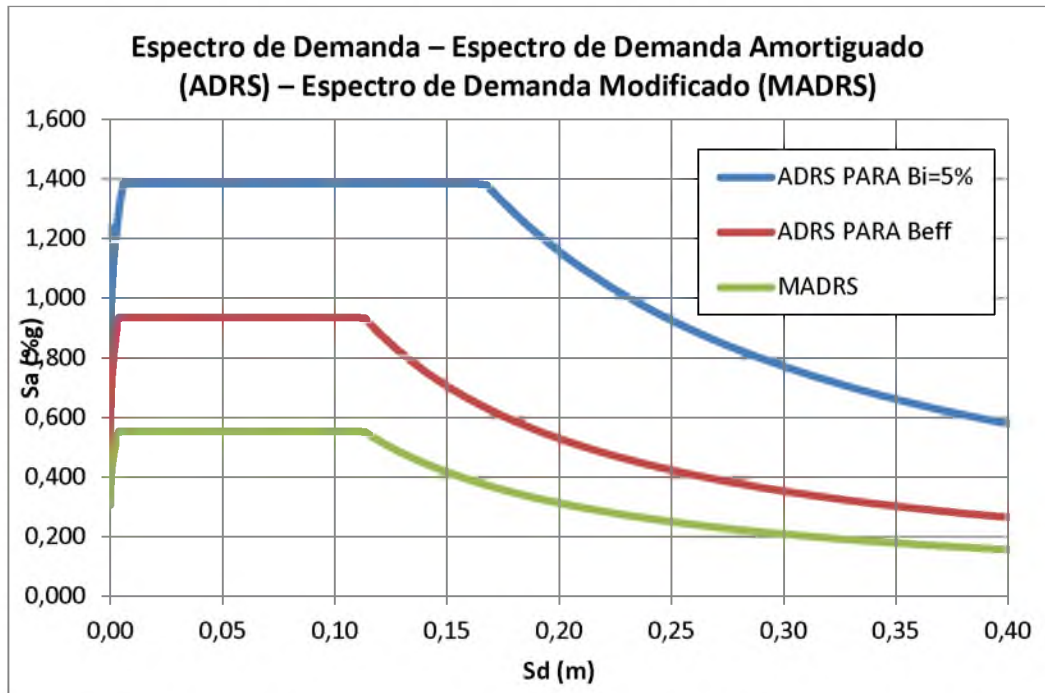


Figura 74. Espectro de demanda Modificado (MADRS) – Sismo Muy Raro

El punto de desempeño (d_i , a_i) se encontrar en la intersección de la Curva de Capacidad con el Espectro de Demanda Aceleración-Desplazamiento Modificado (ver Figura 75).

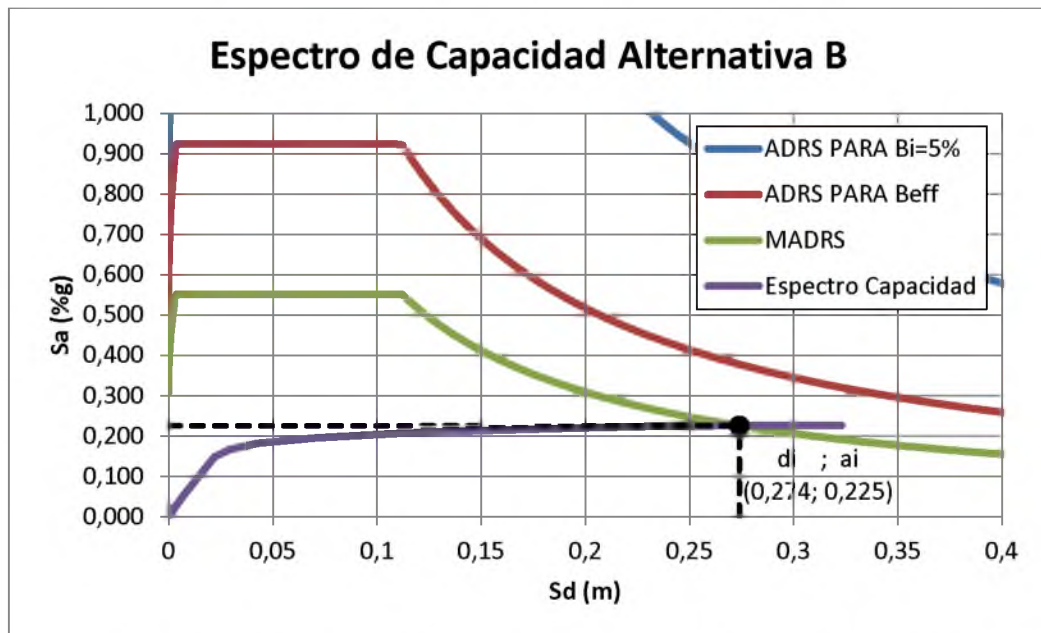


Figura 75. Método Espectro de Capacidad Alternativa B (Sismo Muy Raro) – Sentido Y

El máximo desplazamiento esperado y la máxima aceleración esperada tuvieron los siguientes valores:

$$a_i = 0,225 \text{ (\%g)}$$

$$d_i = 0,274 \text{ m}$$

Como se muestra a continuación, estos valores deben ser comparados con los asumidos inicialmente; debido a que sus valores son los mismos (o muy cercanos) se acepta como correctos.

$$a_{pi} = 0,225 \rightarrow a_i = 0,225 \text{ OK}$$

$$d_{pi} = 0,275 \text{ m} \rightarrow d_i = 0,274 \text{ m} \text{ OK}$$

El desplazamiento espectral debe ser convertido nuevamente a desplazamiento de la estructura por medio de la siguiente ecuación.

$$\delta_{max} = d_i \times PF_1 \times \phi_{1,roof} = 32,00 \text{ cm}$$

El desplazamiento máximo de la estructura en su parte más alta, de acuerdo al Método Espectro Capacidad Alternativa B, para el Sismo Muy Raro en dirección Y resultó igual a 32,00 cm.

3.7.4. MÉTODO ESPECTRO DE CAPACIDAD. ALTERNATIVA C.

En el Capítulo 2.5.4 de este trabajo se explica detalladamente la aplicación del Método Espectro de Capacidad Alternativa C especificado en el FEMA 440. A continuación se muestran los resultados obtenidos del uso de este método para

hallar el punto de desempeño del Edificio de la Facultad de Ingeniería tanto para el sismo raro como para el sismo muy raro.

Algunos de los cálculos realizados en este método son iguales a la Alternativa A del Método Espectro de Capacidad. Estos cálculos se mostrarán nuevamente para que su desarrollo sea más claro.

3.7.4.1. SISMO RARO. DIRECCIÓN X

Se transformó el espectro de demanda para el Sismo Raro al formato Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento (ADRS) por medio de la siguiente fórmula:

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} * S_a \text{ (ATC - 40 Pag. 8 - 12)}$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento en formato ADRS para el Sismo Raro se muestra en la Figura 76:

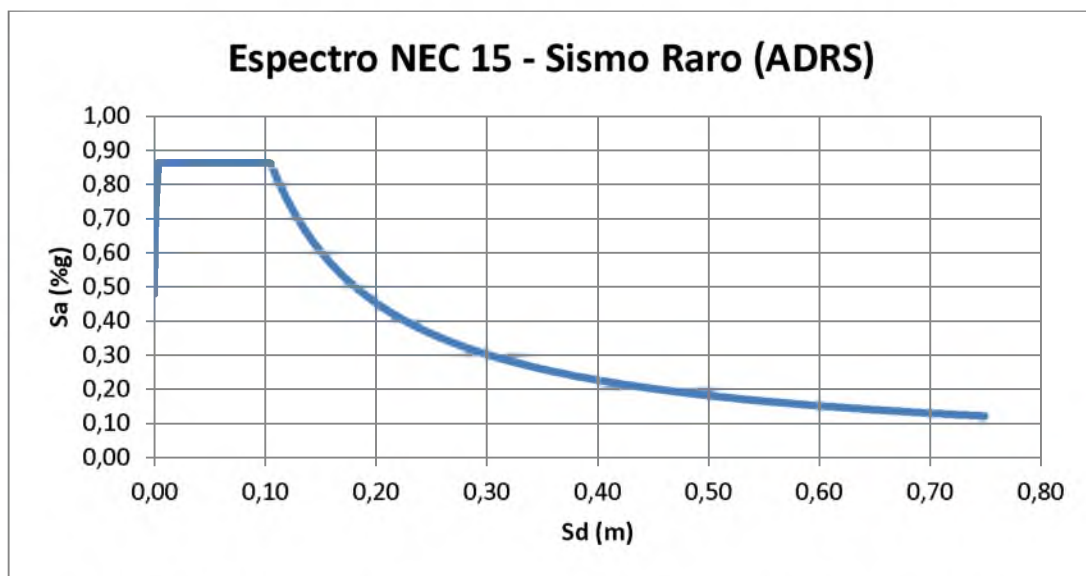


Figura 76. Espectro de Respuesta del Sismo Raro en formato ADRS

La curva de capacidad, obtenida del programa Etabs y mostrada en el Capítulo 2.2 de este trabajo, fue transformada también a formato ADRS por medio de las siguientes expresiones:

$$S_{a_i} = \frac{V_i/W}{\alpha_1} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

$$S_{d_i} = \frac{\delta_i}{PF_1 \times \phi_{1,roof}} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

α_1 , PF_1 y $\phi_{1,roof}$ fueron obtenidos del análisis modal del programa Etabs y sus valores son los siguientes:

$$\alpha_1 = 0,97$$

$$PF_1 \times \phi_{1,roof} = 1,23$$

En la Figura 77 se muestra la conversión de la Curva de Capacidad al formato ADRS.

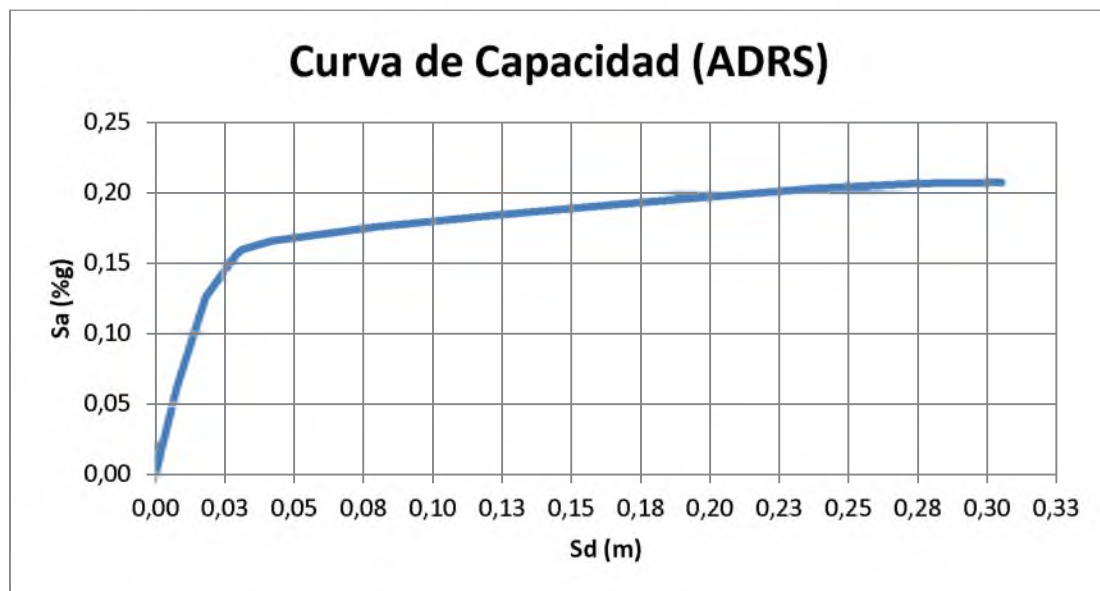


Figura 77. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido X

Se asumen varios valores de ductilidad para los cuales se calcula el periodo efectivo, T_{eff} , el amortiguamiento efectivo, β_{eff} , el coeficiente M, y el periodo secante, T_{sec} , por medio de las ecuaciones mencionadas en el Capitulo 2.5.4.

Se debe de realizar la representación bilineal de la Curva de Espectro de Capacidad para cada ductilidad asumida (ver Capitulo 2.3).

A continuación se muestra una tabla con los valores de periodo efectivo, amortiguamiento efectivo, coeficiente M y periodo secante obtenidos para las ductilidades estudiadas.

Ductilidad μ	Periodo Efectivo T_{eff}	Amortiguamiento Efectivo β_{eff}	Coeficiente M	Periodo Secante T_{sec}
1	0,74	5	1	0,74
2	0,86	8,80	0,84	0,93
3	1,07	15,80	0,91	1,12
4	1,17	19,96	0,84	1,28
5	1,25	20,28	0,78	1,41
12	1,70	19,71	0,68	2,07

Tabla 6. Periodos efectivos, Amortiguamientos efectivos, Coeficientes M Y Periodo secantes para diferentes valores de ductilidad (Alternativa C).

Con los valores mostrados en la Tabla 6 se grafican los Espectros de Demanda Modificados (MDRAS) para cada uno de las ductilidades estudiadas, como se muestra en la Figura 78.

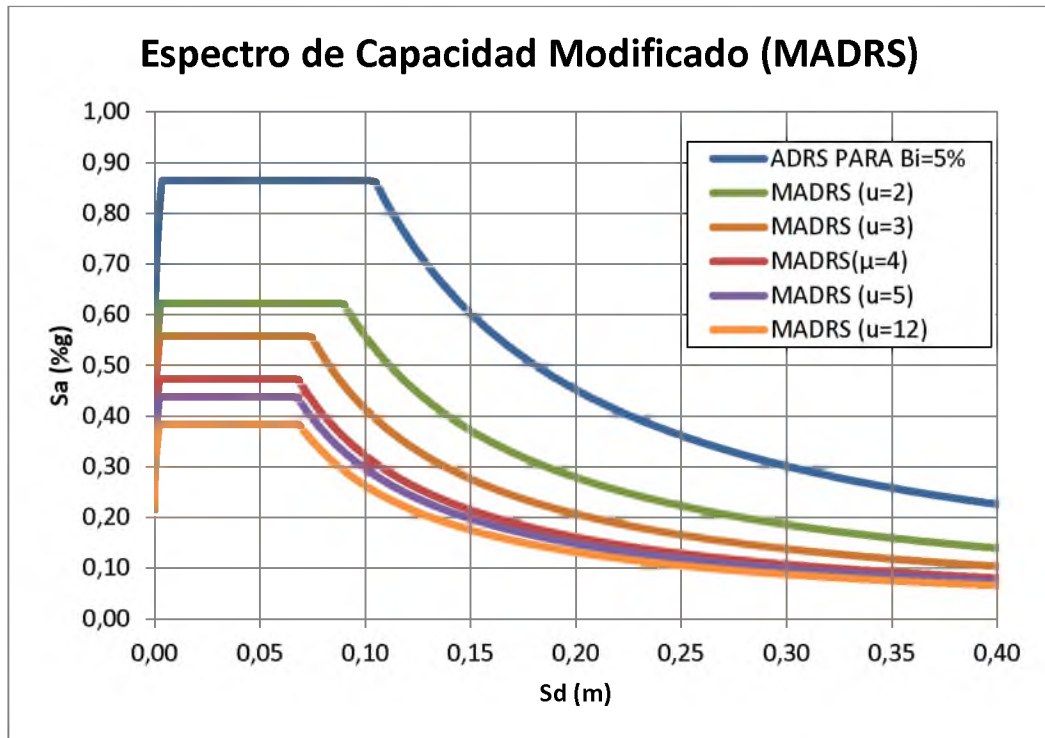


Figura 78. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) para diferentes valores de ductilidad.

Si se trazan líneas rectas al origen, cada una de estas representara un periodo secante. El posible punto de desempeño se encontrará en la intersección del periodo secante radial, T_{sec} , con el MADRS.

En la Figura 79 se muestra la intersección del periodo secante radial con el correspondiente Espectro de Demanda Modificado (MADRS)

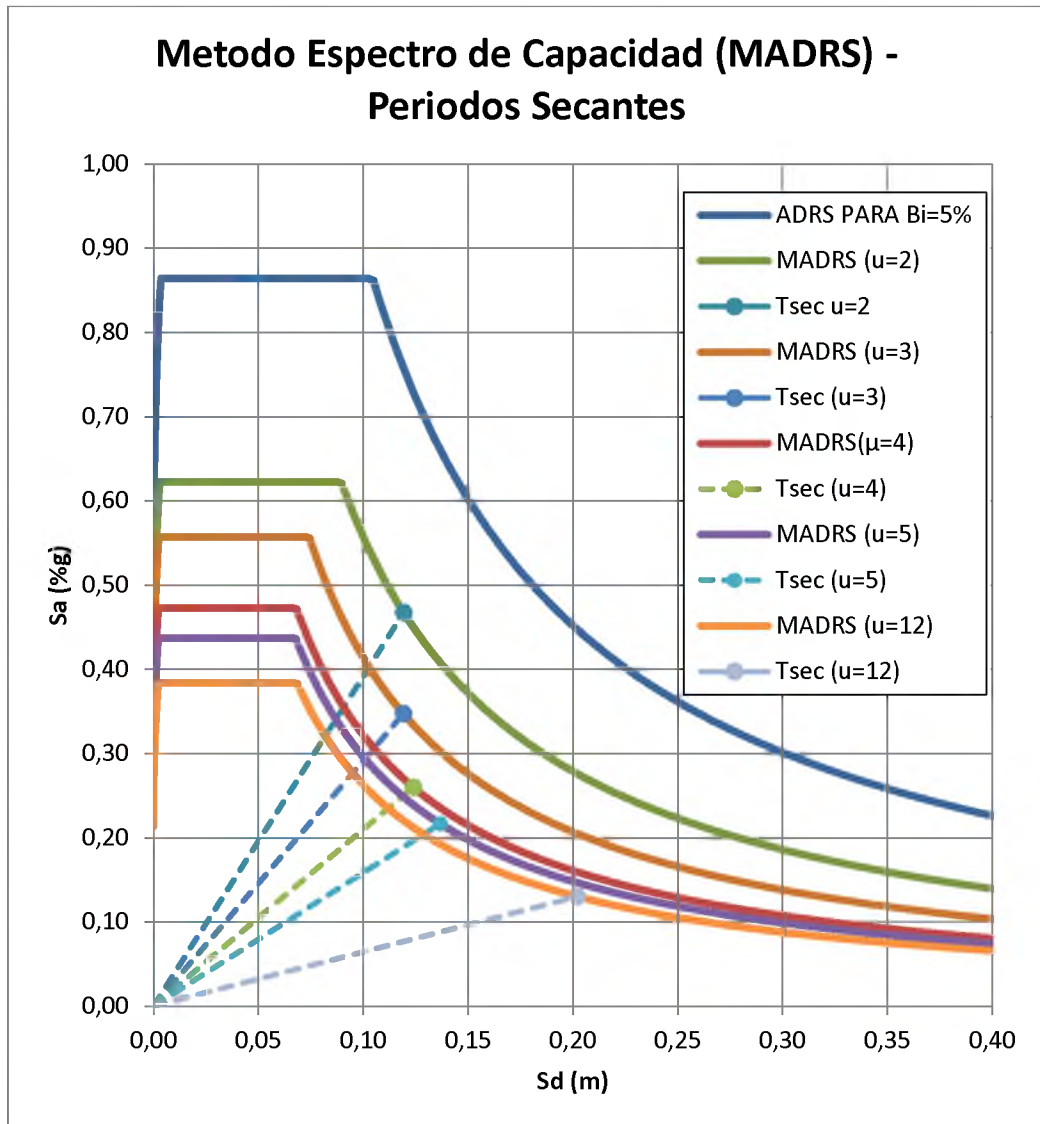


Figura 79. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) y Periodos secantes para diferentes valores de ductilidad.

El actual punto de desempeño deberá encontrarse sobre la línea que une la intersección de los periodos secantes con el Espectro de Capacidad Modificado correspondiente y sobre la Curva del Espectro de Capacidad. La intersección entre estas dos curvas definirá el punto de desempeño.

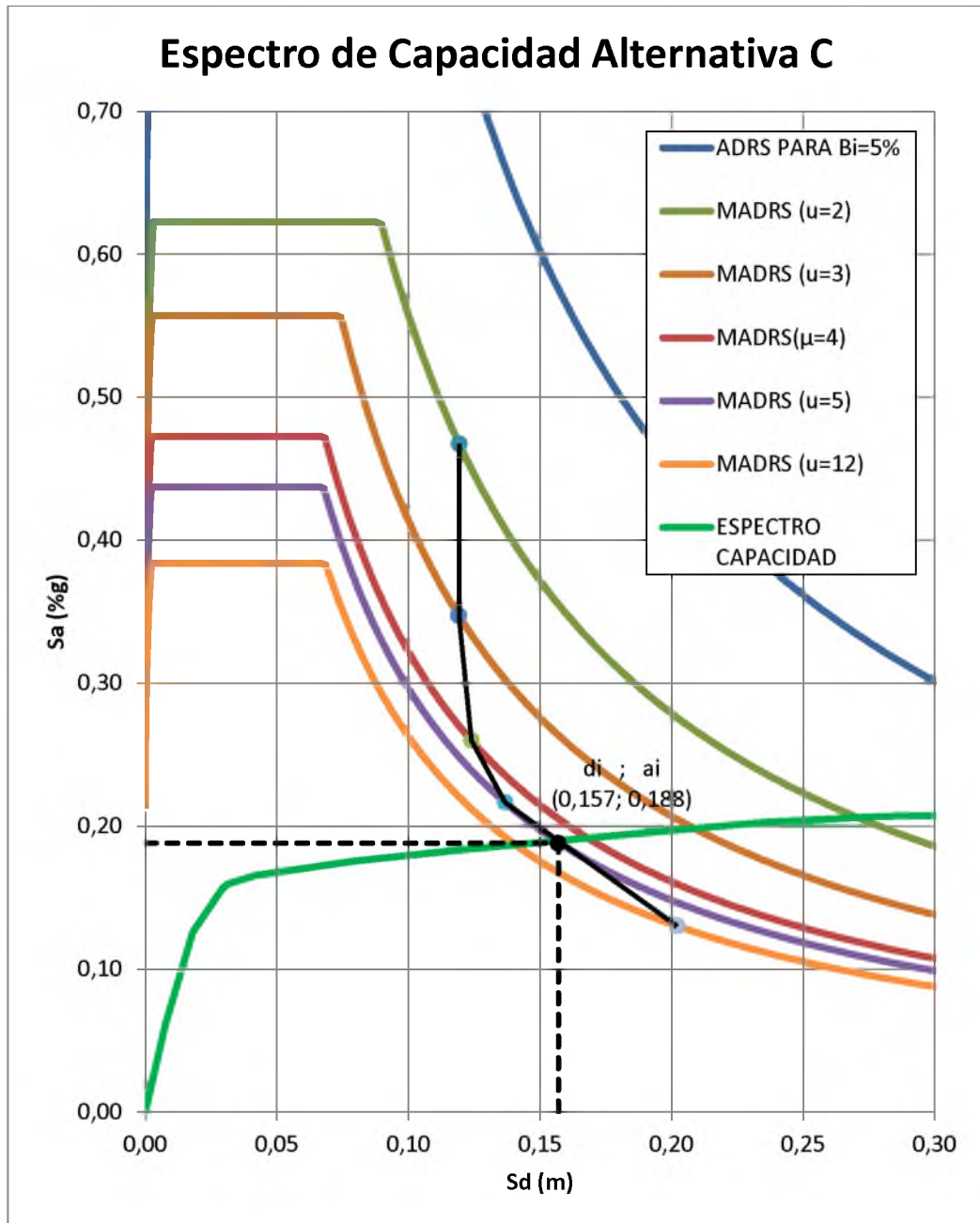


Figura 80. Método Espectro de Capacidad Alternativa C (Sismo raro) – Sentido X

De la Figura 80 se obtiene el máximo desplazamiento esperado y la máxima aceleración esperada, las cuales tuvieron los siguientes valores:

$$a_i = 0,188 (\%g)$$

$$d_i = 0,157 m$$

El desplazamiento espectral debe ser convertido nuevamente a desplazamiento de la estructura por medio de la ecuación XXXXX.

$$\delta_{max} = d_i \times PF_1 \times \phi_{1,roof} = 19,30 \text{ cm}$$

El desplazamiento máximo de la estructura en su parte más alta, de acuerdo al Método Espectro Capacidad Alternativa C, para el Sismo Raro en dirección X resultó igual a 19,30 cm

3.7.4.2. SISMO RARO. DIRECCIÓN Y

Se transformó el espectro de demanda para el Sismo Raro al formato Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento (ADRS) por medio de la siguiente fórmula:

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} * S_a \text{ (ATC - 40 Pag. 8 - 12)}$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento en formato ADRS para el Sismo Raro se muestra en la Figura 81:

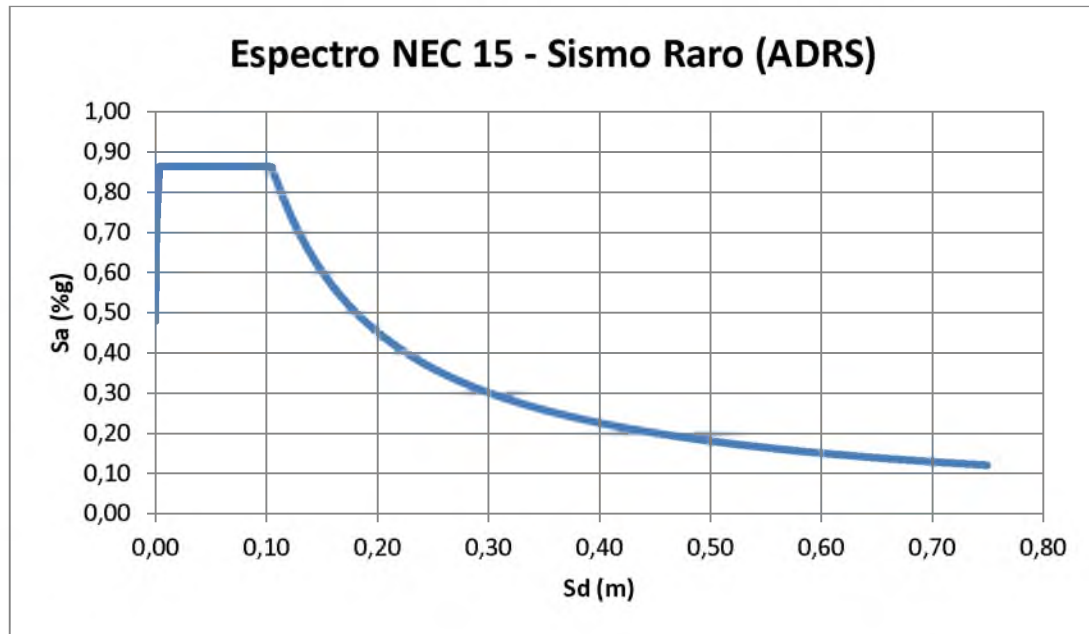


Figura 81. Espectro de Respuesta del Sismo Raro en formato ADRS

La curva de capacidad, obtenida del programa Etabs y mostrada en Capítulo 2.2 de este trabajo, fue transformada también a formato ADRS por medio de las siguientes expresiones:

$$S_{a_i} = \frac{V_i/W}{\alpha_1} \quad (\text{ATC} - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

$$S_{d_i} = \frac{\delta_i}{PF_1 \times \phi_{1,roof}} \quad (\text{ATC} - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

α_1 , PF_1 y $\phi_{1,roof}$ fueron obtenidos del análisis modal del programa Etabs y sus valores son los siguientes:

$$\alpha_1 = 0,93$$

$$PF_1 \times \phi_{1,roof} = 1,17$$

En la Figura 82 se muestra la conversión de la Curva de Capacidad al formato ADRS.

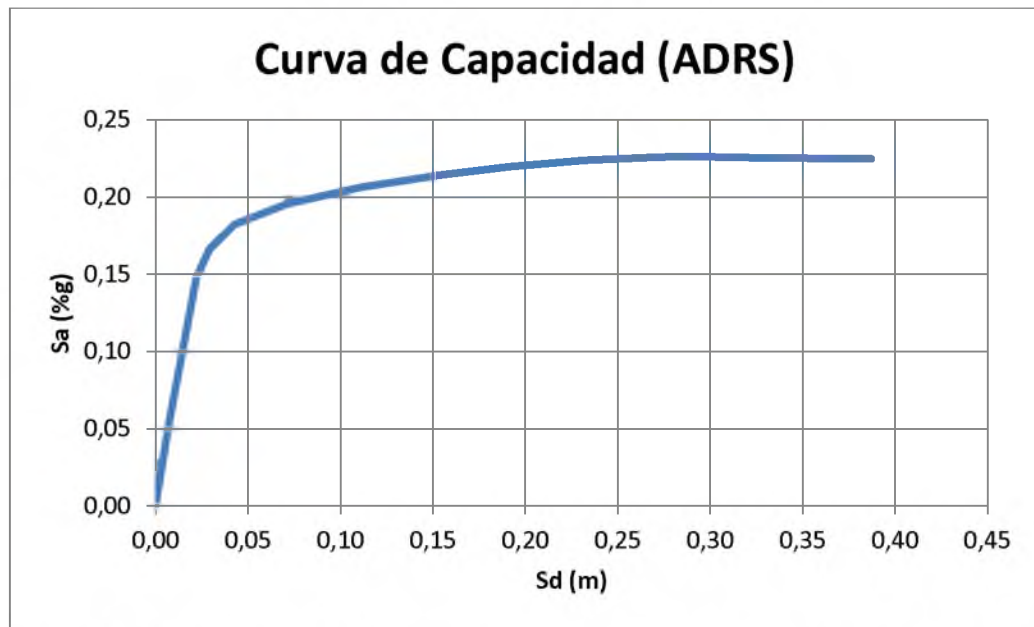


Figura 82. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido Y

Se asumen varios valores de ductilidad para los cuales se calcula el periodo efectivo, T_{eff} , el amortiguamiento efectivo, β_{eff} , el coeficiente M , y el periodo secante, T_{sec} , por medio de las ecuaciones mencionadas en el Capítulo 2.5.4.

Se debe de realizar la representación bilineal de la Curva de Espectro de Capacidad para cada ductilidad asumida (ver Capítulo 2.3).

A continuación se muestra una tabla con los valores de periodo efectivo, amortiguamiento efectivo, coeficiente M y periodo secante obtenidos para las ductilidades estudiadas.

Ductilidad	Periodo	Amortiguamiento	Coficiente	Periodo
------------	---------	-----------------	------------	---------

μ	Efectivo T_{eff}	Efectivo β_{eff}	M	Secante T_{sec}
1	0,74	5	1	0,74
2	0,86	8,80	0,89	0,91
3	1,06	15,80	0,97	1,08
4	1,16	19,96	0,91	1,22
5	1,22	20,28	0,82	1,35
7,44	1,39	20,58	0,75	1,60

Tabla 7. Periodos efectivos, Amortiguamientos efectivos, Coeficientes M Y Periodo secantes para diferentes valores de ductilidad (Alternativa C).

Con los valores mostrados en la Tabla 7 se grafican los Espectros de Demanda Modificados (MDRAS) para cada uno de las ductilidades estudiadas, como se muestra en la Figura 83.

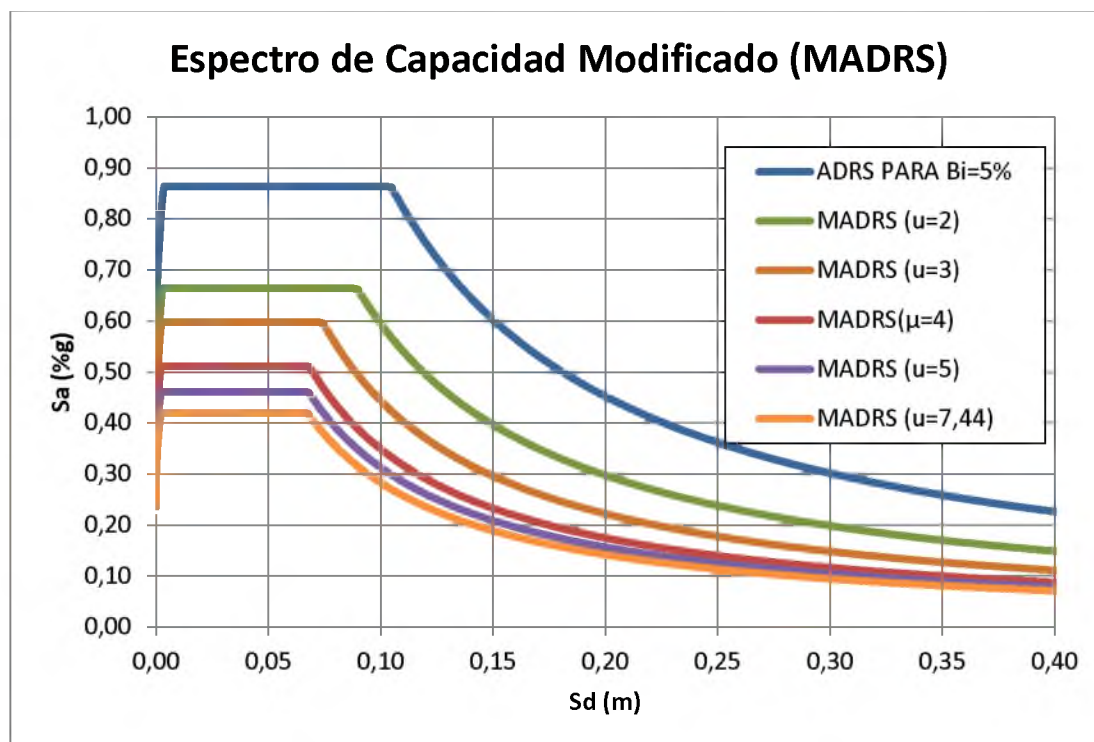


Figura 83. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) para diferentes valores de ductilidad.

Si se trazan líneas rectas al origen, cada una de estas representara un periodo secante. El posible punto de desempeño se encontrará en la intersección del periodo secante radial, T_{sec} , con el MADRS.

En la Figura 84 se muestra la intersección del periodo secante radial con el correspondiente Espectro de Demanda Modificado (MADRS).

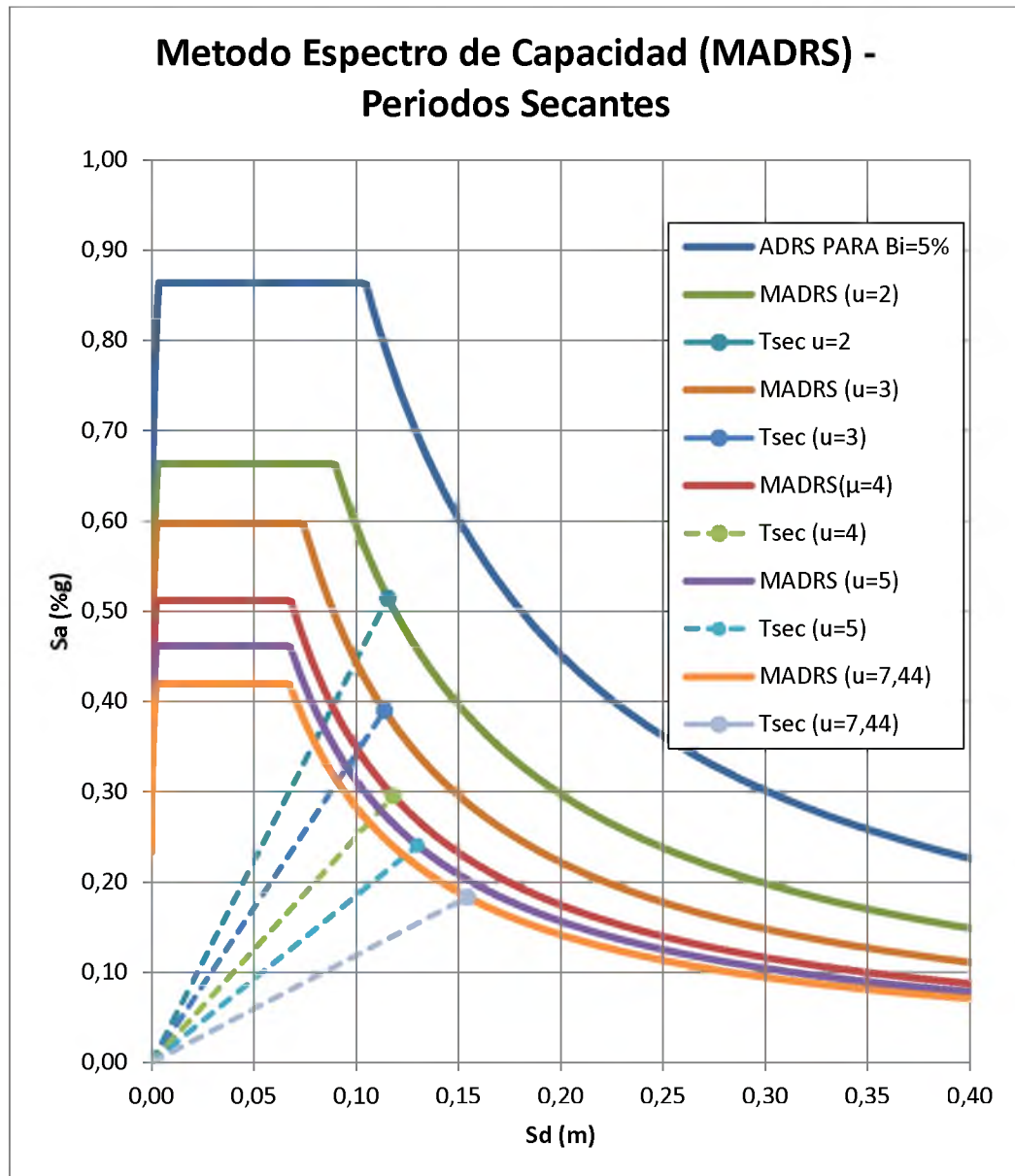


Figura 84. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) y Periodos secantes para diferentes valores de ductilidad.

El actual punto de desempeño deberá encontrarse sobre la línea que une la intersección de los periodos secantes con el Espectro de Capacidad Modificado correspondiente y sobre la Curva del Espectro de Capacidad. La intersección entre estas dos curvas definirá el punto de desempeño.

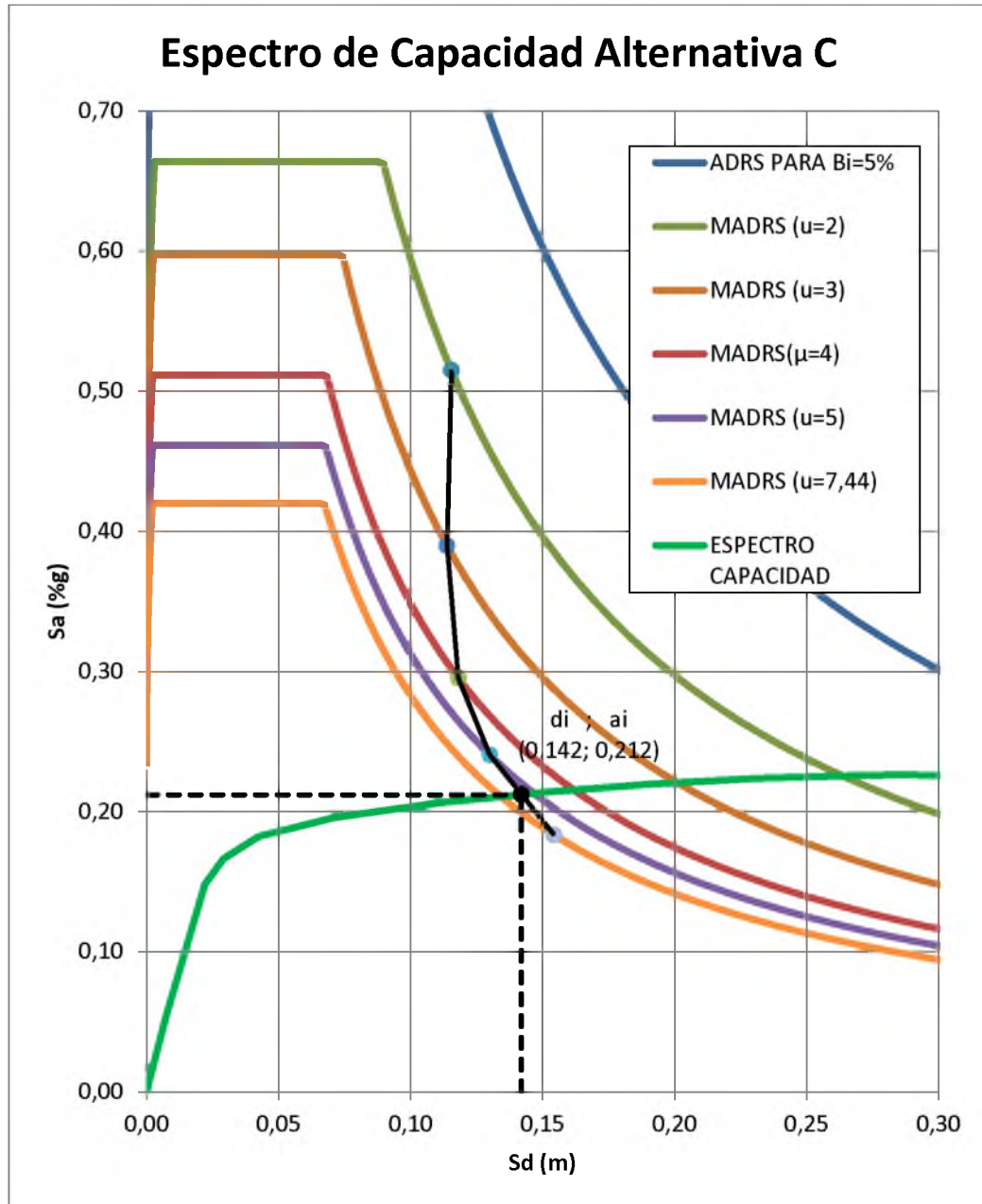


Figura 85. Método Espectro de Capacidad Alternativa C (Sismo raro) – Sentido Y

De la Figura 85 se obtiene el máximo desplazamiento esperado y la máxima aceleración esperada, las cuales tuvieron los siguientes valores:

$$a_i = 0,212 (\%g)$$

$$d_i = 0,142 m$$

El desplazamiento espectral debe ser convertido nuevamente a desplazamiento de la estructura por medio de la siguiente ecuación.

$$\delta_{max} = d_i \times PF_1 \times \phi_{1,roof} = 16,55 cm$$

El desplazamiento máximo de la estructura en su parte más alta, de acuerdo al Método Espectro Capacidad Alternativa C, para el Sismo Raro en dirección X resultó igual a 16,55 cm.

3.7.4.3. SISMO MUY RARO. DIRECCIÓN X

Se transformó el espectro de demanda para el Sismo Raro al formato Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento (ADRS) por medio de la siguiente fórmula:

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} * S_a \text{ (ATC - 40 Pag. 8 - 12)}$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento en formato ADRS para el Sismo Raro se muestra en la Figura 86:

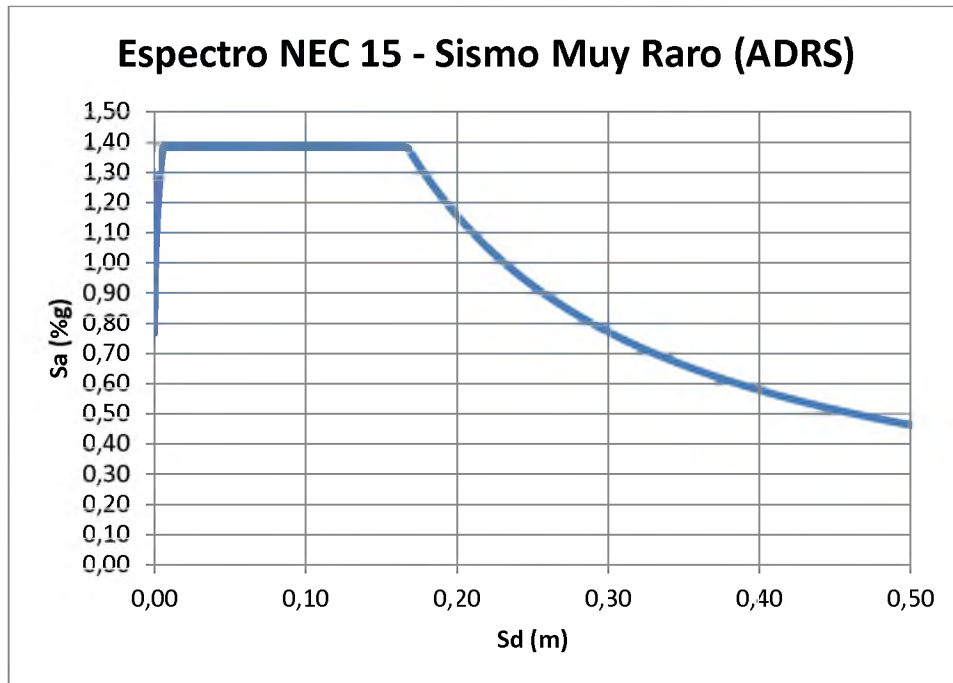


Figura 86. Espectro de Respuesta del Sismo Muy Raro en formato ADRS

La curva de capacidad, obtenida del programa Etabs y mostrada en el Capítulo 2.2 de este trabajo, fue transformada también a formato ADRS por medio de las siguientes expresiones:

$$S_{a_i} = \frac{V_i/W}{\alpha_1} \quad (\text{ATC} - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

$$S_{d_i} = \frac{\delta_i}{PF_1 \times \phi_{1,roof}} \quad (\text{ATC} - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

α_1 , PF_1 y $\phi_{1,roof}$ fueron obtenidos del análisis modal del programa Etabs y sus valores son los siguientes:

$$\alpha_1 = 0,97$$

$$PF_1 \times \phi_{1,roof} = 1,23$$

En la Figura 87 se muestra la conversión de la Curva de Capacidad al formato ADRS.

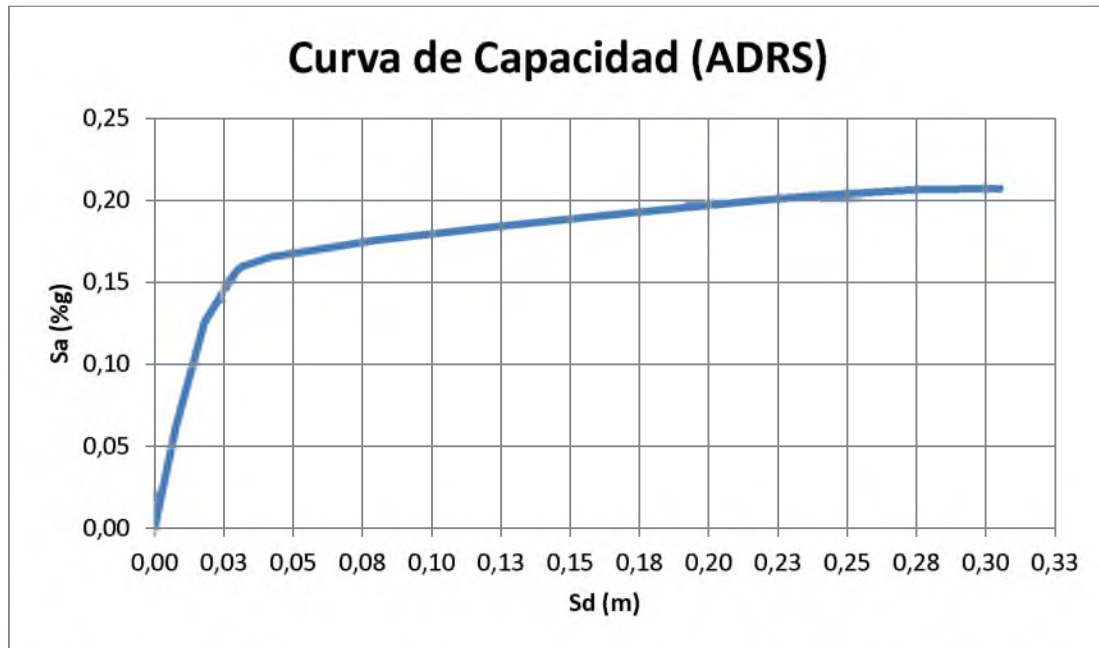


Figura 87. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido X

Se asumen varios valores de ductilidad para los cuales se calcula el periodo efectivo, T_{eff} , el amortiguamiento efectivo, β_{eff} , el coeficiente M , y el periodo secante, T_{sec} , por medio de las ecuaciones mencionadas en el Capítulo 2.5.3.

Se debe de realizar la representación bilineal de la Curva de Espectro de Capacidad para cada ductilidad asumida (ver Capítulo 2.3).

A continuación se muestra una tabla con los valores de periodo efectivo, amortiguamiento efectivo, coeficiente M y periodo secante obtenidos para las ductilidades estudiadas.

Ductilidad μ	Periodo Efectivo T_{eff}	Amortiguamiento Efectivo β_{eff}	Coefficiente M	Periodo Secante T_{sec}
1	0,74	5	1	0,74
2	0,86	8,80	0,84	0,93
3	1,07	15,80	0,91	1,12
4	1,17	19,96	0,84	1,28
5	1,25	20,28	0,78	1,41
12	1,70	19,71	0,68	2,07

Tabla 8. Periodos efectivos, Amortiguamientos efectivos, Coeficientes M Y Periodo secantes para diferentes valores de ductilidad (Alternativa C).

Con los valores mostrados en la Tabla 8 se grafican los Espectros de Demanda Modificados (MDRAS) para cada uno de las ductilidades estudiadas, como se muestra en la Figura 88.

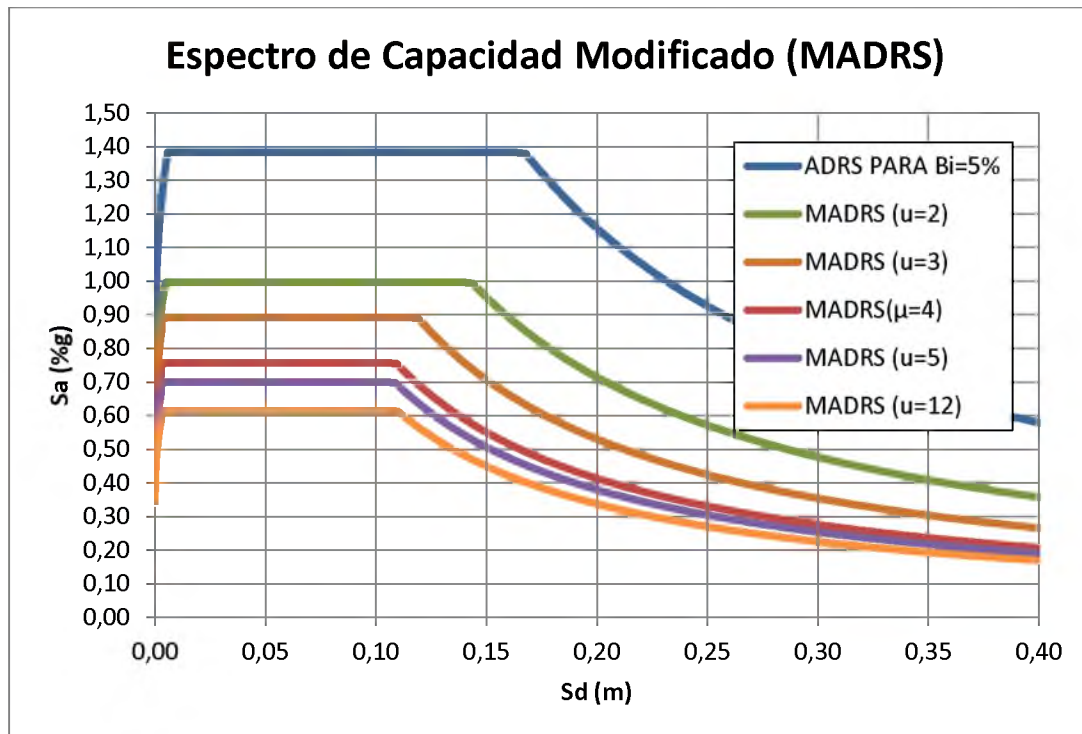


Figura 88. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) para diferentes valores de ductilidad.

Si se trazan líneas rectas al origen, cada una de estas representara un periodo secante. El posible punto de desempeño se encontrará en la intersección del periodo secante radial, T_{sec} , con el MADRS.

En la Figura 89 se muestra la intersección del periodo secante radial con el correspondiente Espectro de Demanda Modificado (MADRS)

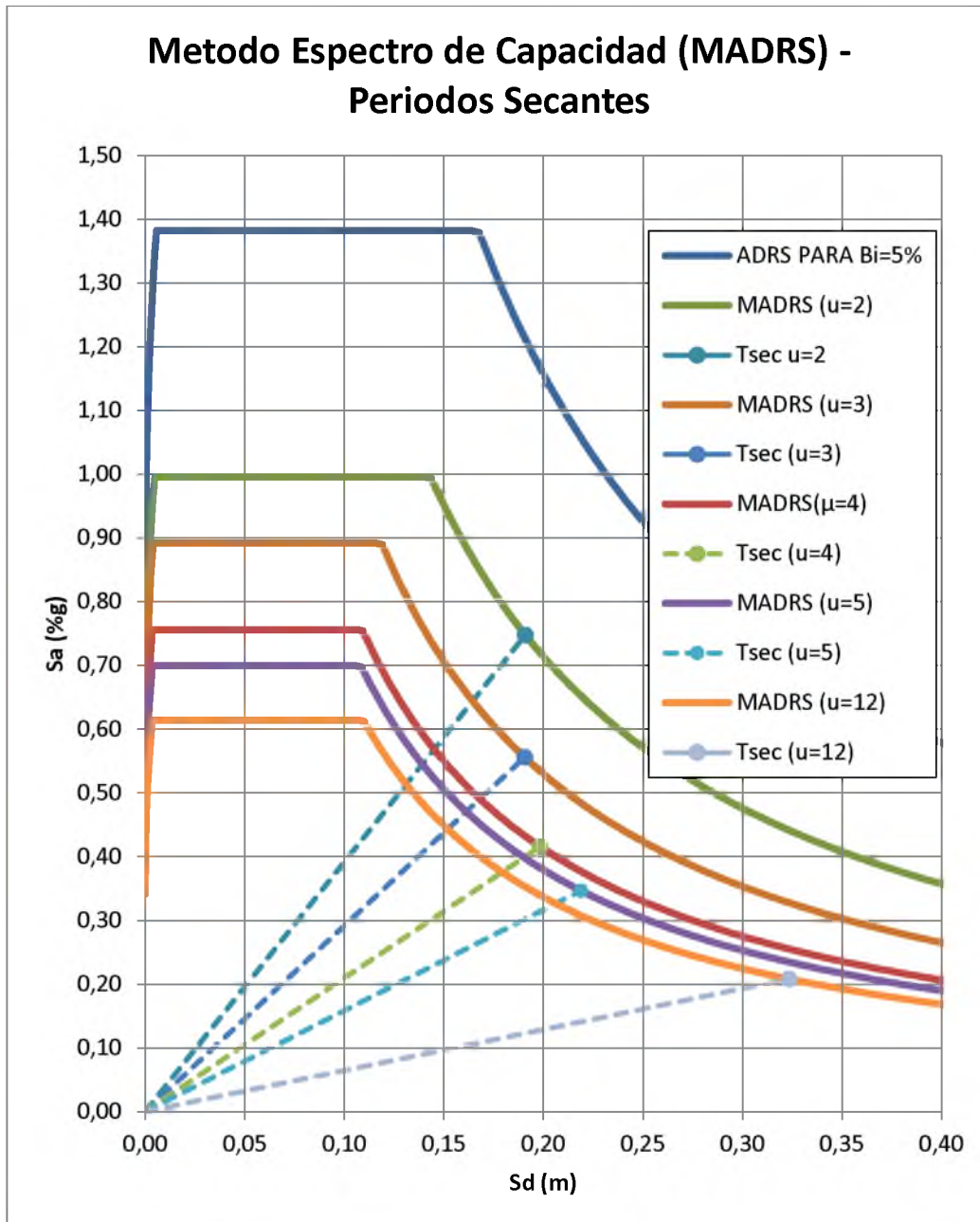


Figura 89. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) y Periodos secantes para diferentes valores de ductilidad.

El actual punto de desempeño deberá encontrarse sobre la línea que une la intersección de los periodos secantes con el Espectro de Capacidad Modificado correspondiente y sobre la Curva del Espectro de Capacidad. La intersección entre estas dos curvas definirá el punto de desempeño.

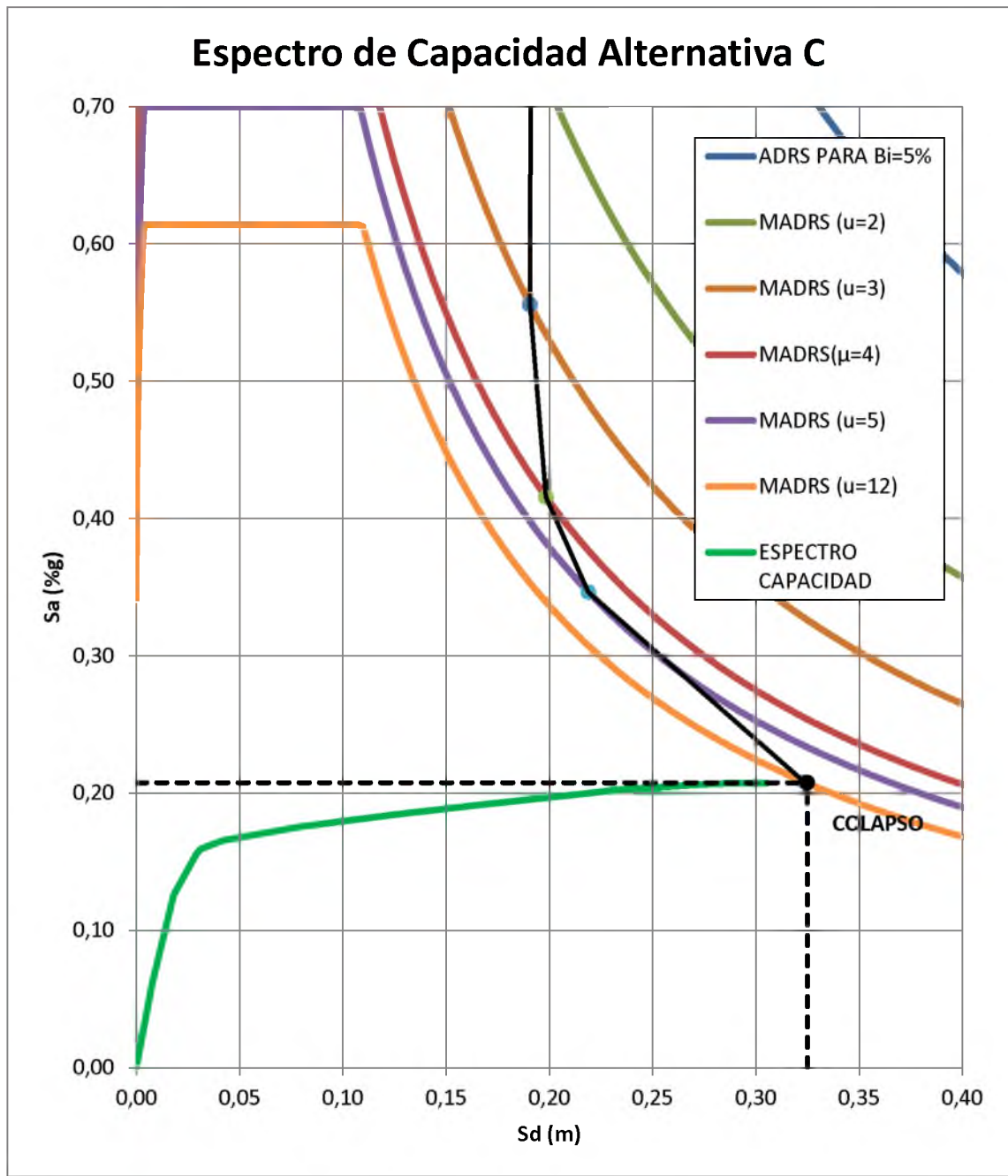


Figura 90. Método Espectro de Capacidad Alternativa C (Sismo Muy Raro) – Sentido X

De la Figura 90 se obtiene el máximo desplazamiento esperado y la máxima aceleración esperada, las cuales tuvieron los siguientes valores:

$$a_i = COLAPSO$$

$$d_i = COLAPSO$$

El desplazamiento espectral debe ser convertido nuevamente a desplazamiento de la estructura por medio de la siguiente ecuación.

$$\delta_{max} = d_i \times PF_1 \times \phi_{1,roof} = COLAPSO$$

El desplazamiento máximo de la estructura en su parte más alta, de acuerdo al Método Espectro Capacidad Alternativa C, para el Sismo Raro en dirección X resultó mayor al punto de Colapso.

3.7.4.4. SISMO MUY RARO. DIRECCIÓN Y

Se transformó el espectro de demanda para el Sismo Raro al formato Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento (ADRS) por medio de la siguiente fórmula:

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} * S_a \text{ (ATC - 40 Pag. 8 - 12)}$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento en formato ADRS para el Sismo Raro se muestra en la Figura 91:

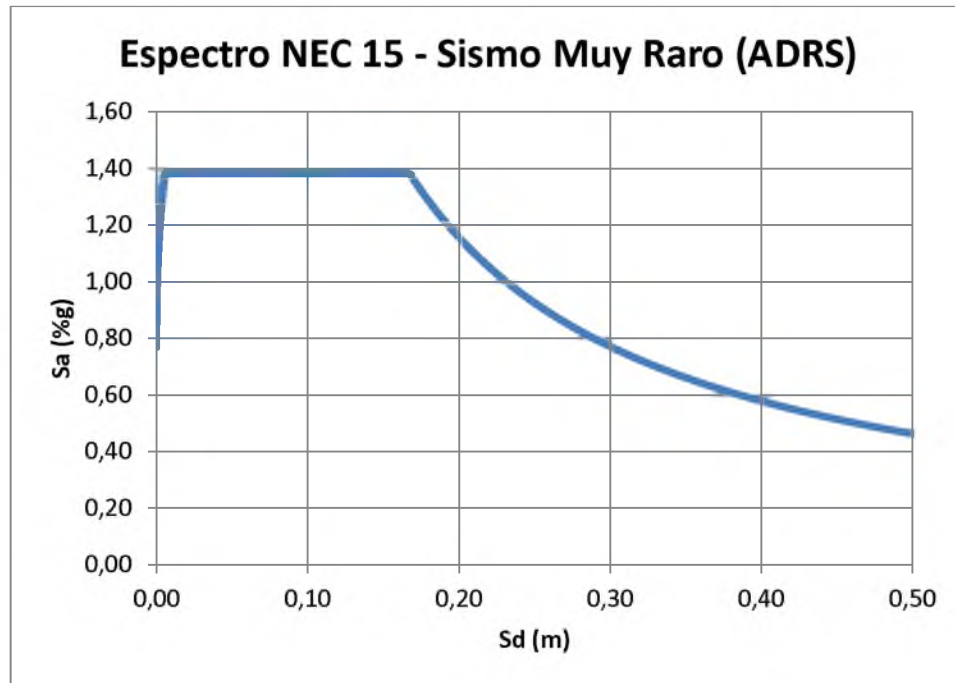


Figura 91. Espectro de Respuesta del Sismo Muy Raro en formato ADRS

La curva de capacidad, obtenida del programa Etabs y mostrada en Capítulo 2.2 de este trabajo, fue transformada también a formato ADRS por medio de las siguientes expresiones:

$$S_{a_i} = \frac{V_i/W}{\alpha_1} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

$$S_{d_i} = \frac{\delta_i}{PF_1 \times \phi_{1,roof}} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

α_1 , PF_1 y $\phi_{1,roof}$ fueron obtenidos del análisis modal del programa Etabs y sus valores son los siguientes:

$$\alpha_1 = 0,93$$

$$PF_1 \times \phi_{1,\text{roof}} = 1,17$$

En la Figura 92 se muestra la conversión de la Curva de Capacidad al formato ADRS.

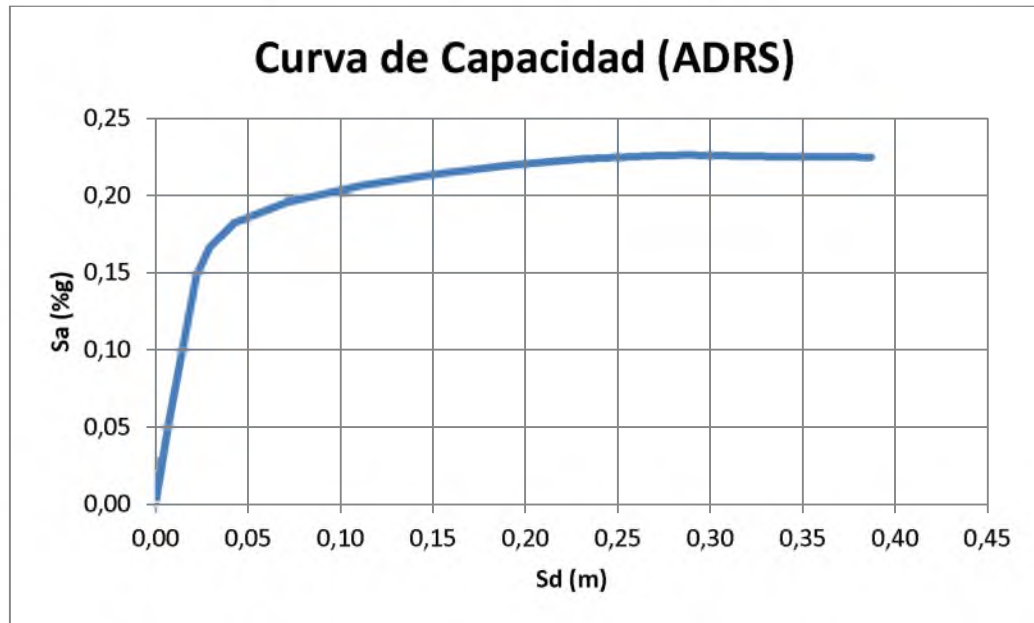


Figura 92. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido Y

Se asumen varios valores de ductilidad para los cuales se calcula el periodo efectivo, T_{eff} , el amortiguamiento efectivo, β_{eff} , el coeficiente M , y el periodo secante, T_{sec} , por medio de las ecuaciones mencionadas en el Capítulo 2.5.3.

Se debe de realizar la representación bilineal de la Curva de Espectro de Capacidad para cada ductilidad asumida (ver Capítulo 2.3).

A continuación se muestra una tabla con los valores de periodo efectivo, amortiguamiento efectivo, coeficiente M y periodo secante obtenidos para las ductilidades estudiadas.

Ductilidad μ	Periodo Efectivo T_{eff}	Amortiguamiento Efectivo β_{eff}	Coefficiente M	Periodo Secante T_{sec}
1	0,74	5	1	0,74
2	0,86	8,80	0,89	0,91
3	1,06	15,80	0,97	1,08
4	1,16	19,96	0,91	1,22
5	1,22	20,28	0,82	1,35
15,27	1,73	18,67	0,61	2,22

Tabla 9. Periodos efectivos, Amortiguamientos efectivos, Coeficientes M Y Periodo secantes para diferentes valores de ductilidad (Alternativa C).

Con los valores mostrados en la Tabla 9 se grafican los Espectros de Demanda Modificados (MDRAS) para cada uno de las ductilidades estudiadas, como se muestra en la Figura 93.

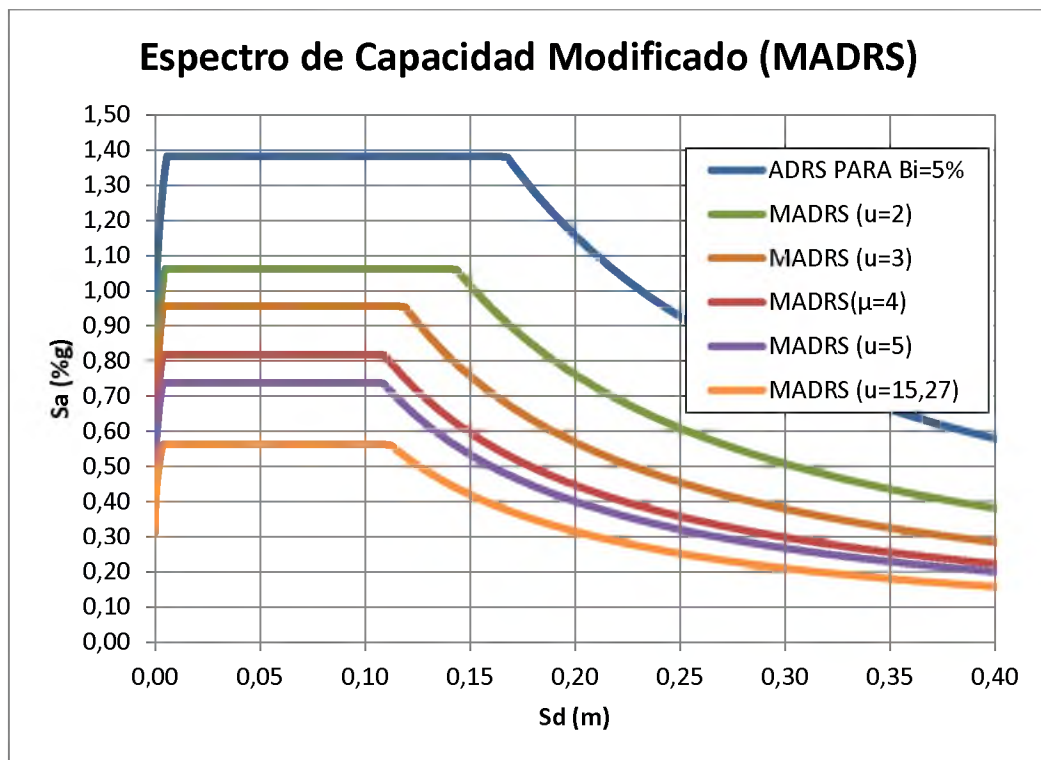


Figura 93. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) para diferentes valores de ductilidad.

Si se trazan líneas rectas al origen, cada una de estas representara un periodo secante. El posible punto de desempeño se encontrará en la intersección del periodo secante radial, T_{sec} , con el MADRS.

En la Figura 94 se muestra la intersección del periodo secante radial con el correspondiente Espectro de Demanda Modificado (MADRS).

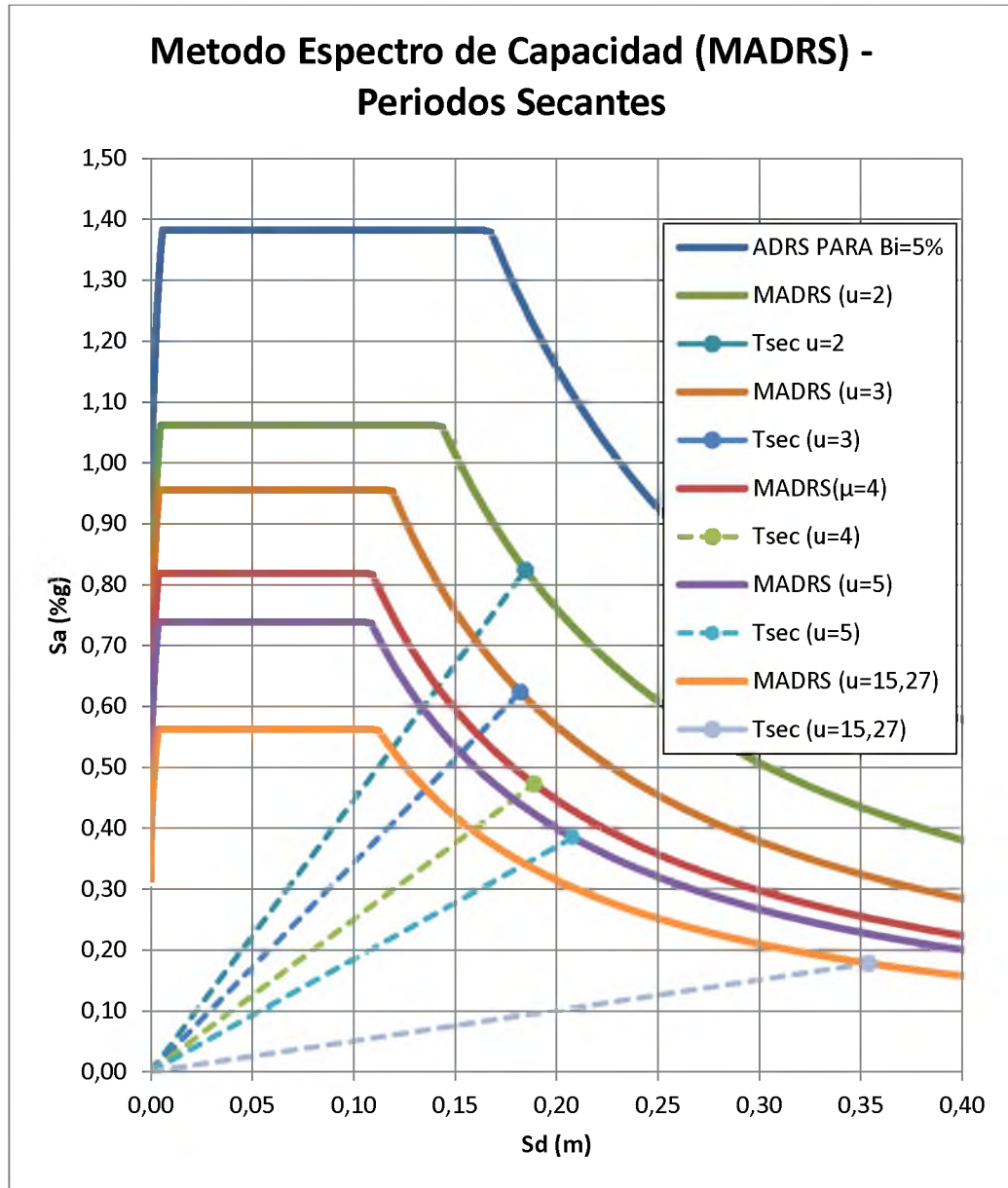


Figura 94. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) y Periodos secantes para diferentes valores de ductilidad.

El actual punto de desempeño deberá encontrarse sobre la línea que une la intersección de los periodos secantes con el Espectro de Capacidad Modificado correspondiente y sobre la Curva del Espectro de Capacidad. La intersección entre estas dos curvas definirá el punto de desempeño.

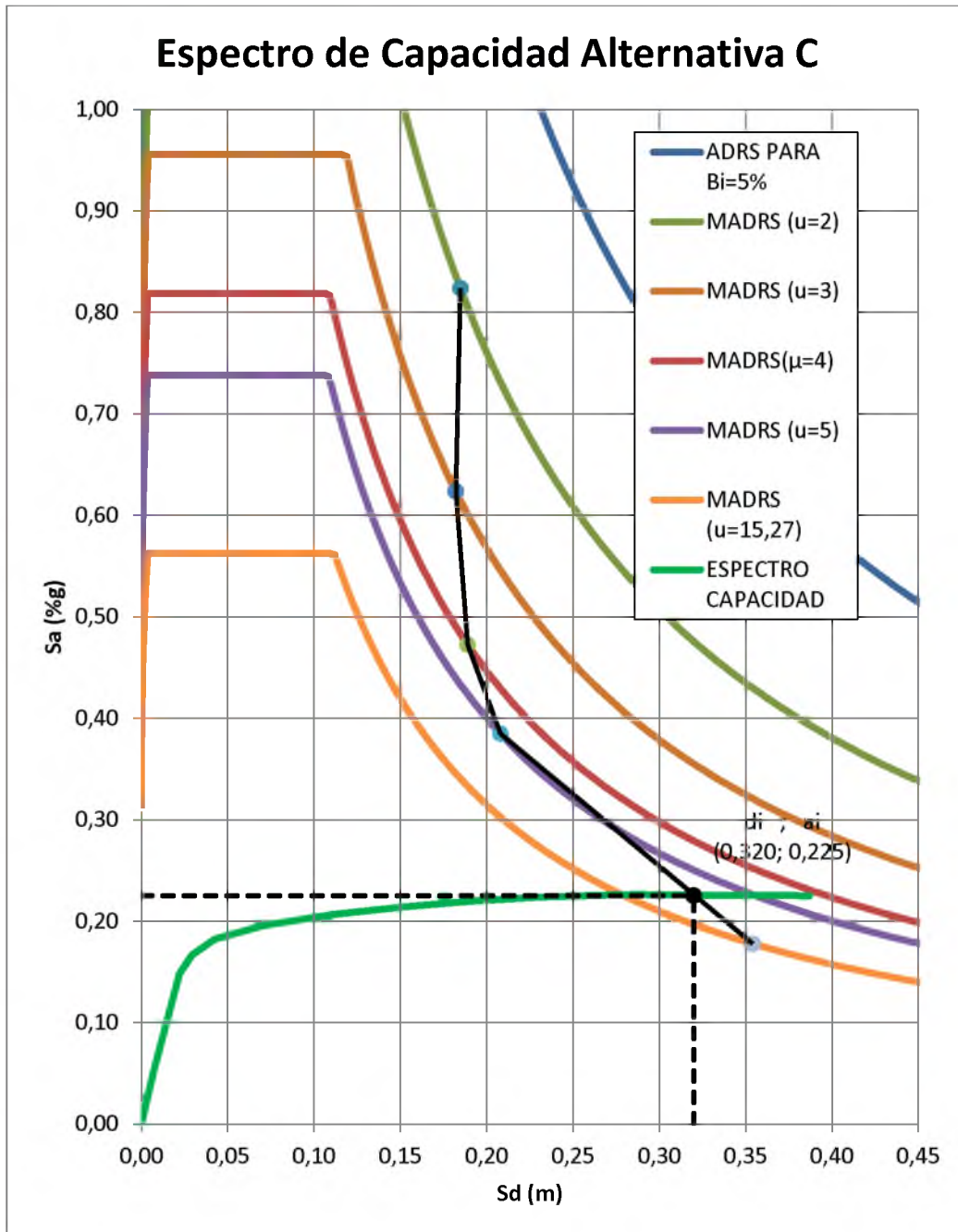


Figura 95. Método Espectro de Capacidad Alternativa C (Sismo raro) – Sentido Y

De la Figura 95 se obtiene el máximo desplazamiento esperado y la máxima aceleración esperada, las cuales tuvieron los siguientes valores:

$$a_i = 0,225 (\%g)$$

$$d_i = 0,32 \text{ m}$$

El desplazamiento espectral debe ser convertido nuevamente a desplazamiento de la estructura por medio de la siguiente ecuación.

$$\delta_{max} = d_i \times PF_1 \times \phi_{1,roof} = 37,41 \text{ cm}$$

El desplazamiento máximo de la estructura en su parte más alta, de acuerdo al Método Espectro Capacidad Alternativa C, para el Sismo Raro en dirección X resultó igual a 37,41 cm.

3.8. RESUMEN DE RESULTADOS Y NIVELES DE DESEMPEÑO

A continuación se presenta un resumen de los desplazamientos de desempeño obtenidos mediante 4 métodos (Método de los Coeficientes, Método Espectro de Capacidad Alternativa A, Método Espectro de Capacidad Alternativa B, y Método Espectro de Capacidad Alternativa C) tanto para el Sismo Raro como para el Sismo Muy Raro en las direcciones “X” y “Y”.

Comparación de los Métodos Aplicados					
Método		Desplazamiento máximo (cm)			
		SISMO RARO		SISMO MUY RARO	
		DIRECCION X	DIRECCION Y	DIRECCION X	DIRECCION Y
Método de los coeficientes		15,68	15,70	26,40	26
Método Espectro Capacidad	Alternativa A	17,48	15,70	37	32
	Alternativa B	17,48	15,70	37	32
	Alternativa C	19,30	16,55	COLAPSO	37,41

Tabla 10. Comparación de Desplazamientos máximos según los Métodos Aplicados – Edificio sin aisladores sísmicos

Según la sectorización de la Curva de Capacidad sugerida por Visión 2000 presentada en el Capítulo 2.4 de este trabajo, los niveles de desempeño para el edificio de la Facultad de Ingeniería estarían determinados como lo muestran las Figuras 96 y 97 respectivamente.

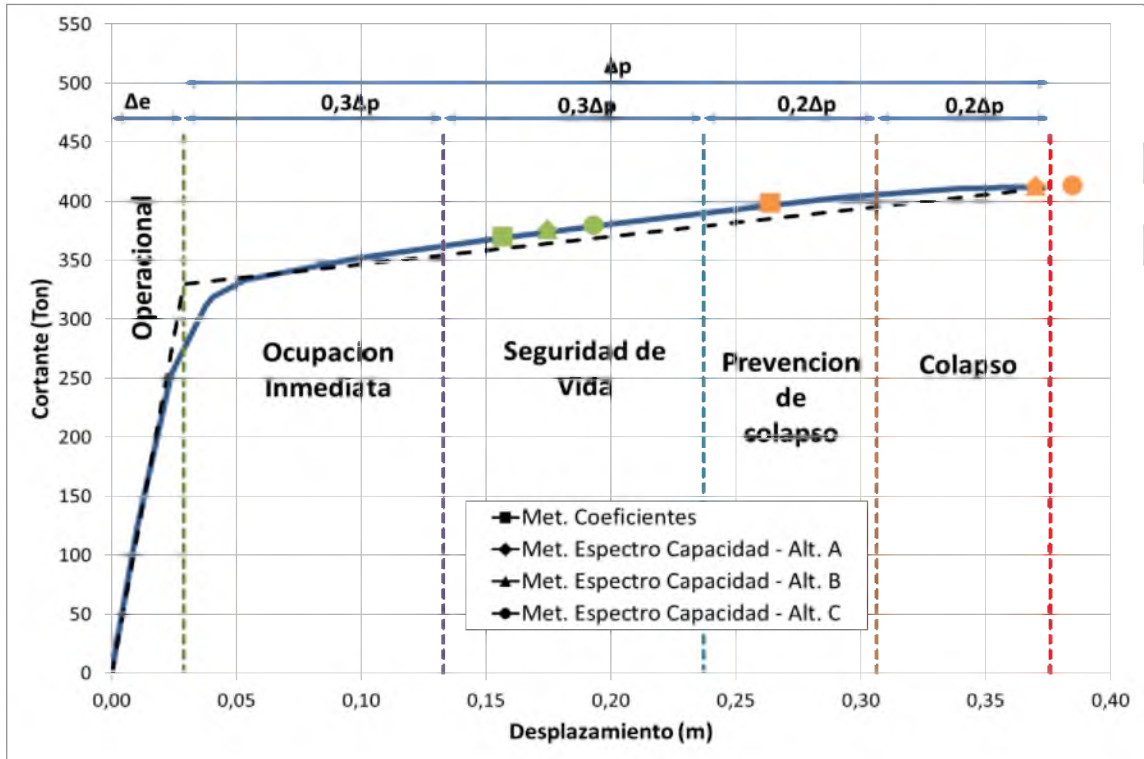


Figura 96. Sectorización de la Curva de Capacidad - Sentido X (NEC 15)

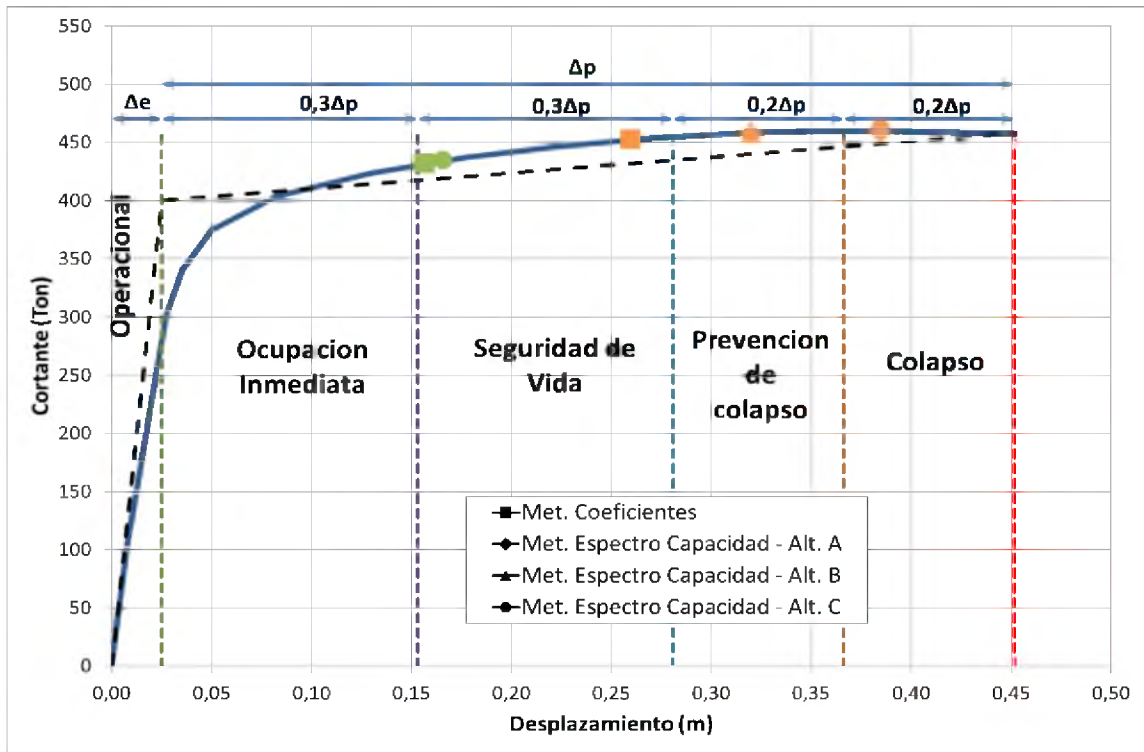


Figura 97. Sectorización de la Curva de Capacidad - Sentido Y (NEC 15)

Según NEC 2015 las estructuras especiales deben tener un nivel de desempeño de seguridad de vida para un sismo severo o raro de diseño (periodo de retorno de 475 años) y un desempeño de Prevención de colapso para un sismo muy raro (periodo de retorno de 2500 años).

A continuación se presentara una tabla con el desempeño obtenido para cada uno de los casos estudiados:

Comparación de los Desempeños Obtenidos					
Método		SISMO RARO		SISMO MUY RARO	
		DIRECCION X	DIRECCION Y	DIRECCION X	DIRECCION Y
Método de los coeficientes		Seguridad de Vida	Seguridad de Vida	Prevención de colapso	Prevención de colapso
Método Espectro Capacidad	Alternativa A	Seguridad de Vida	Seguridad de Vida	Colapso	Prevención de colapso
	Alternativa B	Seguridad de Vida	Seguridad de Vida	Colapso	Prevención de colapso
	Alternativa C	Seguridad de Vida	Seguridad de Vida	Colapso	Colapso

Tabla 11. Comparación de Desempeños sísmicos según los métodos Aplicados – Edificio sin aisladores sísmicos.

CAPITULO 4: DESEMPEÑO SISMICO DE LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL CON AISLADORES SISMICOS

4.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se calculará el desempeño sísmico de la Facultad de Ingeniería con aisladores sísmicos en las bases siguiendo los mismos procedimientos mostrados en el Capítulo 3 de este trabajo.

Primero se calculará la curva de capacidad del edificio aislado, para ello hay que tomar en cuenta la incorporación en el modelo estructural de la losa de planta baja sobre el sistema de aislación. Luego se aplicarán los cuatro (4) métodos explicados en el Capítulo 2.5 para obtener el punto o desplazamiento de desempeño. Finalmente, Se determinará el nivel desempeño del edificio según lo estipulado en el Capítulo 2.7.

Para obtener el nivel de desempeño del edificio, debe calcularse el desplazamiento que corresponda solo al edificio sin tomar en cuenta los desplazamientos producidos por la aislación. Además debe tomarse en cuenta que los resultados considerarán la incorporación de la losa de planta baja, por lo que deberá calcularse la curva de capacidad del edificio sin aislación con la losa de planta baja incluida.

4.2. PRE DISEÑO DEL SISTEMA DE AISLACIÓN

Debido a que el edificio sin aislación no cumple con el desempeño establecido por los códigos para el sismo muy raro (2500 años de periodo de retorno) aplicado en la dirección X (dirección longitudinal del edificio), las características del sistema de aislación se definieron de tal manera que produzcan un desplazamiento menor en la estructura, tal que ubique a esta en un nivel de desempeño menor al de Colapso.

Las características del sistema de aislación se obtuvieron mediante un proceso iterativo hasta llegar a una solución satisfactoria, en la cual los niveles de desempeño resulten mejores que los obtenidos en el Capítulo 3.

Las propiedades de los aisladores obtenidas en este trabajo fueron las siguientes:

Ko =	800 KN/m
Fy =	80 KN
K2 =	80 KN/m
Cant =	50

A continuación se presenta la histéresis de acuerdo a las propiedades obtenidas:



Figura 98. Histéresis del Aislador Utilizado

4.3. CURVA DE CAPACIDAD (PUSHOVER) DEL EDIFICIO CON AISLADORES SÍSMICOS

Para la obtención del punto de desempeño es necesaria la curva de capacidad del edificio con aisladores sísmicos. Como ya fue explicado en el Capítulo 2.2 las ordenadas de desplazamiento de la curva de capacidad son del techo del edificio, por lo que estas toman en cuenta lo que se desplazara el aislador más lo que se desplazara el edificio. En las Figuras 99 y 100 se observa la Curva de Capacidad del edificio con aisladores sísmicos en sentido "X" y en sentido "Y" respectivamente.

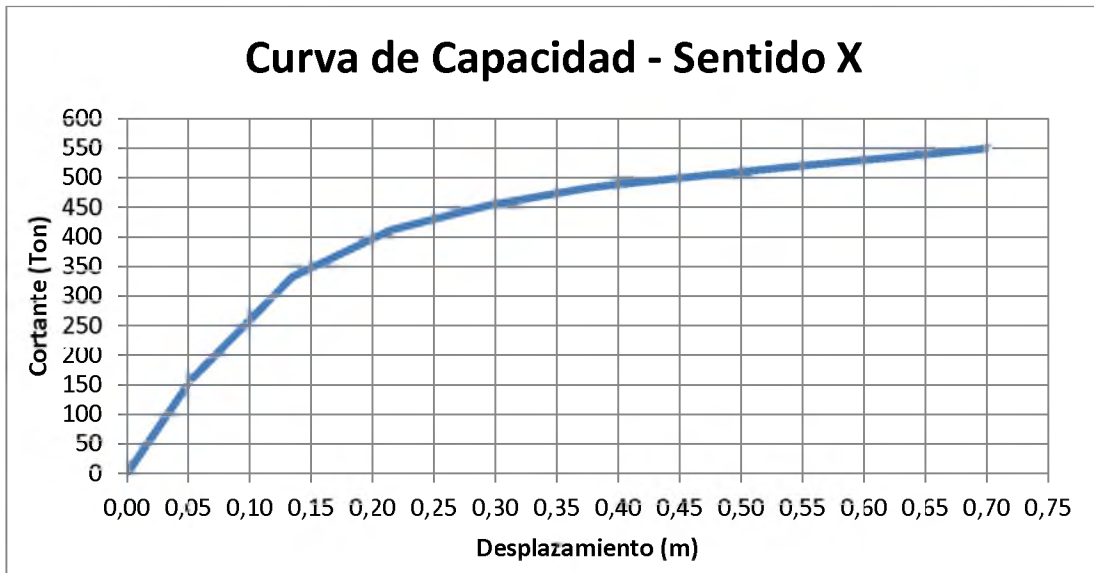


Figura 99. Curva de Capacidad del Edificio con Aisladores Sísmicos – Sentido X

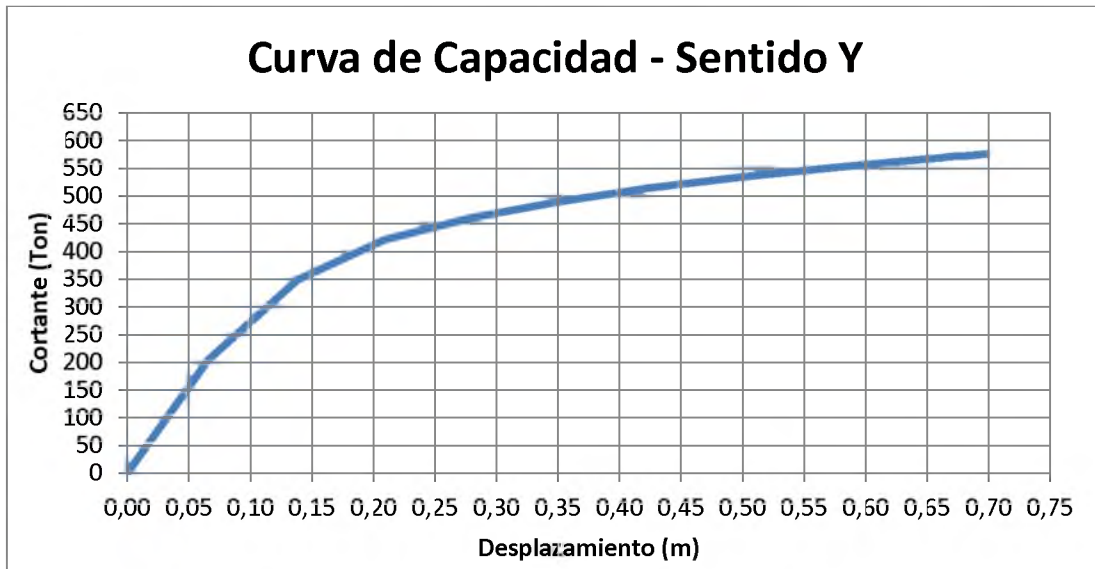


Figura 100. Curva de Capacidad del Edificio con Aisladores Sísmicos – Sentido Y

4.4. ESPECTRO DE DEMANDA

Se utilizará, para este trabajo, los espectros para sismo raro y muy raro especificados en el NEC 15 para suelo tipo D. A continuación se presenta ambos espectros:

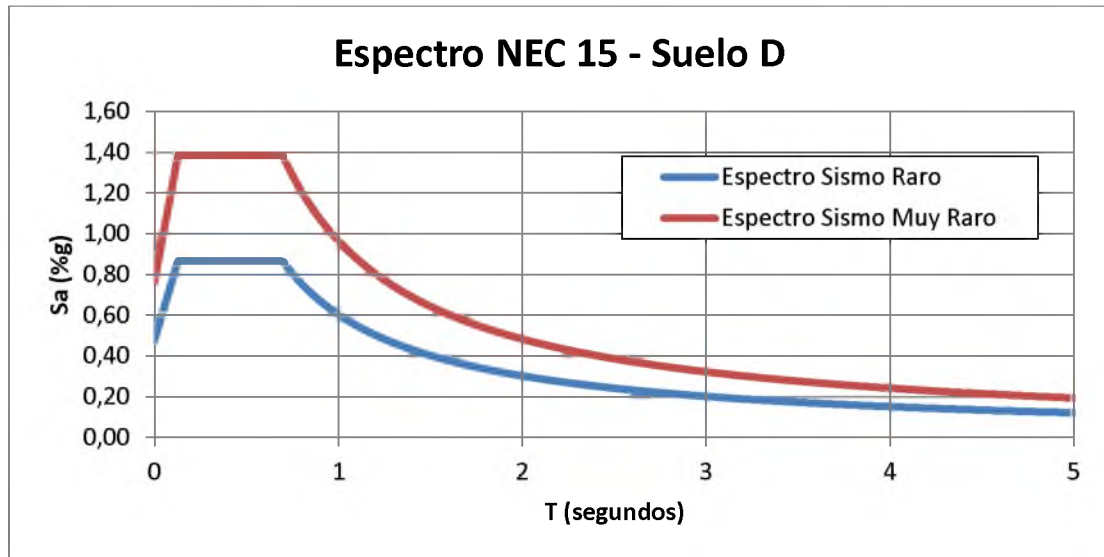


Figura 101. Espectros de Respuesta del NEC 15 para el Suelo Tipo D – Sismo Raro y Sismo muy Raro

4.5. PUNTO DE DESEMPEÑO

Debido a la implementación de aisladores sísmicos se espera que el desempeño del edificio mejore. En el Capítulo 2.5 se explican los 4 métodos utilizados para la obtención del punto de desempeño. A continuación se presenta la aplicación de estos métodos para el cálculo de los nuevos puntos de desempeño.

4.5.1. MÉTODO DE LOS COEFICIENTES

Este método fue explicado en el Capítulo 2.5.1 de este trabajo. A continuación se presentan la aplicación del Método de los Coeficientes para los sismos Raro y Muy Raro, tanto para la dirección “x” como para la dirección “y”.

4.5.1.1. SISMO RARO. DIRECCIÓN X

En la Figura 102 se muestra la Curva de Capacidad en dirección “x” del edificio aislado y su correspondiente idealización mediante la Curva Bilineal explicado en el Capítulo 2.3. El punto final de la curva bilineal se lo escoge arbitrariamente, donde este debe de dar igual al desplazamiento esperado, de no ser así se debe de iterar el punto inicial escogido usando el desplazamiento esperado de la iteración anterior.

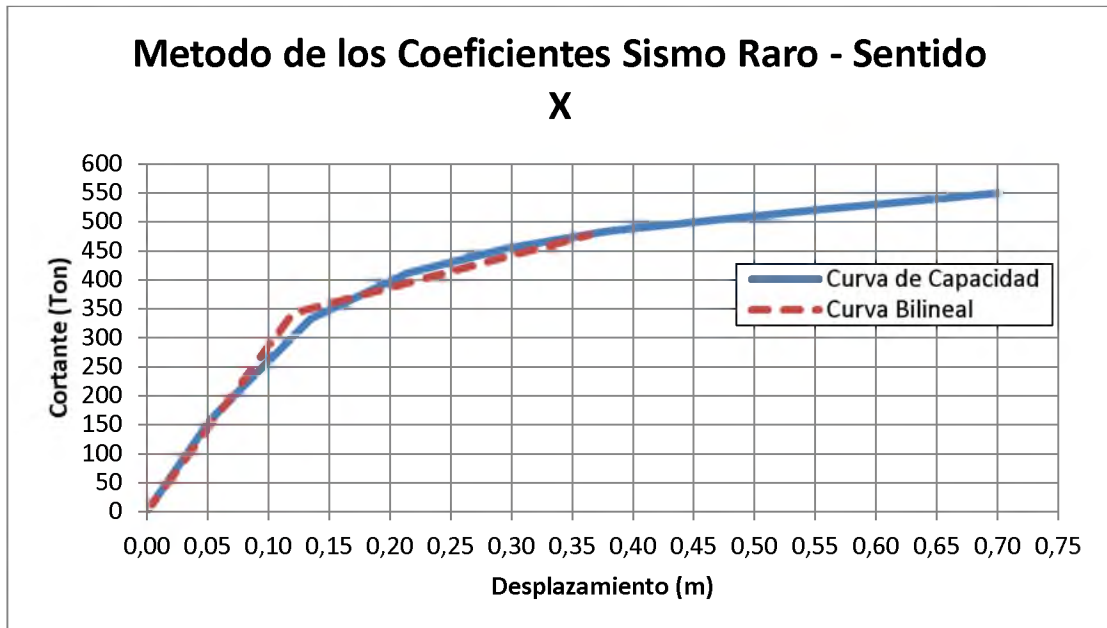


Figura 102. Método de los Coeficientes (ASCE 41-06) Sismo Raro – Sentido X

$$T_i = 1,90 \text{ seg} \quad (\text{Modelo estructural de ETABS 2015})$$

$$K_i = \frac{168,65 \text{ Ton}}{0,052 \text{ m}} = 3243,26 \text{ Ton/m} \quad (\text{Ver Capitulo 2.5})$$

$$K_e = \frac{342 \text{ Ton}}{0,12 \text{ m}} = 2850 \text{ Ton/m} \quad (\text{Ver Capitulo 2.5})$$

$$T_e = T_i * \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} = 2,02 \text{ seg} \quad (\text{Eq. 3 – 13 ASCE 41 – 06})$$

$$C_0 = 1,2 \text{ (Tabla 3 – 2 ASCE 41 – 06)}$$

$$S_a = 0,298 \text{ (Ver Capitulo 2.5)}$$

$$V_y = 342 \text{ Ton (Cortante de fluencia, ver Capitulo 2.5)}$$

$$W = 2866 \text{ Ton (Peso sismico del edificio, ETABS 2015)}$$

$$C_m = 1 \text{ (Tabla 3 – 1 ASCE 41 – 06)}$$

$$\alpha = 60 \text{ (Suelo tipo D, ver Capitulo 2.5)}$$

$$C_1 = 1 \text{ (Ver Capitulo 2.5)}$$

$$C_2 = 1 \text{ (Ver Capitulo 2.5)}$$

$$\partial_t = C_0 C_1 C_2 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g = 0,362 \text{ mts (Eq. 3 – 14 ASCE 41 – 06)}$$

$$V = 476 \text{ Ton}$$

4.5.1.2. SISMO RARO. DIRECCIÓN Y

En la Figura 104 se muestra la Curva de Capacidad en dirección “y” del edificio aislado y su correspondiente idealización mediante la Curva Bilineal explicado en el Capítulo 2.3. El punto final de la curva bilineal se lo escoge arbitrariamente, donde este debe de dar igual al desplazamiento esperado, de no ser así se debe de iterar el punto inicial escogido usando el desplazamiento esperado de la iteración anterior.

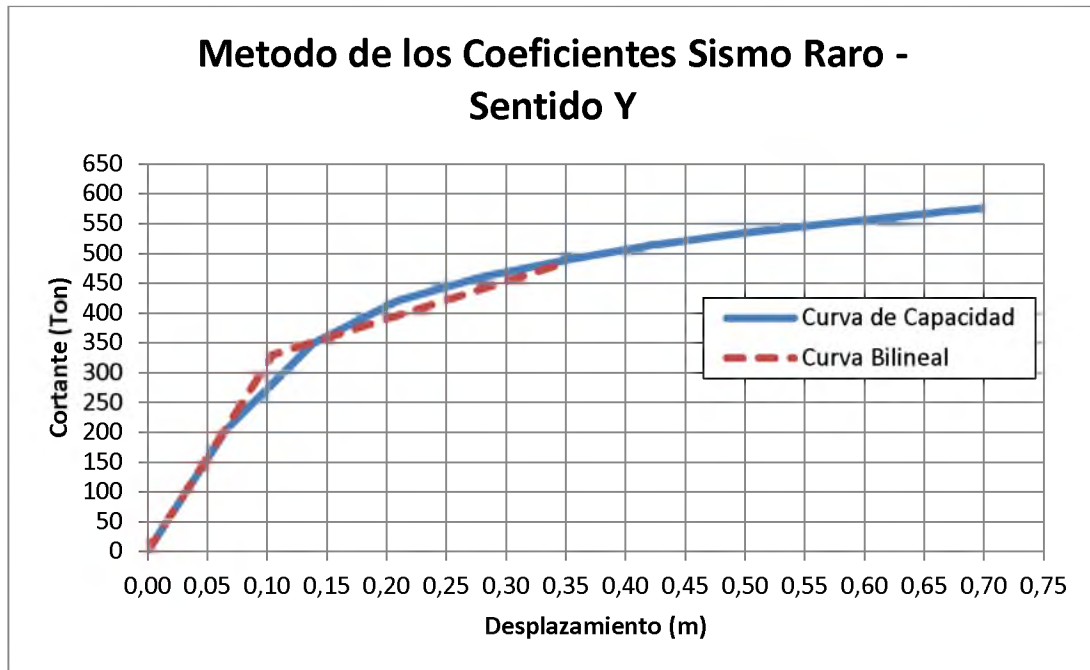


Figura 103. Método de los Coeficientes (ASCE 41-06) Sismo Raro – Sentido Y

$$T_i = 1,928 \text{ seg} \quad (\text{Modelo estructural de ETABS 2015})$$

$$K_i = \frac{203,56 \text{ Ton}}{0,0656 \text{ m}} = 3101,42 \text{ Ton/m} \quad (\text{Ver Capitulo 2.5})$$

$$K_e = \frac{330 \text{ Ton}}{0,10 \text{ m}} = 3157,89 \text{ Ton/m} \quad (\text{Ver Capitulo 2.5})$$

$$T_e = T_i * \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} = 1,91 \text{ seg} \quad (\text{Eq. 3 – 13 ASCE 41 – 06})$$

$$C_0 = 1,2 \quad (\text{Tabla 3 – 2 ASCE 41 – 06})$$

$$S_a = 0,30 \quad (\text{Ver Capitulo 2.5})$$

$$V_y = 330 \text{ Ton} \quad (\text{Cortante de fluencia, ver Capitulo 2.5})$$

$$W = 2866 \text{ Ton} \quad (\text{Peso sismico del edificio, ETABS 2015})$$

$$C_m = 1 \quad (\text{Tabla 3 – 1 ASCE 41 – 06})$$

$$\alpha = 60 \quad (\text{Suelo tipo D, ver Capitulo 2.5})$$

$$C_1 = 1 \quad (\text{Ver Capitulo 2.5})$$

$C_2 = 1$ (Ver Capítulo 2.5)

$$\partial_t = C_0 C_1 C_2 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g = 0,34 \text{ mts (Eq. 3 - 14 ASCE 41 - 06)}$$

$$V = 480 \text{ Ton}$$

4.5.1.3. SISMO MUY RARO. DIRECCIÓN X

En la Figura 106 se muestra la Curva de Capacidad en dirección “x” del edificio aislado y su correspondiente idealización mediante la Curva Bilineal explicado en el Capítulo 2.3. El punto final de la curva bilineal se lo escoge arbitrariamente, donde este debe de dar igual al desplazamiento esperado, de no ser así se debe de iterar el punto inicial escogido usando el desplazamiento esperado de la iteración anterior.

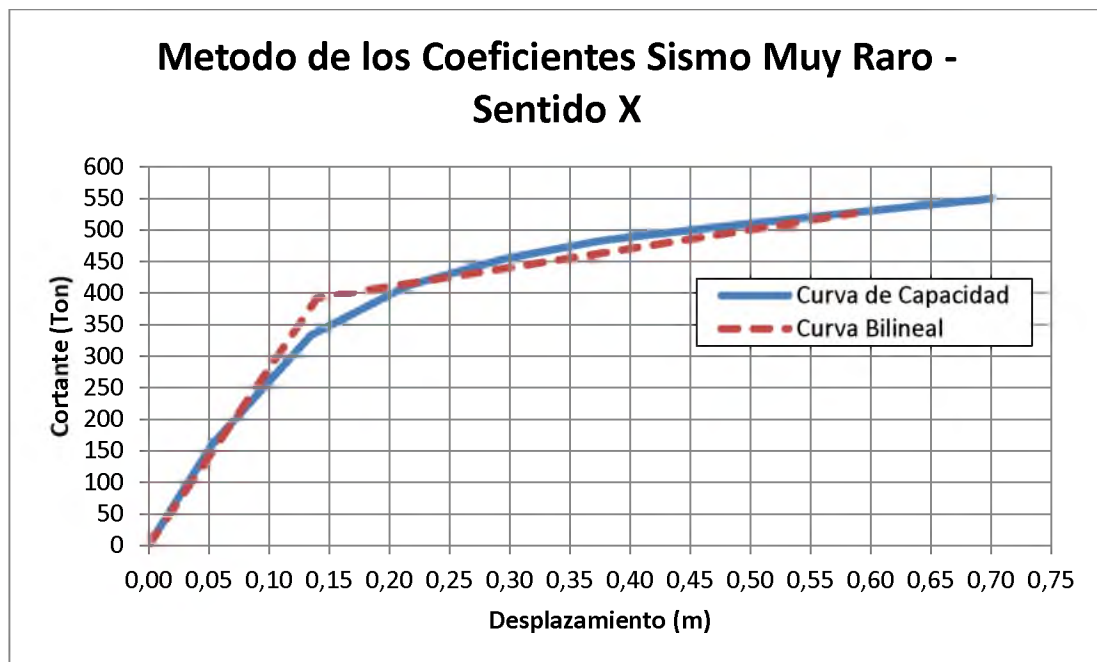


Figura 104. Método de los Coeficientes (ASCE 41-06) Sismo Muy Raro – Sentido X

$$T_i = 1,90 \text{ seg} \text{ (Modelo estructural de ETABS 2015)}$$

$$K_i = \frac{168,65 \text{ Ton}}{0,052 \text{ m}} = 3243,26 \text{ Ton/m} \text{ (Ver Capitulo 2.5)}$$

$$K_e = \frac{392 \text{ Ton}}{0,14 \text{ m}} = 2800 \text{ Ton/m} \text{ (Ver Capitulo 2.5)}$$

$$T_e = T_i * \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} = 2,04 \text{ seg} \quad (\text{Eq. 3 - 13 ASCE 41 - 06})$$

$$C_0 = 1,2 \text{ (Tabla 3 - 2 ASCE 41 - 06)}$$

$$S_a = 0,473 \text{ (Ver Capitulo 2.5)}$$

$$V_y = 392 \text{ Ton} \text{ (Cortante de fluencia, ver Capitulo 2.5)}$$

$$W = 2866 \text{ Ton} \text{ (Peso sismico del edificio, ETABS 2015)}$$

$$C_m = 1 \text{ (Tabla 3 - 1 ASCE 41 - 06)}$$

$$\alpha = 60 \text{ (Suelo tipo D, ver Capitulo 2.5)}$$

$$C_1 = 1 \text{ (Ver Capitulo 2.5)}$$

$$C_2 = 1 \text{ (Ver Capitulo 2.5)}$$

$$\partial_t = C_0 C_1 C_2 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g = 0,586 \text{ mts} \text{ (Eq. 3 - 14 ASCE 41 - 06)}$$

$$V = 526 \text{ Ton}$$

4.5.1.4. SISMO MUY RARO. DIRECCIÓN Y

En la Figura 108 se muestra la Curva de Capacidad en dirección “y” del edificio aislado y su correspondiente idealización mediante la Curva Bilineal explicado en el Capítulo 2.3. El punto final de la curva bilineal se lo escoge arbitrariamente, donde este debe de dar igual al desplazamiento esperado, de no ser así se debe de iterar el punto inicial escogido usando el desplazamiento esperado de la iteración anterior.

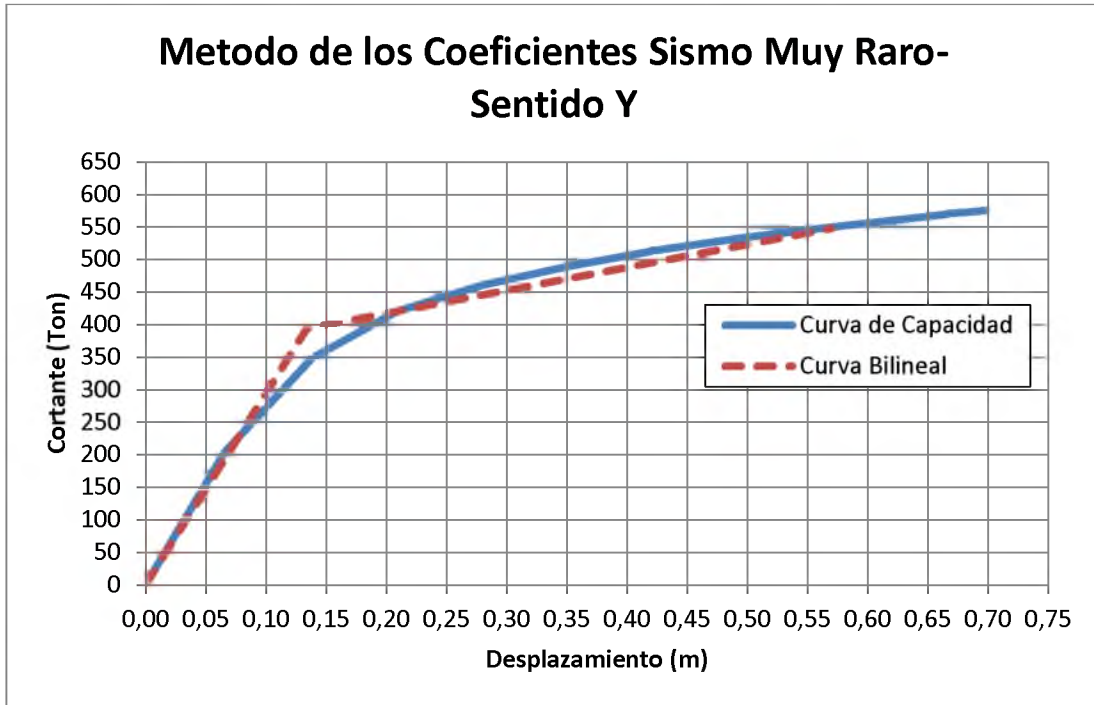


Figura 105. Método de los Coeficientes (ASCE 41-06) Sismo Muy Raro – Sentido Y

$$T_i = 1,92 \text{ seg} \quad (\text{Modelo estructural de ETABS 2015})$$

$$K_i = \frac{203,56 \text{ Ton}}{0,0656 \text{ m}} = 3101,42 \text{ Ton/m} \quad (\text{Ver Capitulo 2.5})$$

$$K_e = \frac{394 \text{ Ton}}{0,134 \text{ m}} = 2940,29 \text{ Ton/m} \quad (\text{Ver Capitulo 2.5})$$

$$T_e = T_i * \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} = 1,98 \text{ seg} \quad (\text{Eq. 3 – 13 ASCE 41 – 06})$$

$$C_0 = 1,2 \quad (\text{Tabla 3 – 2 ASCE 41 – 06})$$

$$S_a = 0,487 \quad (\text{Ver Capitulo 2.5})$$

$$V_y = 394 \text{ Ton} \quad (\text{Cortante de fluencia, ver Capitulo 2.5})$$

$$W = 2866 \text{ Ton} \quad (\text{Peso sismico del edificio, ETABS 2015})$$

$$C_m = 1 \quad (\text{Tabla 3 – 1 ASCE 41 – 06})$$

$$\alpha = 60 \quad (\text{Suelo tipo D, ver Capitulo 2.5})$$

$$C_1 = 1 \quad (\text{Ver Capitulo 2.5})$$

$$C_2 = 1 \quad (\text{Ver Capitulo 2.5})$$

$$\partial_t = C_0 C_1 C_2 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g = 0,57 \text{ mts (Eq. 3 – 14 ASCE 41 – 06)}$$

$$V = 548 \text{ Ton}$$

4.5.2. MÉTODO ESPECTRO DE CAPACIDAD. ALTERNATIVA A (ITERACIÓN DIRECTA).

En el Capítulo 2.5.2 de este trabajo se explica detalladamente la aplicación del Método Espectro de Capacidad Alternativa A especificado en el FEMA 440. A continuación se muestran los resultados obtenidos del uso de este método para hallar el punto de desempeño del Edificio de la Facultad de Ingeniería con aisladores sísmicos tanto para el sismo raro como para el sismo muy raro.

4.5.2.1. SISMO RARO. DIRECCIÓN X

Se transformó el espectro de demanda para el Sismo Raro al formato Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento (ADRS) por medio de la siguiente fórmula:

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} * S_a \text{ (ATC – 40 Pag. 8 – 12)}$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento en formato ADRS para el Sismo Raro se muestra en la Figura 110:

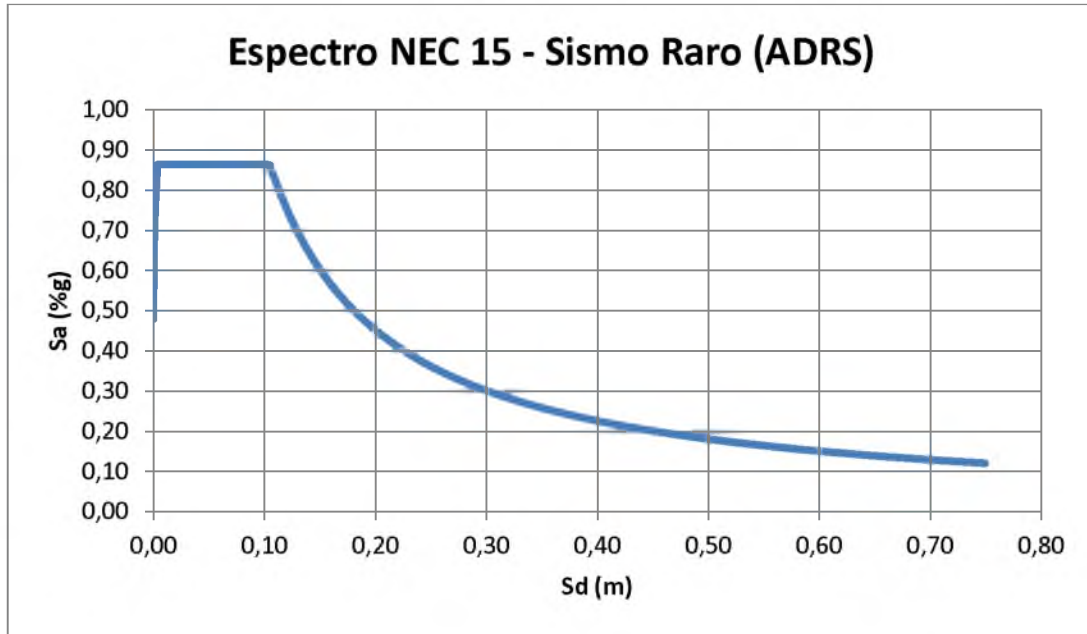


Figura 106. Espectro de Respuesta del Sismo Raro en formato ADRS

La curva de capacidad del edificio aislado, obtenida del programa Etabs y mostrada en el Capítulo 4.4 de este trabajo, fue transformada también a formato ADRS por medio de las siguientes expresiones:

$$S_{a_i} = \frac{V_i/W}{\alpha_1} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

$$S_{d_i} = \frac{\delta_i}{PF_1 \times \phi_{1,roof}} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

α_1 , PF_1 y $\phi_{1,roof}$ fueron obtenidos del análisis modal del programa Etabs y sus valores son los siguientes:

$$\alpha_1 = 0,988$$

$$PF_1 \times \phi_{1,roof} = 1,14$$

En la Figura 111 se muestra la conversión de la Curva de Capacidad al formato ADRS.

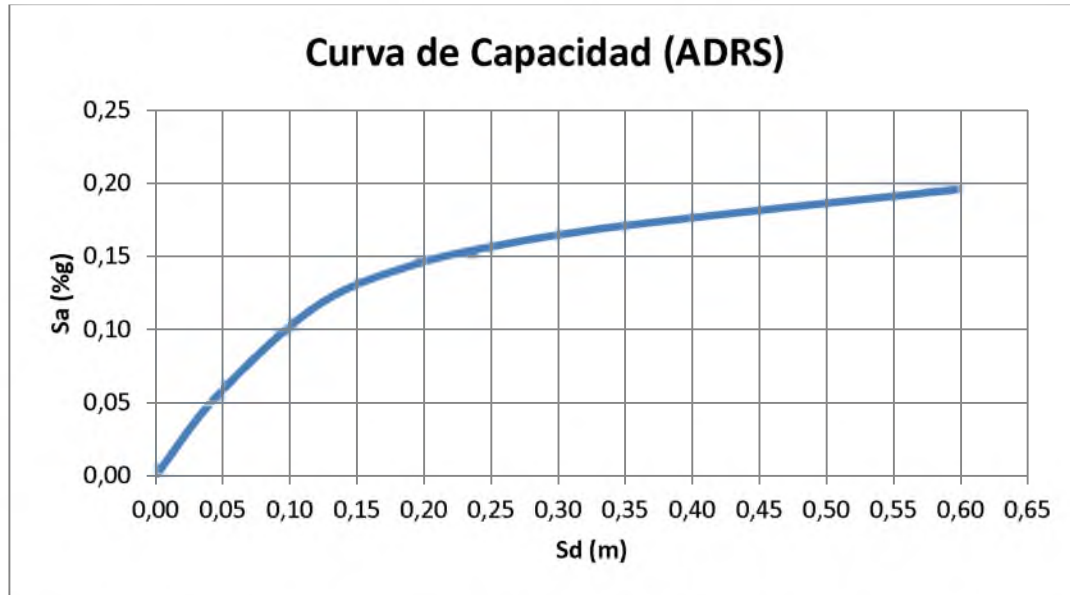


Figura 107. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido X

De la Curva de Espectro de Capacidad se seleccionó un punto de desempeño el cual deberá ser verificado luego si es correcto o no. En este caso es punto de desempeño (d_{pi} , a_{pi}) tiene los siguientes valores:

$$a_{pi} = 0,168 (\%g)$$

$$d_{pi} = 0,34 m$$

Con el punto de desempeño seleccionado se desarrolló la curva bilineal, ver Capítulo 2.3. Como se muestran en la Figura 112, de la curva bilineal se obtiene el desplazamiento de fluencia, d_y , y la aceleración de fluencia, a_y . Estos valores se muestran a continuación:

$$a_y = 0,112 (\%g)$$

$$d_y = 0,09 m$$

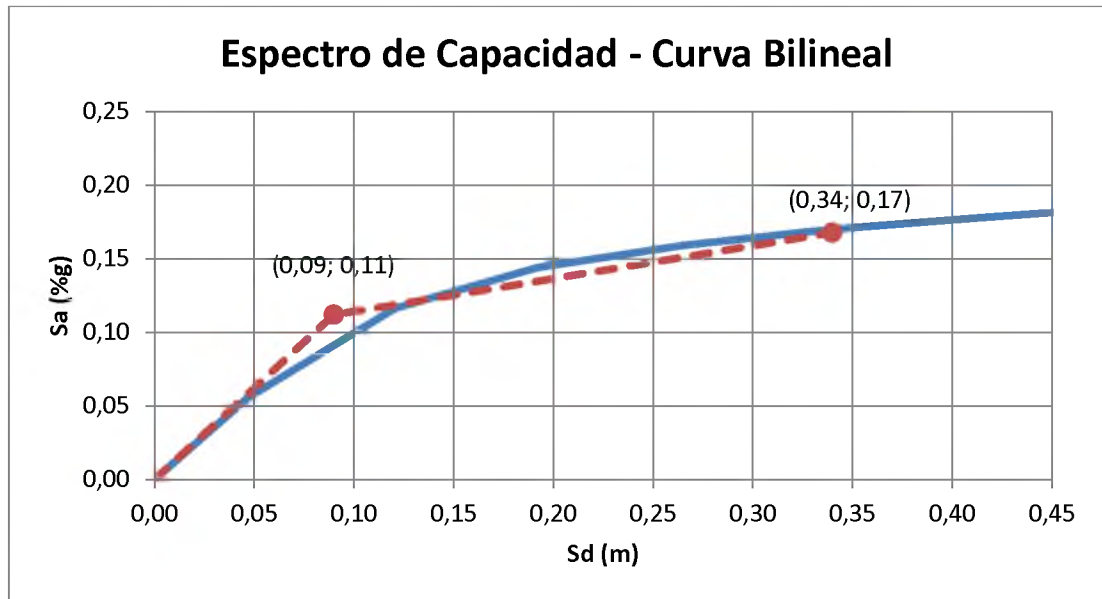


Figura 108. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido X

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{d_y}{a_y * g}} = 1,798 \text{ seg}$$

Como se indicó en el Capítulo 2.5.2 de este trabajo, la rigidez post-elástica, α , y la ductilidad, μ , se obtienen con las siguientes ecuaciones:

$$\alpha = \frac{\left(\frac{a_{pi} - a_y}{d_{pi} - d_y}\right)}{\left(\frac{a_y}{d_y}\right)} = 0,1875$$

$$\mu = \frac{d_{pi}}{d_y} = 3,66$$

Para el cálculo del amortiguamiento efectivo y periodo efectivo se utilizaron ecuaciones aproximadas explicadas en el Capítulo 2.5.2 de este trabajo. Estas expresiones son independientes del tipo de modelo histórico y del valor de alfa.

Para $\mu > 6,5$

$$T_{eff} = \left\{ 0,89 \left[\sqrt{\frac{(\mu - 1)}{1 + 0,05(\mu - 2)}} - 1 \right] + 1 \right\} T_0 = 3,108 \text{ seg}$$

$$\beta_{eff} = 19 \left[\frac{0,64(\mu - 1) - 1}{[0,64(\mu - 1)]^2} \right] \left(\frac{T_{eff}}{T_0} \right)^2 + \beta_0 = 14,23\%$$

El Espectro de Demanda Amortiguado, $(S_a)_\beta$ vs $(S_d)_\beta$, se obtiene a partir del coeficiente de amortiguamiento, B, calculado a continuación:

$$B = \frac{4}{5,6 - \ln \beta_{eff}(\text{en } \%)} = 1,36$$

El Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS se obtiene con las siguientes ecuaciones. En la Figura 113 se muestra el Espectro de Demanda y el Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS para este caso.

$$(S_a)_\beta = \frac{(S_a)_0}{B(\beta_{eff})}$$

$$(S_d)_\beta = \frac{T^2}{4\pi^2} * (S_a)_\beta$$

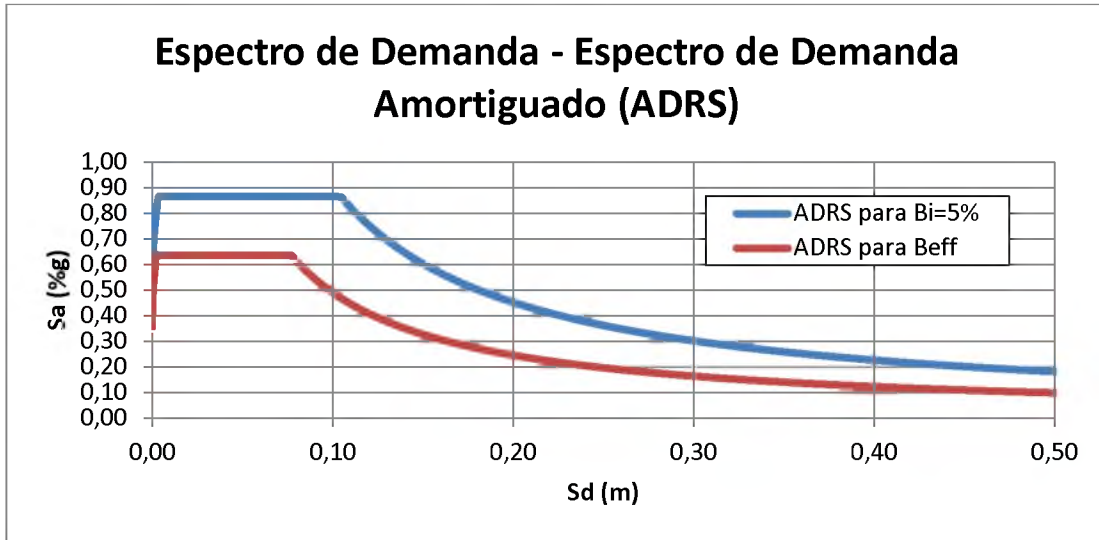


Figura 109. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Raro

El máximo desplazamiento esperado, d_i , se determina usando la intersección del periodo efectivo T_{eff} con el Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS. La máxima aceleración esperada, a_i , es la que corresponde al desplazamiento d_i en la curva de capacidad (ver Figura 114).

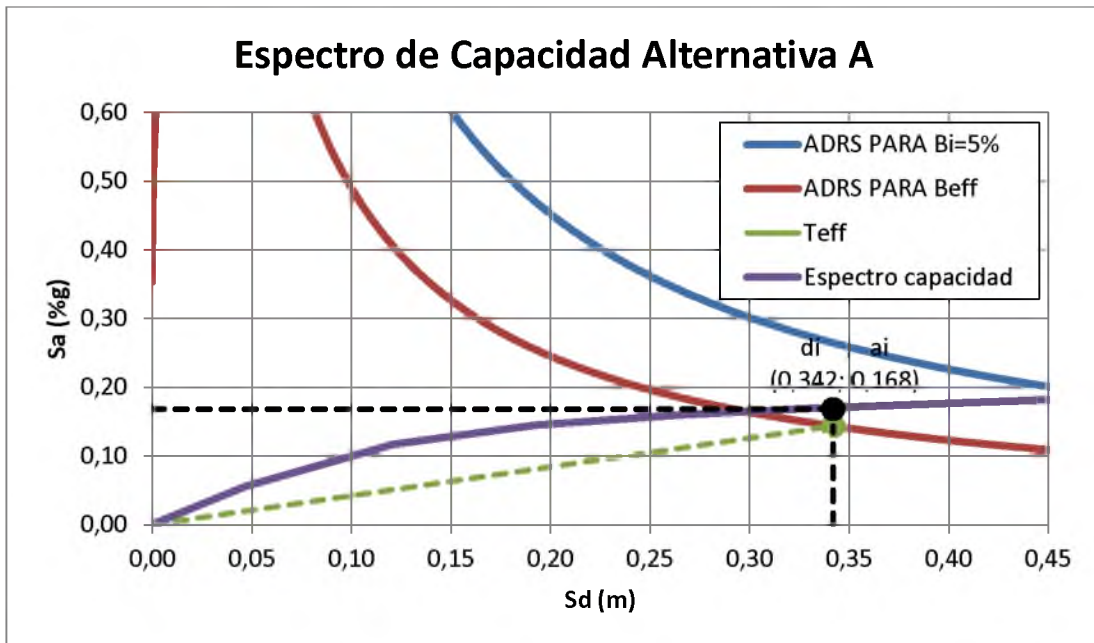


Figura 110. Método Espectro de Capacidad Alternativa A (Sismo Raro) – Sentido X

El máximo desplazamiento esperado y la máxima aceleración esperada tuvieron los siguientes valores:

$$a_i = 0,168 (\%g)$$

$$d_i = 0,342 m$$

Como se muestra a continuación, estos valores deben ser comparados con los asumidos inicialmente; debido a que sus valores son los mismos (o muy cercanos) se acepta como correctos.

$$a_{pi} = 0,168 \rightarrow a_i = 0,168 \quad \underline{OK}$$

$$d_{pi} = 0,34 m \rightarrow d_i = 0,342 m \quad \underline{OK}$$

El desplazamiento espectral y la aceleración espectral deben ser convertidos nuevamente a desplazamiento y cortante de la estructura aislada por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\delta_{max} = d_i \times PF_1 \times \phi_{1,roof} = 39,00 cm$$

$$V_{max} = S_{a_i} \times \alpha_1 \times W = 476,17 Ton$$

4.5.2.2. SISMO RARO. DIRECCIÓN Y

Se transformó el espectro de demanda para el Sismo Raro al formato Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento (ADRS) por medio de la siguiente fórmula:

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} * S_a \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento en formato ADRS para el Sismo Raro se muestra en la Figura 116:

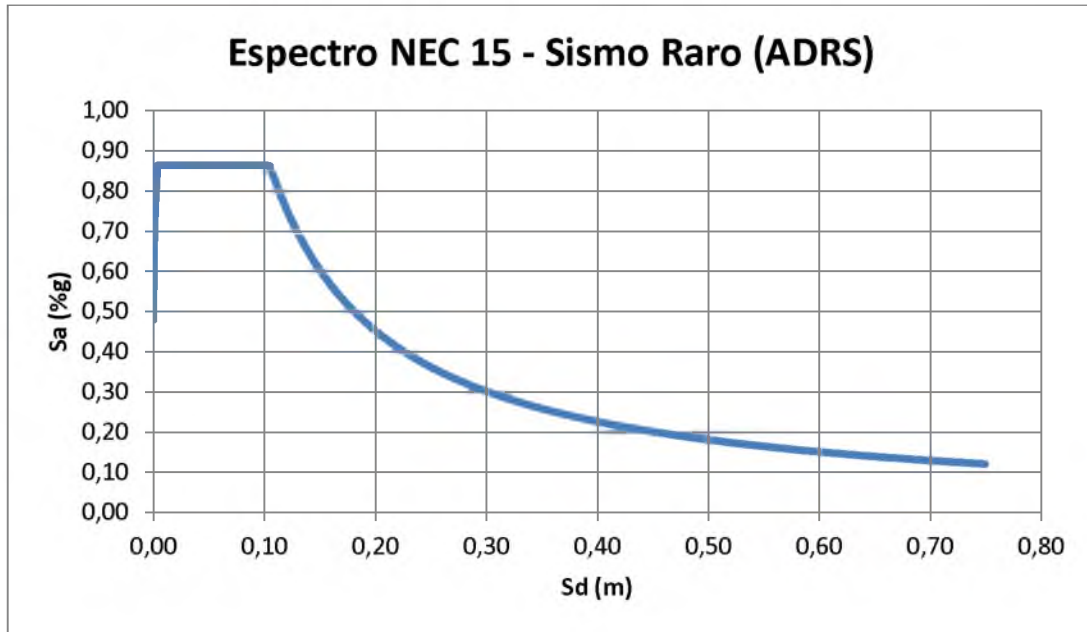


Figura 111. Espectro de Respuesta del Sismo Raro en formato ADRS

La curva de capacidad, obtenida del programa Etabs y mostrada en Capítulo 4.4 de este trabajo, fue transformada también a formato ADRS por medio de las siguientes expresiones:

$$S_{a_i} = \frac{V_i/W}{\alpha_1} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

$$S_{d_i} = \frac{\delta_i}{PF_1 \times \phi_{1,roof}} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

α_1 , PF_1 y $\phi_{1,roof}$ fueron obtenidos del análisis modal del programa Etabs y sus valores son los siguientes:

$$\alpha_1 = 0,99$$

$$PF_1 \times \varphi_{1,roof} = 1,057$$

En la Figura 117 se muestra la conversión de la Curva de Capacidad al formato ADRS.

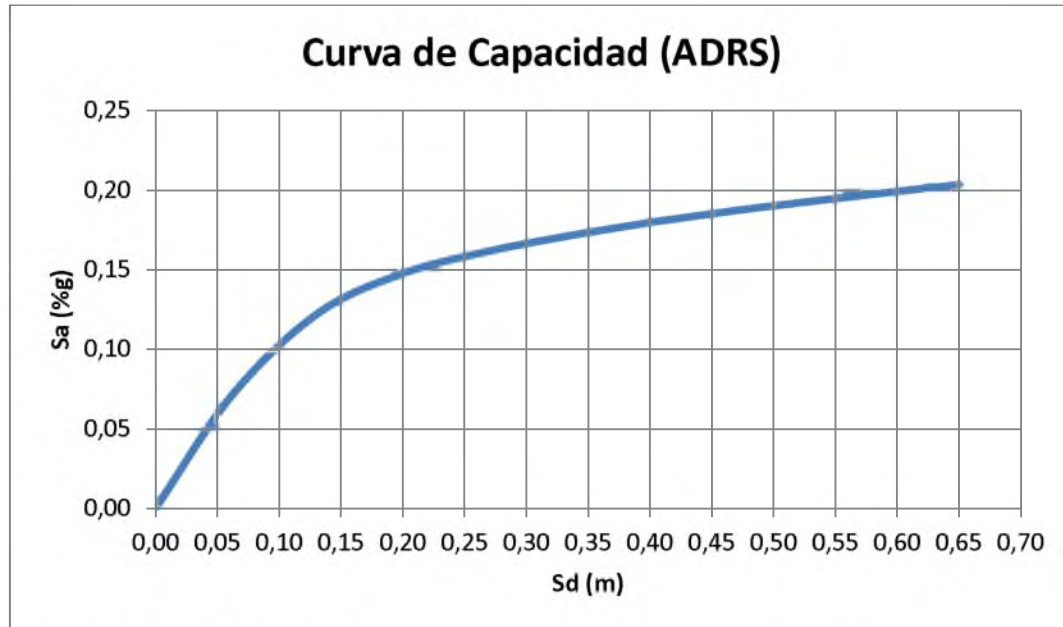


Figura 112. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido Y

De la Curva de Espectro de Capacidad se seleccionó un punto de desempeño el cual deberá ser verificado luego si es correcto o no. En este caso es punto de desempeño (d_{pi} , a_{pi}) tiene los siguientes valores:

$$a_{pi} = 0,169 (\%g)$$

$$d_{pi} = 0,339 m$$

Con el punto de desempeño seleccionado se desarrolló la curva bilineal, ver Capítulo 2.3. Como se muestran en la Figura 118, de la curva bilineal se obtiene el desplazamiento de fluencia, d_y , y la aceleración de fluencia, a_y . Estos valores se muestran a continuación:

$$a_y = 0,114 (\%g)$$

$$d_y = 0,09 \text{ m}$$

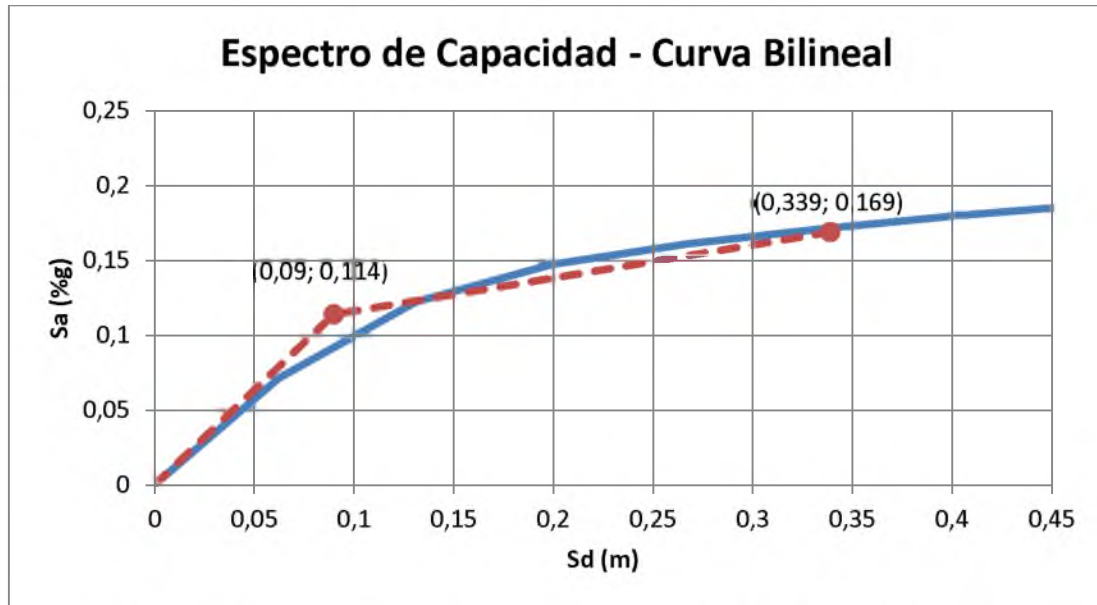


Figura 113. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido Y

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{d_y}{a_y * g}} = 1,78 \text{ seg}$$

Como se indicó en el Capítulo 2.5.2 de este trabajo, la rigidez post-elástica, α , y la ductilidad, μ , se obtienen con las ecuaciones siguientes ecuaciones:

$$\alpha = \frac{\left(\frac{a_{pi} - a_y}{d_{pi} - d_y}\right)}{\left(\frac{a_y}{d_y}\right)} = 0,174$$

$$\mu = \frac{d_{pi}}{d_y} = 3,766$$

Para el cálculo del amortiguamiento efectivo y periodo efectivo se utilizaron ecuaciones aproximadas explicadas en el Capítulo 2.5.2 de este trabajo. Estas expresiones son independientes del tipo de modelo histórico y del valor de alfa.

Para $\mu > 6,5$

$$T_{eff} = \left\{ 0,89 \left[\sqrt{\frac{(\mu - 1)}{1 + 0,05(\mu - 2)}} - 1 \right] + 1 \right\} T_0 = 3,076 \text{ seg}$$

$$\beta_{eff} = 19 \left[\frac{0,64(\mu - 1) - 1}{[0,64(\mu - 1)]^2} \right] \left(\frac{T_{eff}}{T_0} \right)^2 + \beta_0 = 14,21\%$$

El Espectro de Demanda Amortiguado, $(S_a)_\beta$ vs $(S_d)_\beta$, se obtiene a partir del coeficiente de amortiguamiento, B, calculado a continuación:

$$B = \frac{4}{5,6 - \ln \beta_{eff}(\text{en } \%)} = 1,357$$

El Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS se obtiene con las siguientes ecuaciones. En la Figura 119 se muestra el Espectro de Demanda y el Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS para este caso.

$$(S_a)_\beta = \frac{(S_a)_0}{B(\beta_{eff})}$$

$$(S_d)_\beta = \frac{T^2}{4\pi^2} * (S_a)_\beta$$

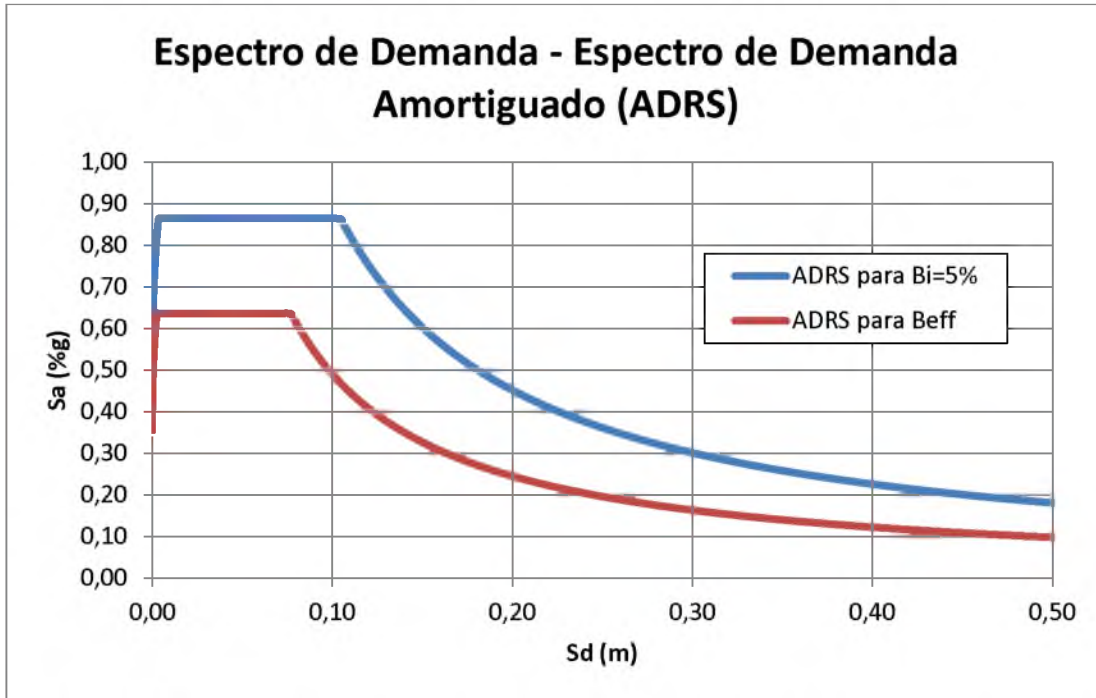


Figura 114. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Raro

El máximo desplazamiento esperado, d_i , se determina usando la intersección del periodo efectivo T_{eff} con el Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS. La máxima aceleración esperada, a_i , es la que corresponde al desplazamiento d_i en la curva de capacidad (ver Figura 120).

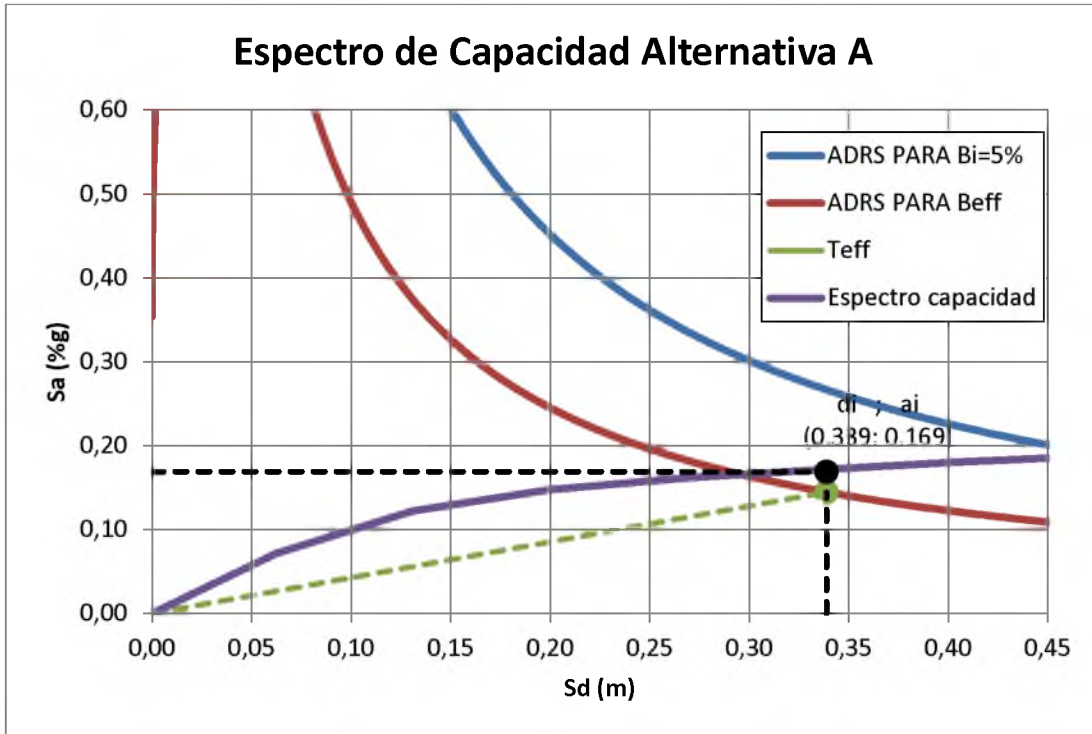


Figura 115. Método Espectro de Capacidad Alternativa A (Sismo Raro) – Sentido Y

El máximo desplazamiento esperado y la máxima aceleración esperada tuvieron los siguientes valores:

$$a_i = 0,169 \text{ (\%g)}$$

$$d_i = 0,338 \text{ m}$$

Como se muestra a continuación, estos valores deben ser comparados con los asumidos inicialmente; debido a que sus valores son los mismos (o muy cercanos) se acepta como correctos.

$$a_{pi} = 0,169 \rightarrow a_i = 0,169 \quad \underline{OK}$$

$$d_{pi} = 0,339 \text{ m} \rightarrow d_i = 0,338 \text{ m} \quad \underline{OK}$$

El desplazamiento espectral y aceleración espectral deben ser convertidos nuevamente a desplazamiento y cortante de la estructura aislada por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\delta_{max} = d_i \times PF_1 \times \phi_{1,roof} = 35,83 \text{ cm}$$

$$V_{max} = S_{a_i} \times \alpha_1 \times W = 480,55 \text{ Ton}$$

4.5.2.3. SISMO MUY RARO. DIRECCIÓN X

Se transformó el espectro de demanda para el Sismo Raro al formato Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento (ADRS) por medio de la siguiente fórmula:

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} * S_a \text{ (ATC - 40 Pag. 8 - 12)}$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento en formato ADRS para el Sismo Raro se muestra en la Figura 122:

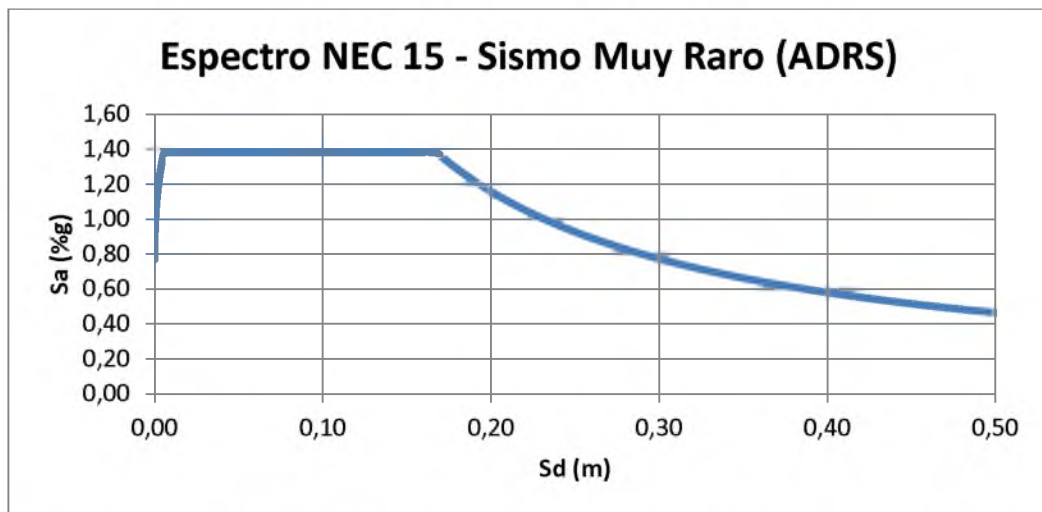


Figura 116. Espectro de Respuesta del Sismo Muy Raro en formato ADRS

La curva de capacidad, obtenida del programa Etabs y mostrada en el Capítulo 4.4 de este trabajo, fue transformada también a formato ADRS por medio de las siguientes expresiones:

$$S_{a_i} = \frac{V_i/W}{\alpha_1} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

$$S_{d_i} = \frac{\delta_i}{PF_1 \times \phi_{1,roof}} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

α_1 , PF_1 y $\phi_{1,roof}$ fueron obtenidos del análisis modal del programa Etabs y sus valores son los siguientes:

$$\alpha_1 = 0,988$$

$$PF_1 \times \phi_{1,roof} = 1,14$$

En la Figura 123 se muestra la conversión de la Curva de Capacidad al formato ADRS.

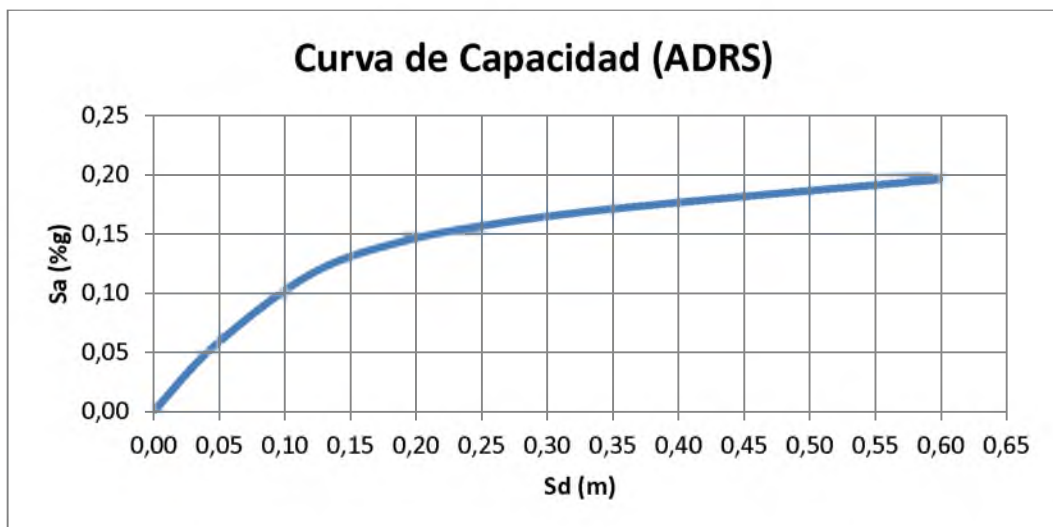


Figura 117. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido X

De la Curva de Espectro de Capacidad se seleccionó un punto de desempeño el cual deberá ser verificado luego si es correcto o no. En este caso es punto de desempeño (d_{pi} , a_{pi}) tiene los siguientes valores:

$$a_{pi} = 0,193 (\%g)$$

$$d_{pi} = 0,57 \text{ m}$$

Con el punto de desempeño seleccionado se desarrolló la curva bilineal, ver Capítulo 2.3. Como se muestran en la Figura 124, de la curva bilineal se obtiene el desplazamiento de fluencia, d_y , y la aceleración de fluencia, a_y . Estos valores se muestran a continuación:

$$a_y = 0,09 (\%g)$$

$$d_y = 0,125 \text{ m}$$

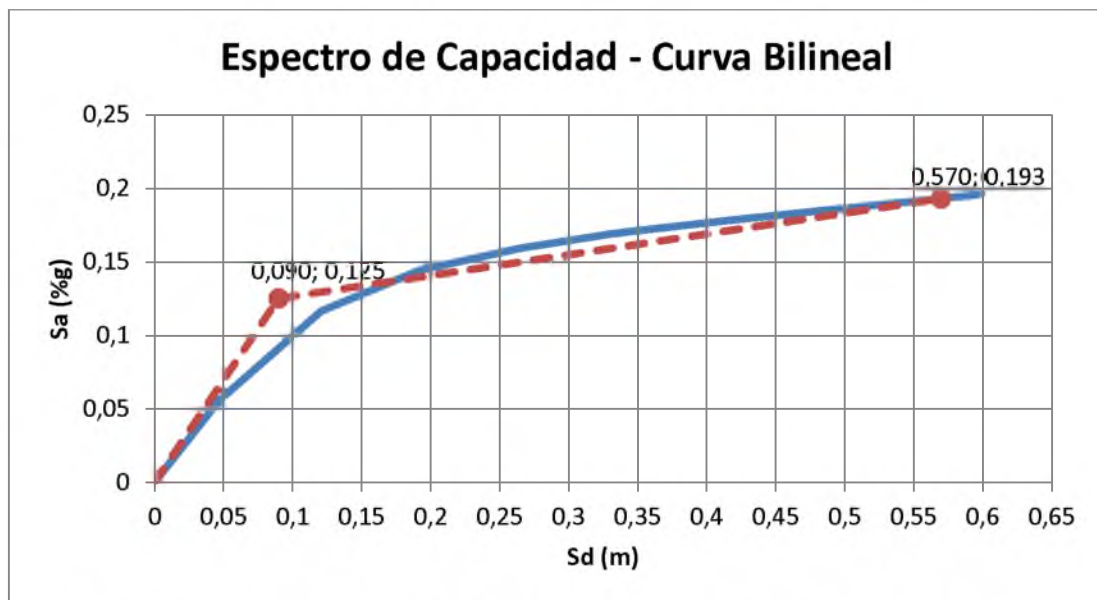


Figura 118. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido X

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{d_y}{a_y * g}} = 1,70 \text{ seg}$$

Como se indicó en el Capítulo 2.5.2 de este trabajo, la rigidez post-elástica, α , y la ductilidad, μ , se obtienen con las siguientes ecuaciones:

$$\alpha = \frac{\left(\frac{a_{pi} - a_y}{d_{pi} - d_y}\right)}{\left(\frac{a_y}{d_y}\right)} = 0,102$$

$$\mu = \frac{d_{pi}}{d_y} = 6,33$$

Para el cálculo del amortiguamiento efectivo y periodo efectivo se utilizaron ecuaciones aproximadas explicadas en el Capítulo 2.5.2 de este trabajo. Estas expresiones son independientes del tipo de modelo histórico y del valor de alfa.

Para $\mu > 6,5$

$$T_{eff} = \left\{ 0,89 \left[\sqrt{\frac{(\mu - 1)}{1 + 0,05(\mu - 2)}} - 1 \right] + 1 \right\} T_0 = 3,36 \text{ seg}$$

$$\beta_{eff} = 19 \left[\frac{0,64(\mu - 1) - 1}{[0,64(\mu - 1)]^2} \right] \left(\frac{T_{eff}}{T_0} \right)^2 + \beta_0 = 15,70\%$$

El Espectro de Demanda Amortiguado, $(S_a)_\beta$ vs $(S_d)_\beta$, se obtiene a partir del coeficiente de amortiguamiento, B, calculado a continuación:

$$B = \frac{4}{5,6 - \ln \beta_{eff}(\text{en } \%)} = 1,405$$

El Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS se obtiene con las siguientes ecuaciones. En la Figura 125 se muestra el Espectro de Demanda y el Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS para este caso.

$$(S_a)_\beta = \frac{(S_a)_0}{B(\beta_{eff})}$$

$$(S_d)_\beta = \frac{T^2}{4\pi^2} * (S_a)_\beta$$

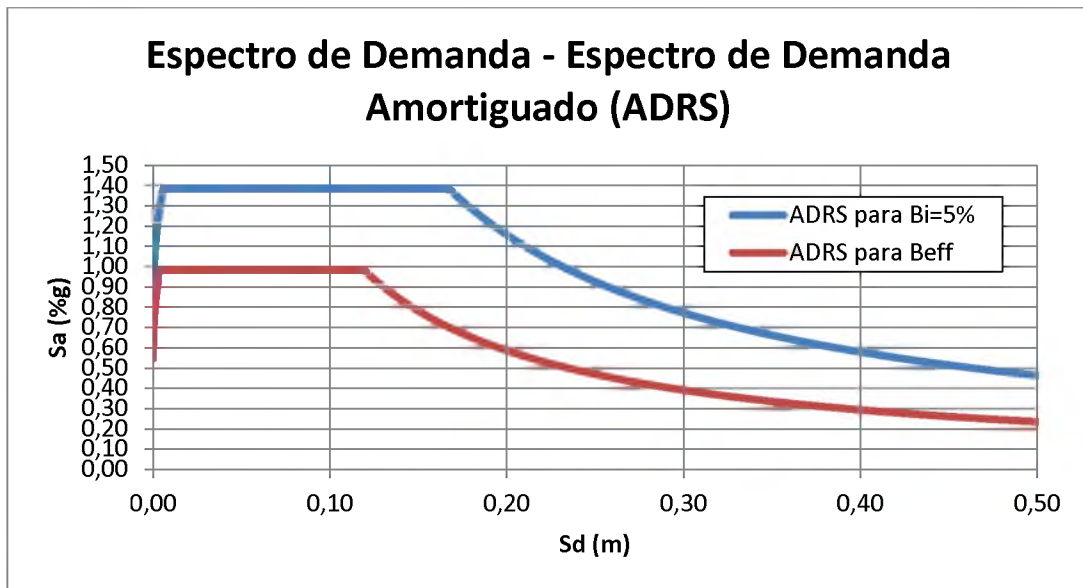


Figura 119. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Muy Raro

El máximo desplazamiento esperado, d_i , se determina usando la intersección del periodo efectivo T_{eff} con el Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS. La máxima aceleración esperada, a_i , es la que corresponde al desplazamiento d_i en la curva de capacidad (ver Figura 126).

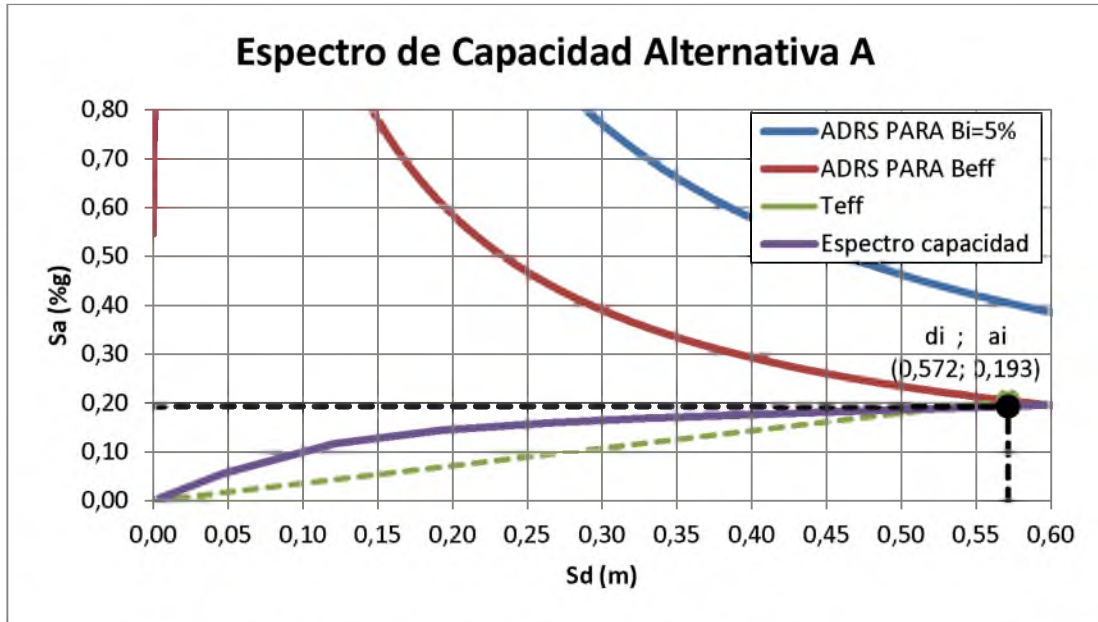


Figura 120. Método Espectro de Capacidad Alternativa A (Sismo Muy Raro) – Sentido X

El máximo desplazamiento esperado y la máxima aceleración esperada tuvieron los siguientes valores:

$$a_i = 0,193 \text{ (\%g)}$$

$$d_i = 0,572 \text{ m}$$

Como se muestra a continuación, estos valores deben ser comparados con los asumidos inicialmente; debido a que sus valores son los mismos (o muy cercanos) se acepta como correctos.

$$a_{pi} = 0,193 \rightarrow a_i = 0,193 \quad \underline{OK}$$

$$d_{pi} = 0,57 \text{ m} \rightarrow d_i = 0,572 \text{ m} \quad \underline{OK}$$

El desplazamiento espectral y la aceleración espectral deben ser convertidos nuevamente a desplazamiento y cortante de la estructura aislada por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\delta_{max} = d_i \times PF_1 \times \phi_{1,roof} = 65,12 \text{ cm}$$

$$V_{max} = S_{a_i} \times \alpha_1 \times W = 547,03 \text{ Ton}$$

4.5.2.4. SISMO MUY RARO. DIRECCIÓN Y

Se transformó el espectro de demanda para el Sismo Raro al formato Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento (ADRS) por medio de la siguiente fórmula:

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} * S_a \text{ (ATC - 40 Pag. 8 - 12)}$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento en formato ADRS para el Sismo Raro se muestra en la Figura 128:

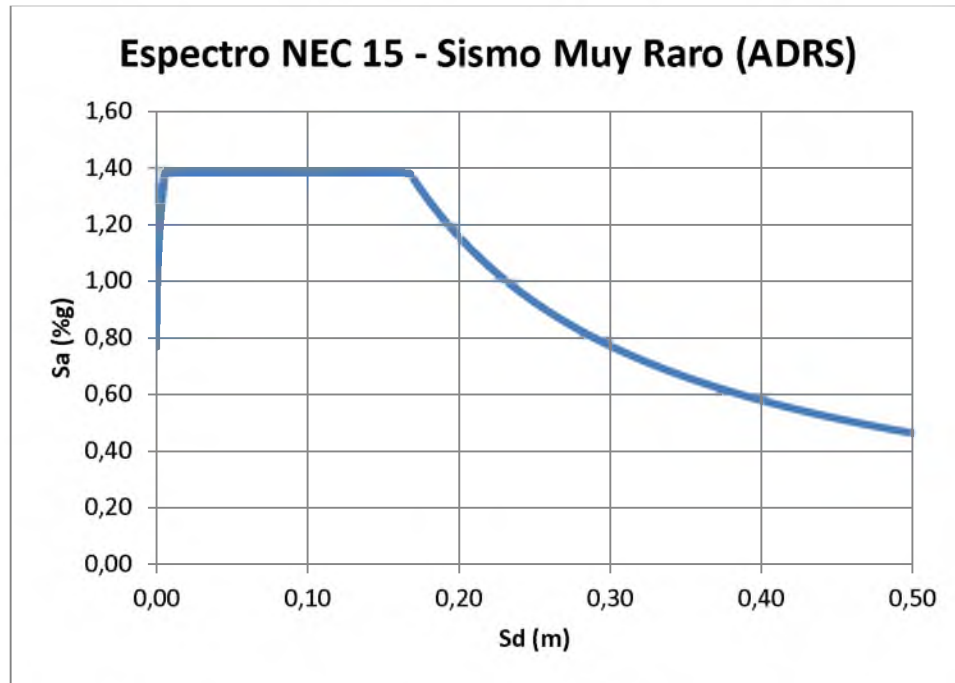


Figura 121. Espectro de Respuesta del Sismo Muy Raro en formato ADRS

La curva de capacidad, obtenida del programa Etabs y mostrada en Capítulo 2.2 de este trabajo, fue transformada también a formato ADRS por medio de las siguientes expresiones:

$$S_{a_i} = \frac{V_i/W}{\alpha_1} \quad (\text{ATC} - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

$$S_{d_i} = \frac{\delta_i}{PF_1 \times \phi_{1,roof}} \quad (\text{ATC} - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

α_1 , PF_1 y $\phi_{1,roof}$ fueron obtenidos del análisis modal del programa Etabs y sus valores son los siguientes:

$$\alpha_1 = 0,99$$

$$PF_1 \times \phi_{1,roof} = 1,057$$

En la Figura 129 se muestra la conversión de la Curva de Capacidad al formato ADRS.

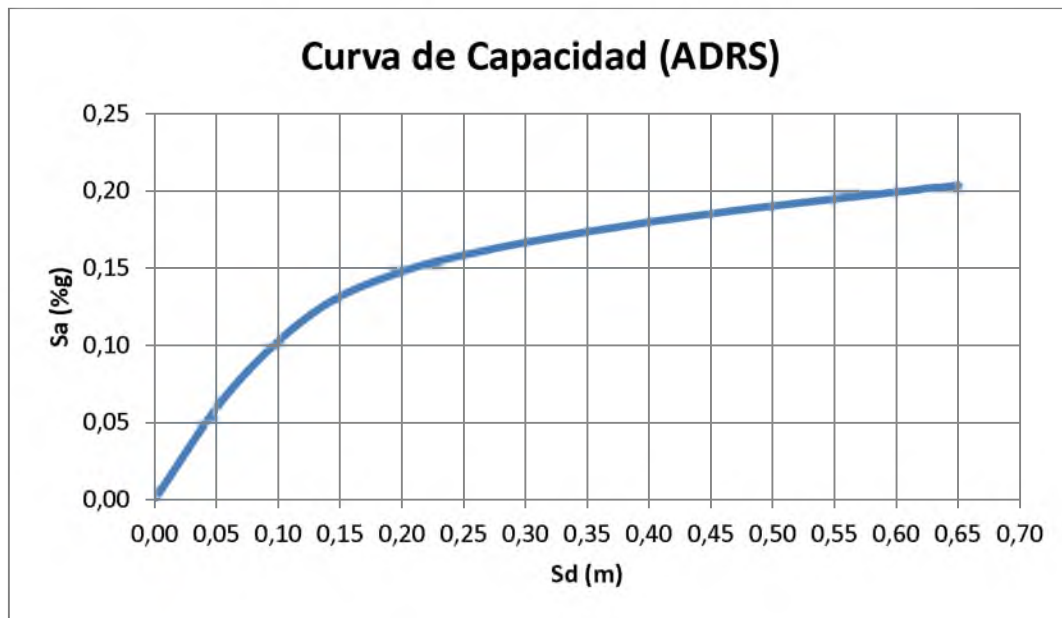


Figura 122. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido Y

De la Curva de Espectro de Capacidad se seleccionó un punto de desempeño el cual deberá ser verificado luego si es correcto o no. En este caso es punto de desempeño (d_{pi} , a_{pi}) tiene los siguientes valores:

$$a_{pi} = 0,195 (\%g)$$

$$d_{pi} = 0,569 m$$

Con el punto de desempeño seleccionado se desarrolló la curva bilineal, ver Capítulo 2.3. Como se muestran en la Figura 130, de la curva bilineal se obtiene el desplazamiento de fluencia, d_y , y la aceleración de fluencia, a_y . Estos valores se muestran a continuación:

$$a_y = 0,127 (\%g)$$

$$d_y = 0,09 m$$

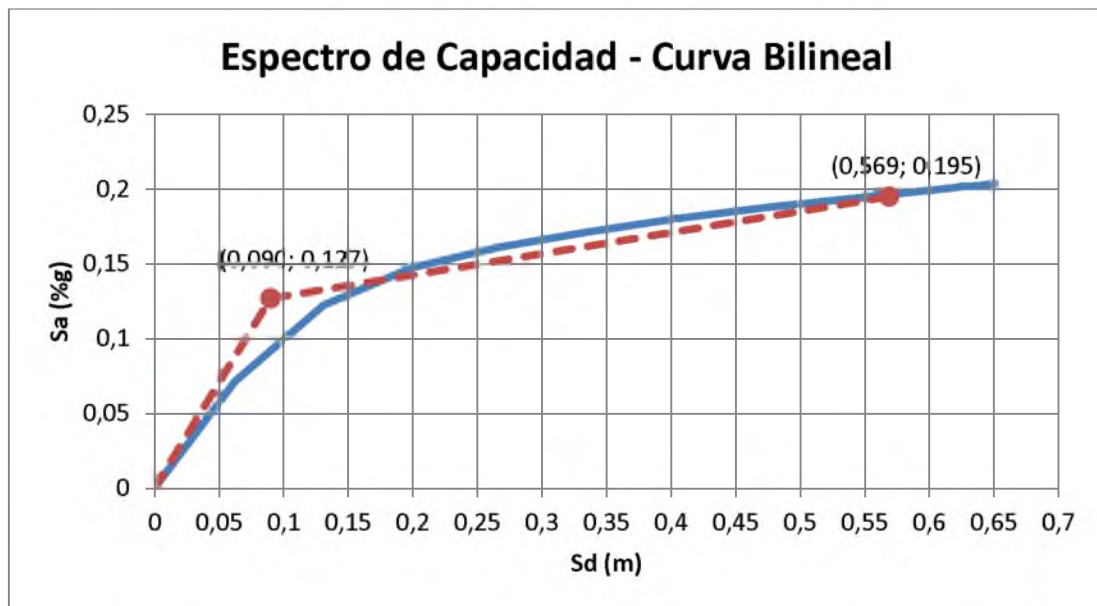


Figura 123. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido Y

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{d_y}{a_y * g}} = 1,688 \text{ seg}$$

Como se indicó en el Capítulo 2.5.3 de este trabajo, la rigidez post-elástica, α , y la ductilidad, μ , se obtienen con las siguientes ecuaciones.

$$\alpha = \frac{\left(\frac{a_{pi} - a_y}{d_{pi} - d_y}\right)}{\left(\frac{a_y}{d_y}\right)} = 0,010$$

$$\mu = \frac{d_{pi}}{d_y} = 6,32$$

Para el cálculo del amortiguamiento efectivo y periodo efectivo se utilizaron ecuaciones aproximadas explicadas en el Capítulo 2.5.3 de este trabajo. Estas expresiones son independientes del tipo de modelo histórico y del valor de alfa.

Para $\mu > 6,5$

$$T_{eff} = \left\{ 0,89 \left[\sqrt{\frac{(\mu - 1)}{1 + 0,05(\mu - 2)}} - 1 \right] + 1 \right\} T_0 = 3,33 \text{ seg}$$

$$\beta_{eff} = 19 \left[\frac{0,64(\mu - 1) - 1}{[0,64(\mu - 1)]^2} \right] \left(\frac{T_{eff}}{T_0} \right)^2 + \beta_0 = 15,70\%$$

El Espectro de Demanda Amortiguado, $(S_a)_\beta$ vs $(S_d)_\beta$, se obtiene a partir del coeficiente de amortiguamiento, B, calculado a continuación:

$$B = \frac{4}{5,6 - \ln \beta_{eff}(\text{en } \%)} = 1,405$$

El Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS se obtiene con las siguientes ecuaciones. En la Figura 131 se muestra el Espectro de Demanda y el Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS para este caso.

$$(S_a)_\beta = \frac{(S_a)_0}{B(\beta_{eff})}$$

$$(S_d)_\beta = \frac{T^2}{4\pi^2} * (S_a)_\beta$$

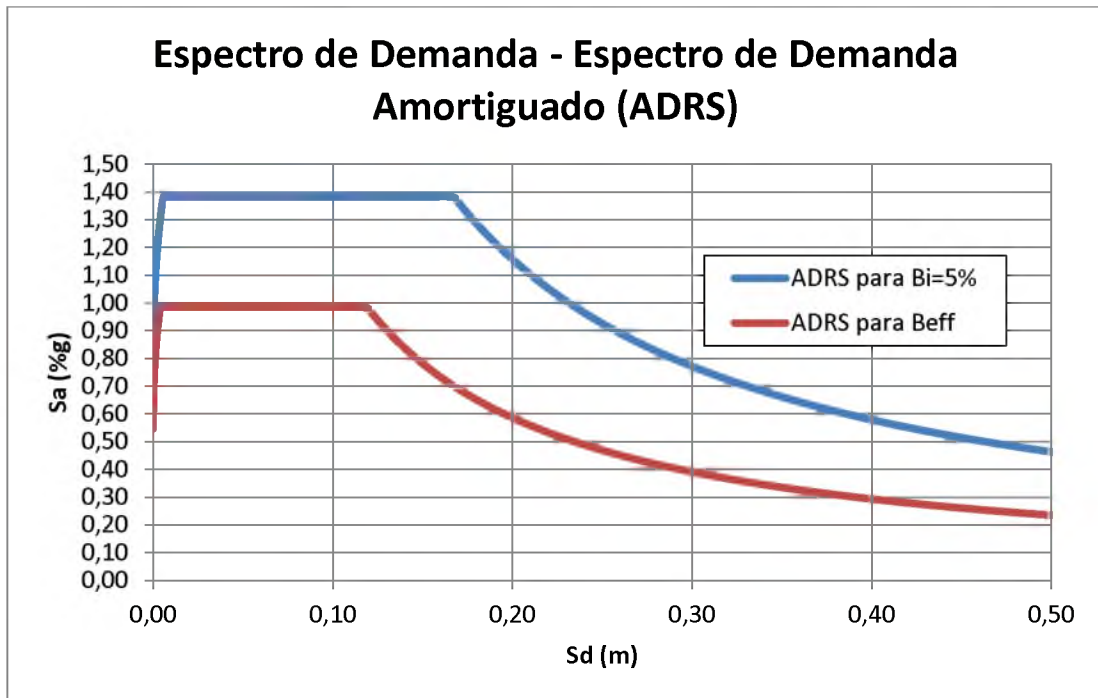


Figura 124. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Muy Raro

El máximo desplazamiento esperado, d_i , se determina usando la intersección del periodo efectivo T_{eff} con el Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS. La máxima aceleración esperada, a_i , es la que corresponde al desplazamiento d_i en la curva de capacidad (ver Figura 132).

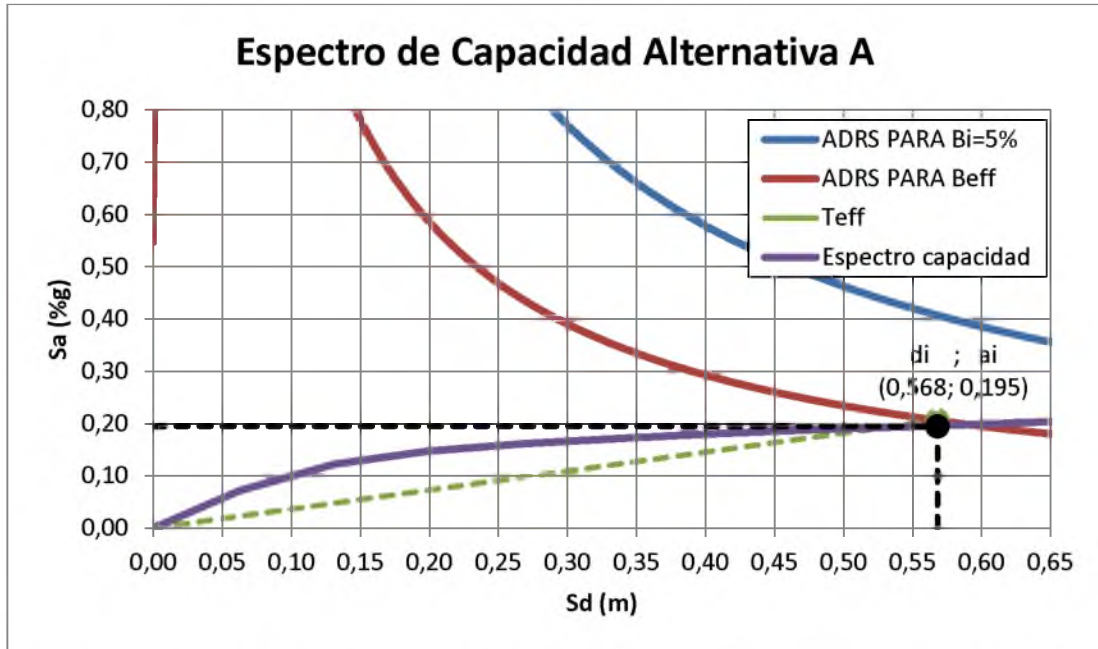


Figura 125. Método Espectro de Capacidad Alternativa A (Sismo Muy Raro) – Sentido Y

El máximo desplazamiento esperado y la máxima aceleración esperada tuvieron los siguientes valores:

$$a_i = 0,195 \text{ (\%g)}$$

$$d_i = 0,568 \text{ m}$$

Como se muestra a continuación, estos valores deben ser comparados con los asumidos inicialmente; debido a que sus valores son los mismos (o muy cercanos) se acepta como correctos.

$$a_{pi} = 0,195 \rightarrow a_i = 0,195 \text{ OK}$$

$$d_{pi} = 0,569 \text{ m} \rightarrow d_i = 0,568 \text{ m} \text{ OK}$$

El desplazamiento espectral y la aceleración espectral deben ser convertidos nuevamente a desplazamiento y cortante de la estructura aislada por medio de las siguientes ecuaciones.

$$\delta_{max} = d_i \times PF_1 \times \Phi_{1,roof} = 60 \text{ cm}$$

$$V_{max} = S_{a_i} \times \alpha_1 \times W = 554,50 \text{ Ton}$$

4.5.3. MÉTODO ESPECTRO DE CAPACIDAD. ALTERNATIVA B (ITERACIÓN CON MADRS).

En el Capítulo 2.5.3 de este trabajo se explica detalladamente la aplicación del Método Espectro de Capacidad Alternativa B especificado en el FEMA 440. A continuación se muestran los resultados obtenidos del uso de este método para hallar el punto de desempeño del Edificio de la Facultad de Ingeniería con Aisladores sísmicos tanto para el sismo raro como para el sismo muy raro.

Algunos de los cálculos realizados en este método son iguales a la Alternativa A del Método Espectro de Capacidad. Estos cálculos se mostrarán nuevamente para que su desarrollo sea más claro.

4.5.3.1. SISMO RARO. DIRECCIÓN X

Se transformó el espectro de demanda para el Sismo Raro al formato Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento (ADRS) por medio de la siguiente fórmula:

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} * S_a \text{ (ATC - 40 Pag. 8 - 12)}$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento en formato ADRS para el Sismo Raro se muestra en la Figura 134:

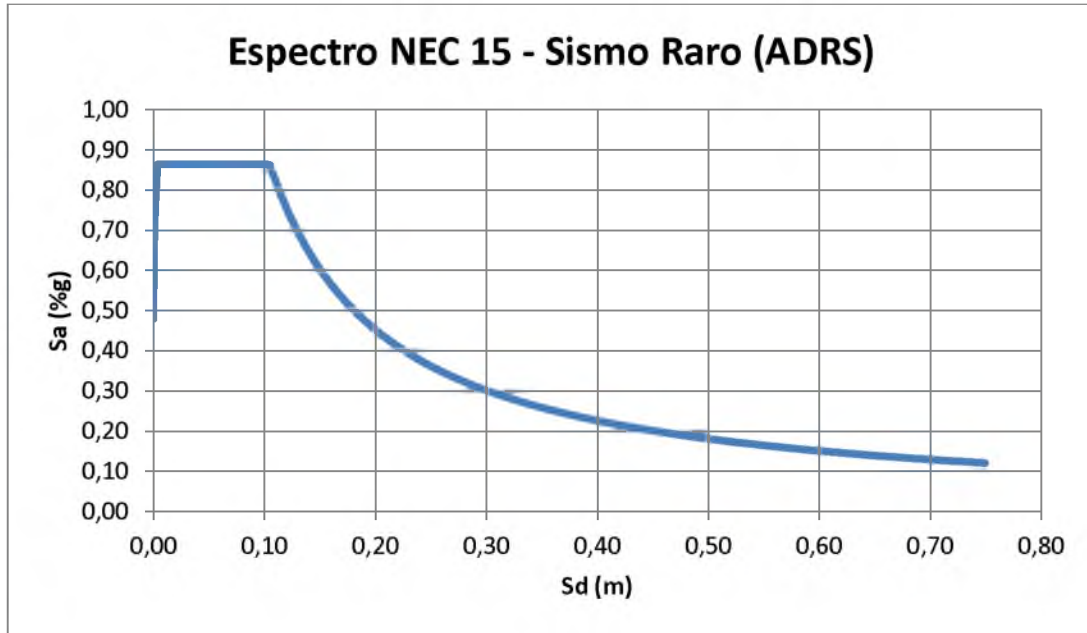


Figura 126. Espectro de Respuesta del Sismo Raro en formato ADRS

La curva de capacidad, obtenida del programa Etabs y mostrada en la 4.4, fue transformada también a formato ADRS por medio de las siguientes expresiones:

$$S_{a_i} = \frac{V_i/W}{\alpha_1} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

$$S_{d_i} = \frac{\delta_i}{PF_1 \times \phi_{1,roof}} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

α_1 , PF_1 y $\phi_{1,roof}$ fueron obtenidos del análisis modal del programa Etabs y sus valores son los siguientes:

$$\alpha_1 = 0,988$$

$$PF_1 \times \varphi_{1,roof} = 1,14$$

En la Figura 135 se muestra la conversión de la Curva de Capacidad al formato ADRS.

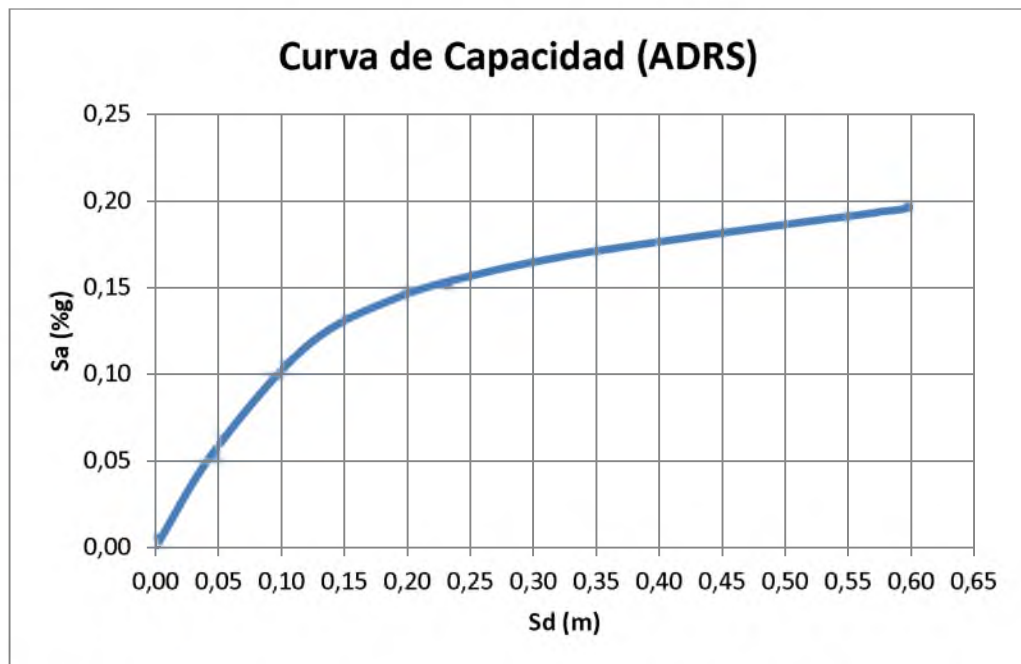


Figura 127. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido X

De la Curva de Espectro de Capacidad se seleccionó un punto de desempeño el cual deberá ser verificado luego si es correcto o no. En este caso es punto de desempeño (d_{pi} , a_{pi}) tiene los siguientes valores:

$$a_{pi} = 0,168 (\%g)$$

$$d_{pi} = 0,34 m$$

Con el punto de desempeño seleccionado se desarrolló la curva bilineal, ver Capítulo 2.3. Como se muestran en la Figura 136, de la curva bilineal se obtiene el desplazamiento de fluencia, d_y , y la aceleración de fluencia, a_y . Estos valores se muestran a continuación:

$$a_y = 0,112 (\%g)$$

$$d_y = 0,09 \text{ m}$$

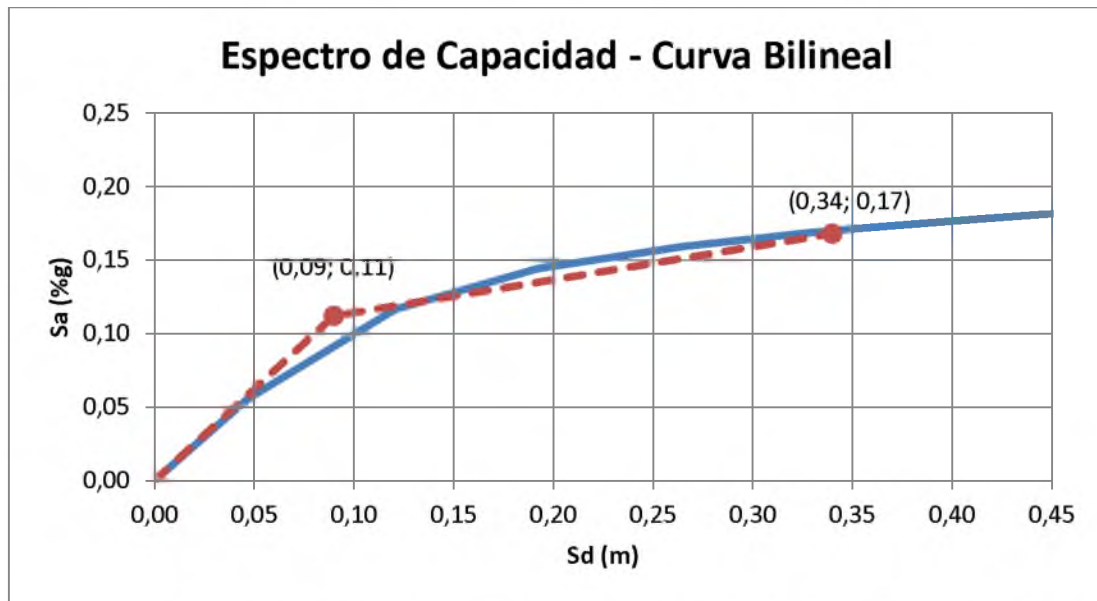


Figura 128. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido X

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{d_y}{a_y * g}} = 1,798 \text{ seg}$$

Como se indicó en el Capítulo 2.5.3 de este trabajo, la rigidez post-elástica, α , y la ductilidad, μ , se obtienen con las siguientes ecuaciones.

$$\alpha = \frac{\left(\frac{a_{pi} - a_y}{d_{pi} - d_y}\right)}{\left(\frac{a_y}{d_y}\right)} = 0,1875$$

$$\mu = \frac{d_{pi}}{d_y} = 3,66$$

Para el cálculo del amortiguamiento efectivo y periodo efectivo se utilizaron ecuaciones aproximadas explicadas en el Capítulo 2.5.3 de este trabajo. Estas expresiones son independientes del tipo de modelo histórico y del valor de alfa.

Para $\mu > 6,5$

$$T_{eff} = \left\{ 0,89 \left[\sqrt{\frac{(\mu - 1)}{1 + 0,05(\mu - 2)}} - 1 \right] + 1 \right\} T_0 = 3,108 \text{ seg}$$

$$\beta_{eff} = 19 \left[\frac{0,64(\mu - 1) - 1}{[0,64(\mu - 1)]^2} \right] \left(\frac{T_{eff}}{T_0} \right)^2 + \beta_0 = 14,23\%$$

El Espectro de Demanda Amortiguado, $(S_a)_\beta$ vs $(S_d)_\beta$, se obtiene a partir del coeficiente de amortiguamiento, B, calculado a continuación:

$$B = \frac{4}{5,6 - \ln \beta_{eff}(\text{en } \%)} = 1,36$$

El Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS se obtiene con las siguientes ecuaciones. En la Figura 137 se muestra el Espectro de Demanda y el Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS para este caso.

$$(S_a)_\beta = \frac{(S_a)_0}{B(\beta_{eff})}$$

$$(S_d)_\beta = \frac{T^2}{4\pi^2} * (S_a)_\beta$$

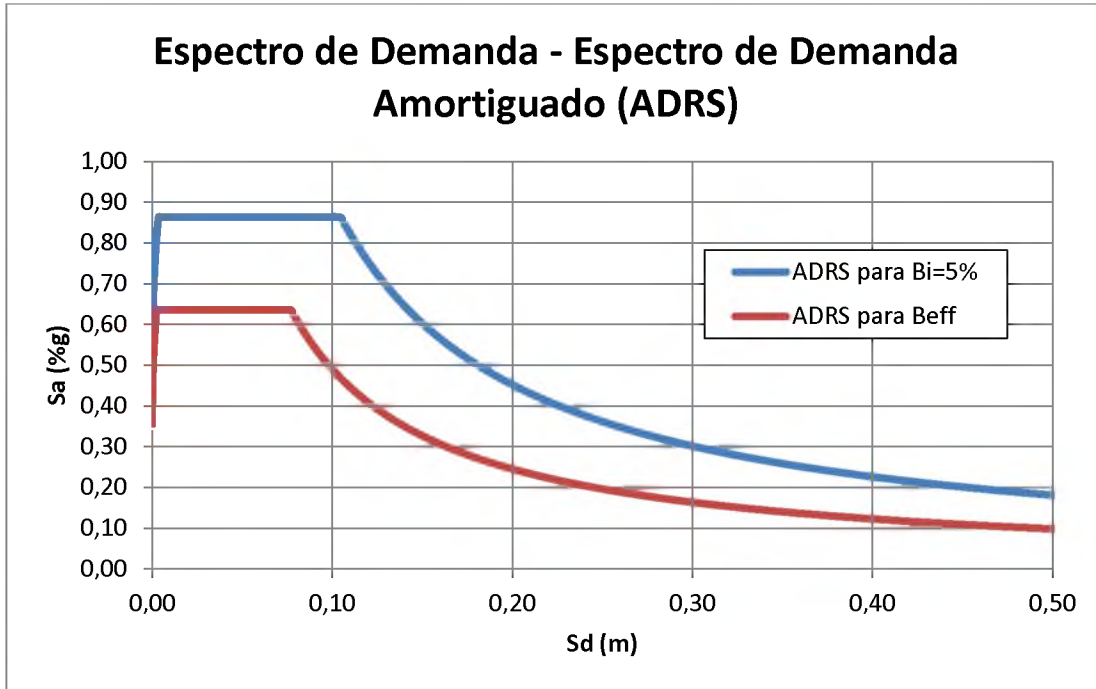


Figura 129. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Raro

Se calculó el factor de modificación, M, por medio de la ecuación presentada en el Capítulo 2.5.3 de este trabajo, como se muestra a continuación:

$$M = \left(\frac{T_{eff}}{T_0}\right)^2 \left(\frac{T_0}{T_{sec}}\right)^2 = \left(\frac{T_{eff}}{T_0}\right)^2 \left(\frac{1 + \alpha(\mu - 1)}{\mu}\right) = 1,186$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento Modificado (MADRS) se obtiene dividiendo las ordenadas de aceleración (ADRS) para el factor M. En la

Figura 138 se muestra el Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento Modificado (MADRS)

$$(S_a)_{MADRS} = (S_a)_\beta \times M$$

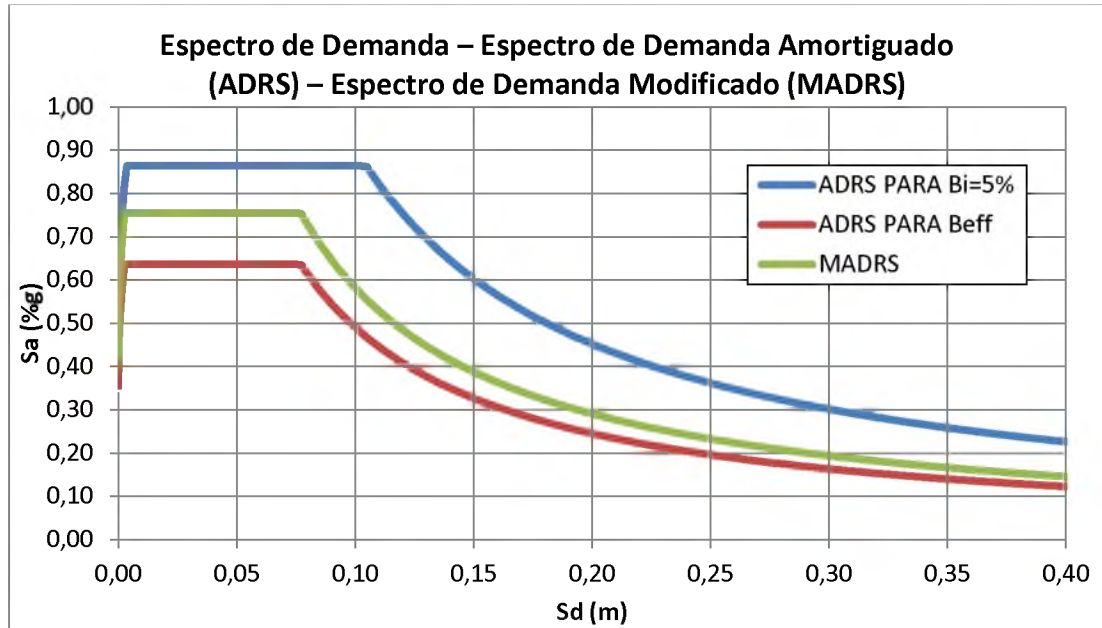


Figura 130. Espectro de demanda Modificado (MADRS) – Sismo Raro

El punto de desempeño (d_i , a_i) se encontrar en la intersección de la Curva de Capacidad con el Espectro de Demanda Aceleración-Desplazamiento Modificado (ver Figura 139)

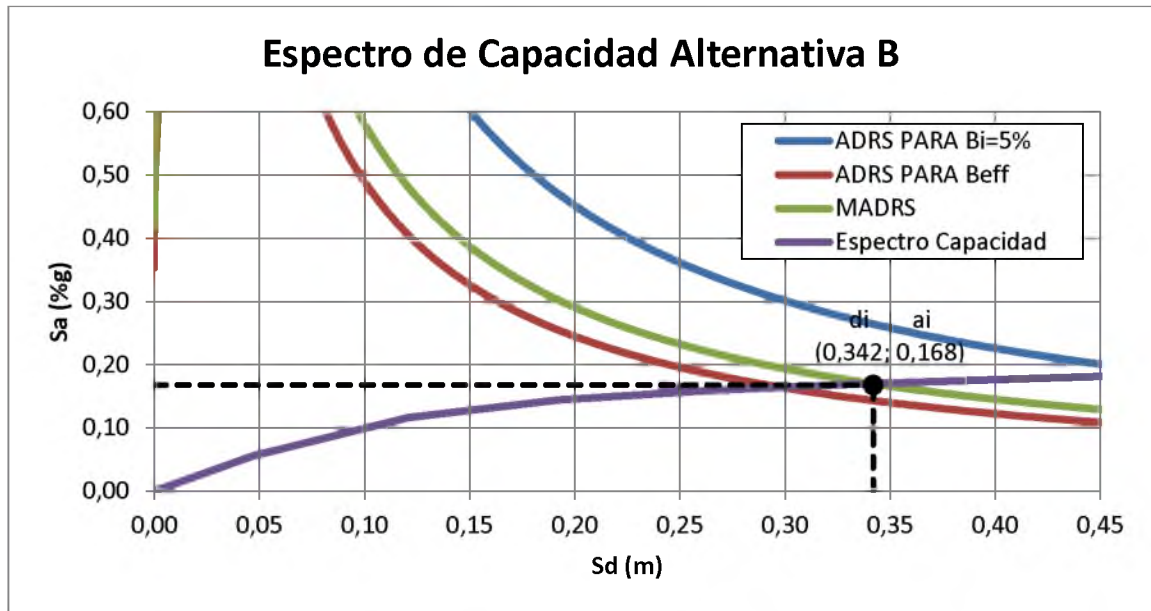


Figura 131. Método Espectro de Capacidad Alternativa B (Sismo raro) – Sentido X
 El máximo desplazamiento esperado y la máxima aceleración esperada tuvieron los siguientes valores:

$$a_i = 0,168 \text{ (\%g)}$$

$$d_i = 0,342 \text{ m}$$

Como se muestra a continuación, estos valores deben ser comparados con los asumidos inicialmente; debido a que sus valores son los mismos (o muy cercanos) se acepta como correctos.

$$a_{pi} = 0,168 \rightarrow a_i = 0,168 \quad \underline{OK}$$

$$d_{pi} = 0,34 \text{ m} \rightarrow d_i = 0,342 \text{ m} \quad \underline{OK}$$

El desplazamiento espectral y la aceleración espectral deben ser convertidos nuevamente a desplazamiento y cortante de la estructura aislada por medio de las ecuaciones.

$$\delta_{max} = d_i \times PF_1 \times \phi_{1,roof} = 39,00 \text{ cm}$$

$$V_{max} = S_{a_i} \times \alpha_1 \times W = 476,17 \text{ Ton}$$

4.5.3.2. SISMO RARO. DIRECCIÓN Y

Se transformó el espectro de demanda para el Sismo Raro al formato Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento (ADRS) por medio de la siguiente fórmula:

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} * S_a \text{ (ATC - 40 Pag. 8 - 12)}$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento en formato ADRS para el Sismo Raro se muestra en la Figura 141:

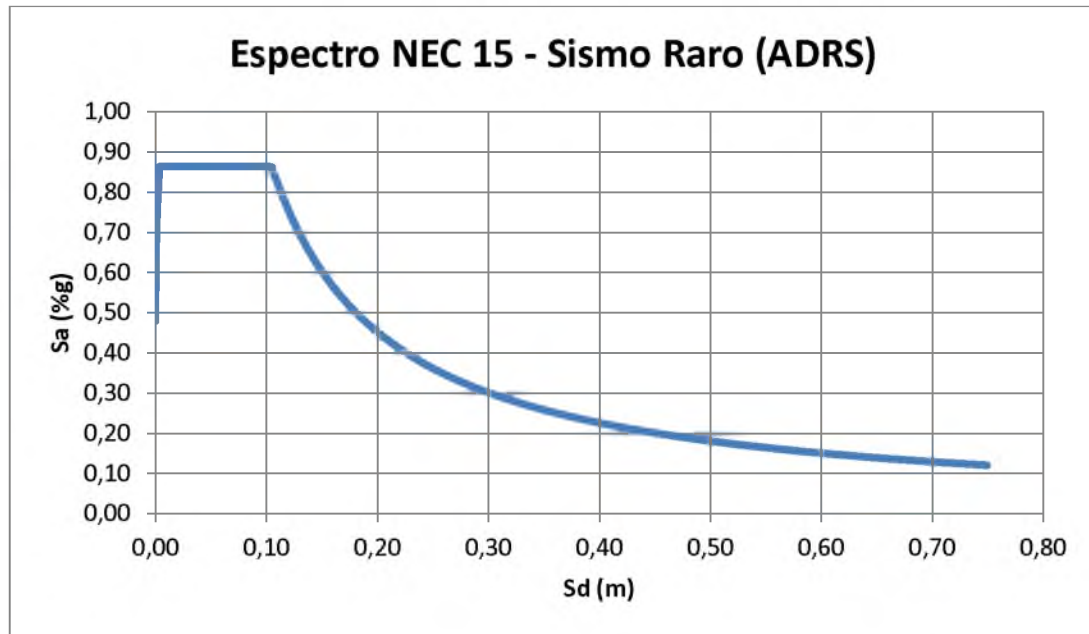


Figura 132. Espectro de Respuesta del Sismo Raro en formato ADRS

La curva de capacidad, obtenida del programa Etabs y mostrada en Capítulo 4.4 de este trabajo, fue transformada también a formato ADRS por medio de las siguientes expresiones:

$$S_{a_i} = \frac{V_i/W}{\alpha_1} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

$$S_{d_i} = \frac{\delta_i}{PF_1 \times \phi_{1,roof}} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

α_1 , PF_1 y $\phi_{1,roof}$ fueron obtenidos del análisis modal del programa Etabs y sus valores son los siguientes:

$$\alpha_1 = 0,99$$

$$PF_1 \times \phi_{1,roof} = 1,057$$

En la Figura 142 se muestra la conversión de la Curva de Capacidad al formato ADRS.

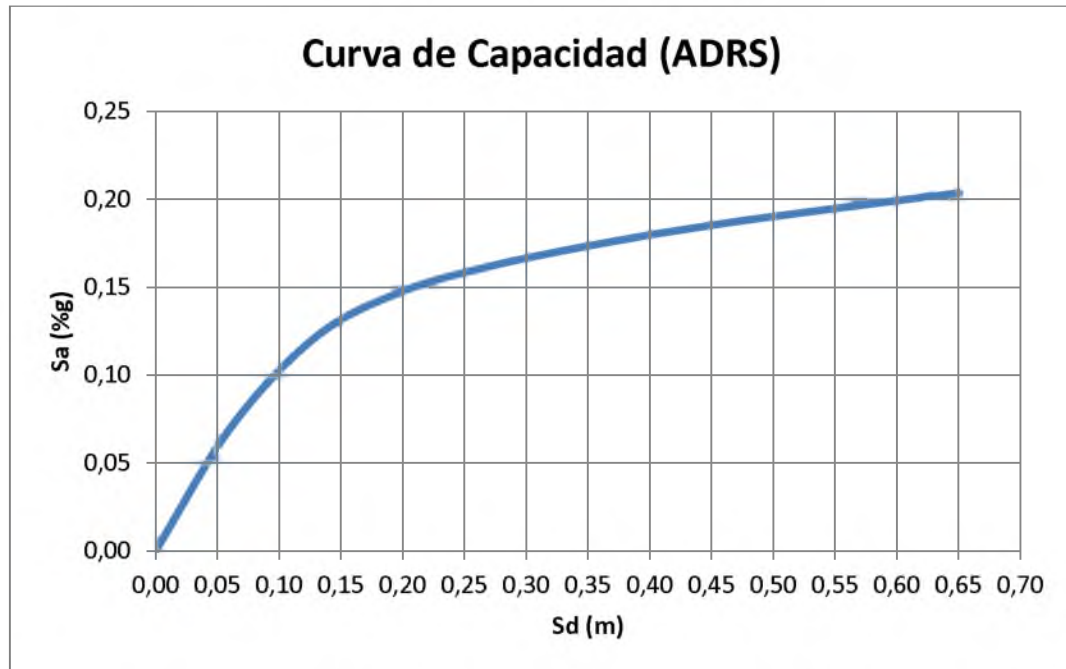


Figura 133. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido Y

De la Curva de Espectro de Capacidad se seleccionó un punto de desempeño el cual deberá ser verificado luego si es correcto o no. En este caso es punto de desempeño (d_{pi} , a_{pi}) tiene los siguientes valores:

$$a_{pi} = 0,169 (\%g)$$

$$d_{pi} = 0,339 m$$

Con el punto de desempeño seleccionado se desarrolló la curva bilineal, ver Capítulo 2.3. Como se muestran en la Figura 143, de la curva bilineal se obtiene el desplazamiento de fluencia, d_y , y la aceleración de fluencia, a_y . Estos valores se muestran a continuación:

$$a_y = 0,114 (\%g)$$

$$d_y = 0,09 \text{ m}$$

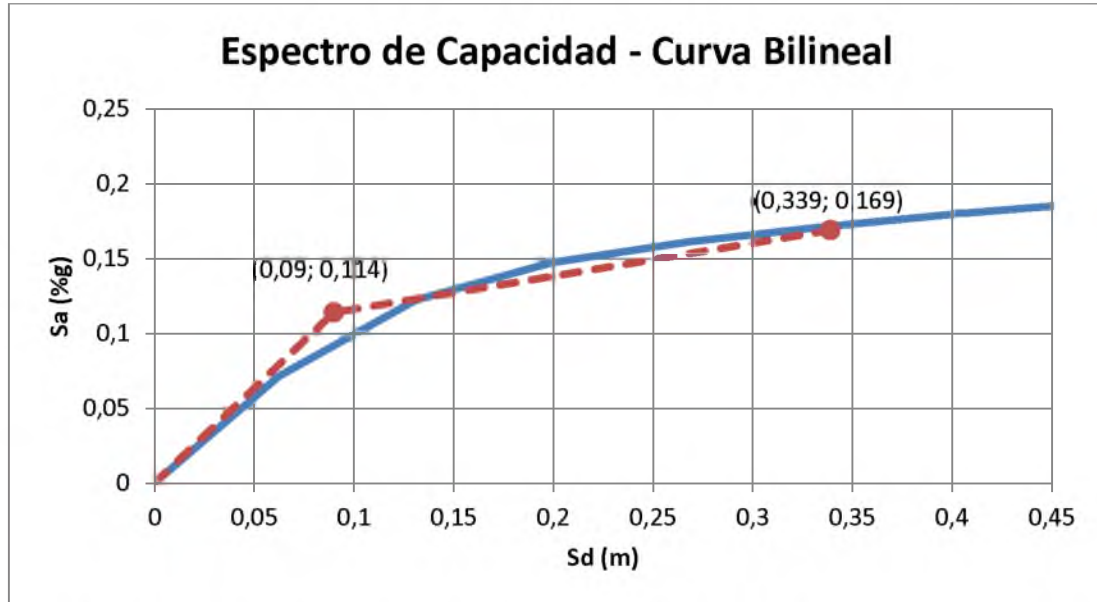


Figura 134. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido Y

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{d_y}{a_y * g}} = 1,78 \text{ seg}$$

Como se indicó en el Capítulo 2.5.3 de este trabajo, la rigidez post-elástica, α , y la ductilidad, μ , se obtienen con las siguientes ecuaciones.

$$\alpha = \frac{\left(\frac{a_{pi} - a_y}{d_{pi} - d_y}\right)}{\left(\frac{a_y}{d_y}\right)} = 0,174$$

$$\mu = \frac{d_{pi}}{d_y} = 3,766$$

Para el cálculo del amortiguamiento efectivo y periodo efectivo se utilizaron ecuaciones aproximadas explicadas en el Capítulo 2.5.3 de este trabajo. Estas expresiones son independientes del tipo de modelo histórico y del valor de alfa.

Para $\mu > 6,5$

$$T_{eff} = \left\{ 0,89 \left[\sqrt{\frac{(\mu - 1)}{1 + 0,05(\mu - 2)}} - 1 \right] + 1 \right\} T_0 = 3,076 \text{ seg}$$

$$\beta_{eff} = 19 \left[\frac{0,64(\mu - 1) - 1}{[0,64(\mu - 1)]^2} \right] \left(\frac{T_{eff}}{T_0} \right)^2 + \beta_0 = 14,21\%$$

El Espectro de Demanda Amortiguado, $(S_a)_\beta$ vs $(S_d)_\beta$, se obtiene a partir del coeficiente de amortiguamiento, B, calculado a continuación:

$$B = \frac{4}{5,6 - \ln \beta_{eff}(\text{en } \%)} = 1,357$$

El Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS se obtiene con las siguientes ecuaciones. En la Figura 144 se muestra el Espectro de Demanda y el Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS para este caso.

$$(S_a)_\beta = \frac{(S_a)_0}{B(\beta_{eff})}$$

$$(S_d)_\beta = \frac{T^2}{4\pi^2} * (S_a)_\beta$$

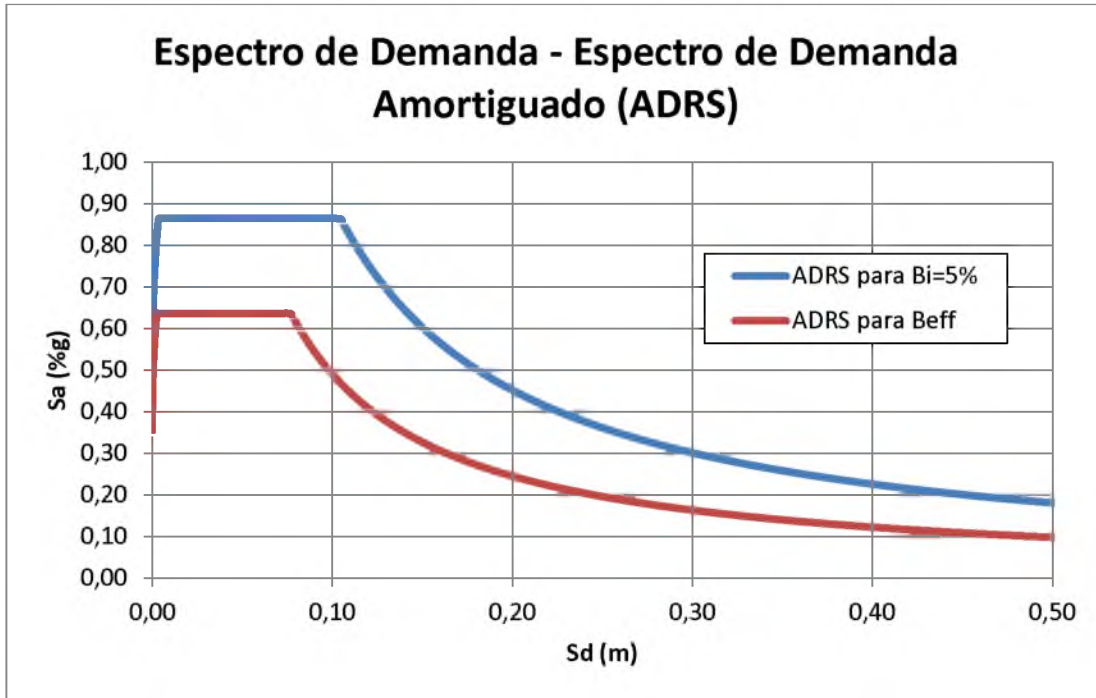


Figura 135. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Raro

Se calculó el factor de modificación, M , por medio de la ecuación presentada en el Capítulo 2.5.3 de este trabajo, como se muestra a continuación:

$$M = \left(\frac{T_{eff}}{T_0}\right)^2 \left(\frac{T_0}{T_{sec}}\right)^2 = \left(\frac{T_{eff}}{T_0}\right)^2 \left(\frac{1 + \alpha(\mu - 1)}{\mu}\right) =$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento Modificado (MADRS) se obtiene dividiendo las ordenadas de aceleración (ADRS) para el factor M . En la Figura 145 se muestra el Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento Modificado (MADRS)

$$(S_a)_{MADRS} = (S_a)_\beta \times M$$

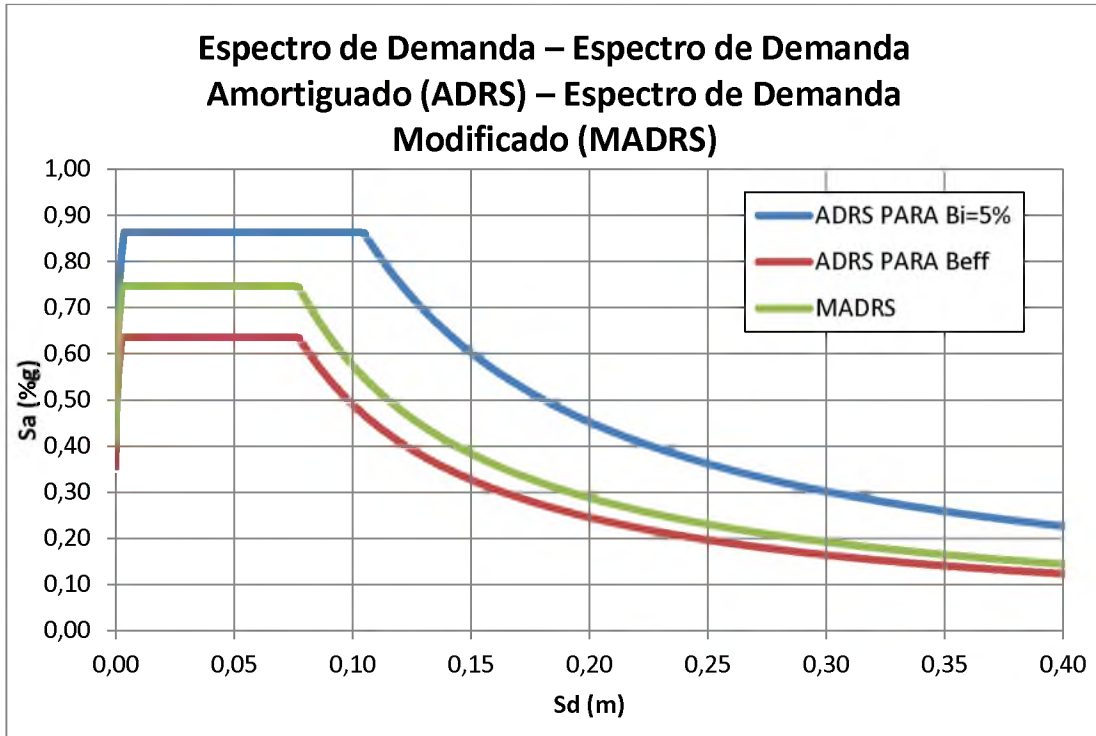


Figura 136. Espectro de demanda Modificado (MADRS) – Sismo Raro

El punto de desempeño (d_i , a_i) se encontrar en la intersección de la Curva de Capacidad con el Espectro de Demanda Aceleración-Desplazamiento Modificado (ver Figura 146).

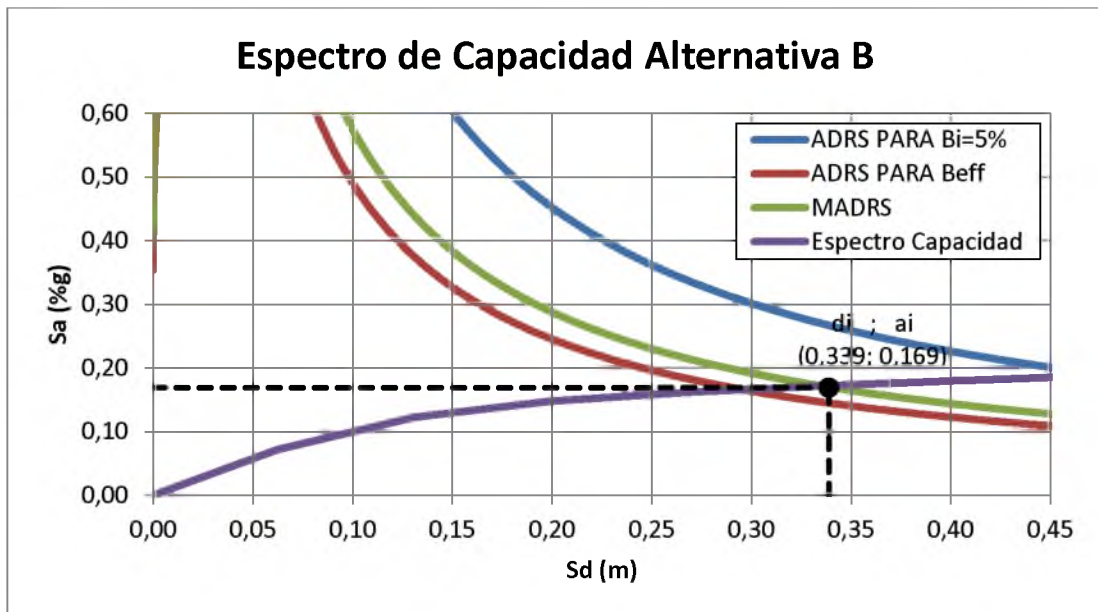


Figura 137. Método Espectro de Capacidad Alternativa B (Sismo raro) – Sentido Y

El máximo desplazamiento esperado y la máxima aceleración esperada tuvieron los siguientes valores:

$$a_i = 0,169 (\%g)$$

$$d_i = 0,338 m$$

Como se muestra a continuación, estos valores deben ser comparados con los asumidos inicialmente; debido a que sus valores son los mismos (o muy cercanos) se acepta como correctos.

$$a_{pi} = 0,169 \rightarrow a_i = 0,169 \quad \underline{OK}$$

$$d_{pi} = 0,339 m \rightarrow d_i = 0,338 m \quad \underline{OK}$$

El desplazamiento espectral y la aceleración espectral deben ser convertidos nuevamente a desplazamiento de la estructura aislada por medio de las ecuaciones.

$$\delta_{max} = d_i \times PF_1 \times \phi_{1,roof} = 35,83 cm$$

$$V_{max} = S_{a_i} \times \alpha_1 \times W = 480,55 Ton$$

4.5.3.3. SISMO MUY RARO. DIRECCIÓN X

Se transformó el espectro de demanda para el Sismo Raro al formato Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento (ADRS) por medio de la siguiente fórmula:

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} * S_a \text{ (ATC - 40 Pag. 8 - 12)}$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento en formato ADRS para el Sismo Raro se muestra en la Figura 148:

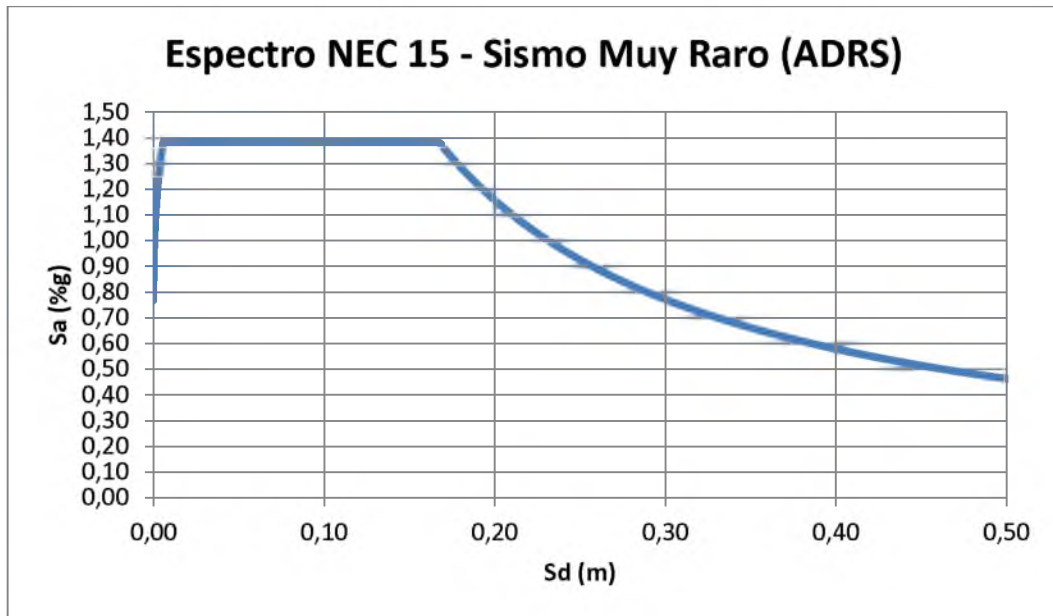


Figura 138. Espectro de Respuesta del Sismo Muy Raro en formato ADRS

La curva de capacidad, obtenida del programa Etabs y mostrada en el Capítulo 2.2 de este trabajo, fue transformada también a formato ADRS por medio de las siguientes expresiones:

$$S_{a_i} = \frac{V_i/W}{\alpha_1} \text{ (ATC - 40 Pag. 8 - 12)}$$

$$S_{d_i} = \frac{\delta_i}{PF_1 \times \phi_{1,roof}} \text{ (ATC - 40 Pag. 8 - 12)}$$

α_1 , PF_1 y $\phi_{1,roof}$ fueron obtenidos del análisis modal del programa Etabs y sus valores son los siguientes:

$$\alpha_1 = 0,988$$

$$PF_1 \times \phi_{1,roof} = 1,14$$

En la Figura 149 se muestra la conversión de la Curva de Capacidad al formato ADRS.

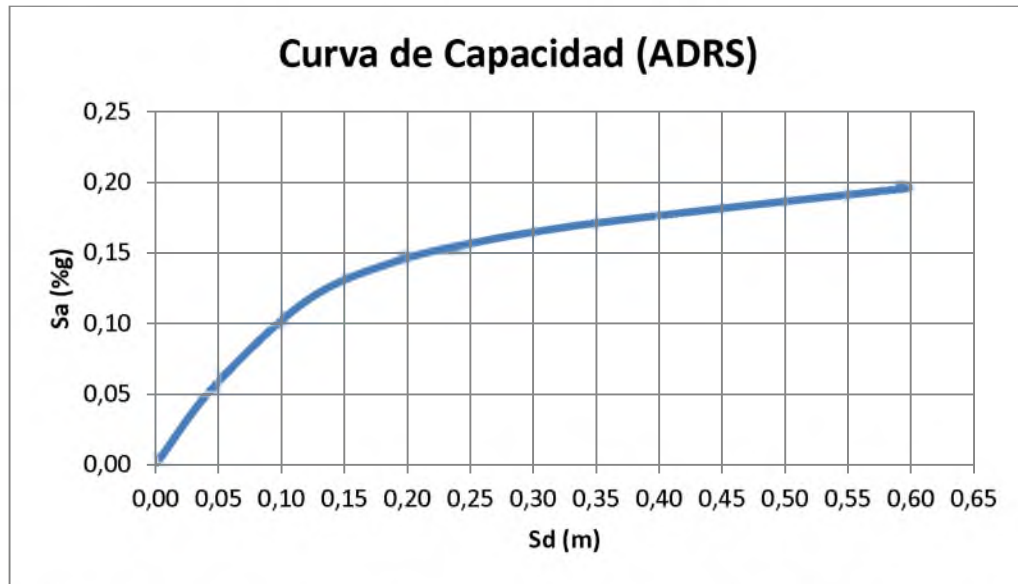


Figura 139. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido X

De la Curva de Espectro de Capacidad se seleccionó un punto de desempeño el cual deberá ser verificado luego si es correcto o no. En este caso es punto de desempeño (d_{pi}, a_{pi}) tiene los siguientes valores:

$$a_{pi} = 0,193 (\%g)$$

$$d_{pi} = 0,57 m$$

Con el punto de desempeño seleccionado se desarrolló la curva bilineal, ver Capítulo 2.3. Como se muestran en la Figura 150, de la curva bilineal se obtiene el desplazamiento de fluencia, d_y , y la aceleración de fluencia, a_y . Estos valores se muestran a continuación:

$$a_y = 0,09 (\%g)$$

$$d_y = 0,125 \text{ m}$$

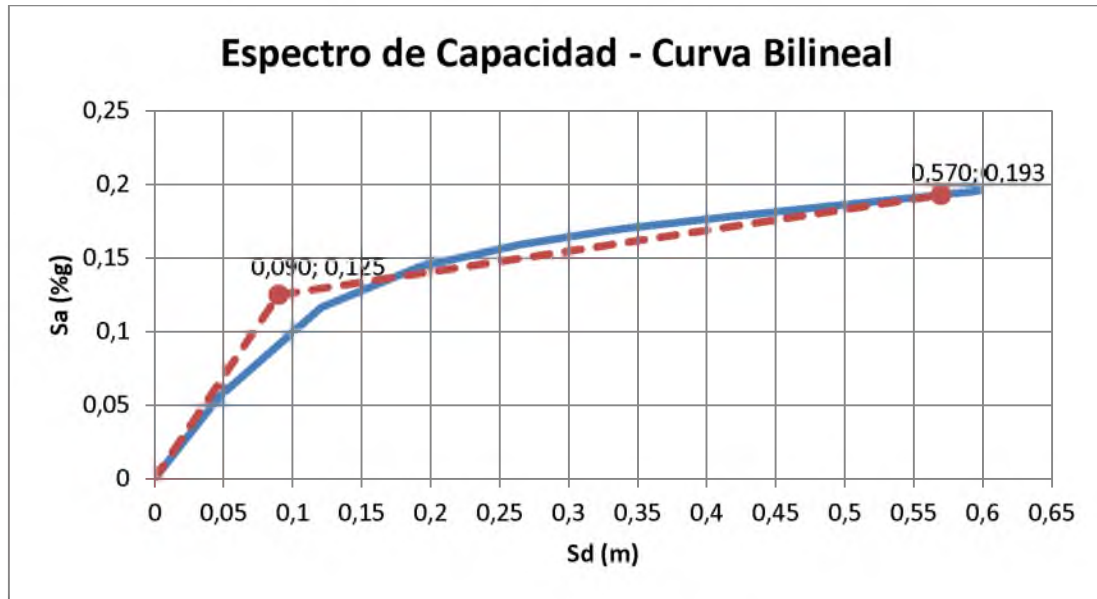


Figura 140. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido X

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{d_y}{a_y * g}} = 1,70 \text{ seg}$$

Como se indicó en el Capítulo 2.5.3 de este trabajo, la rigidez post-elástica, α , y la ductilidad, μ , se obtienen con las siguientes ecuaciones.

$$\alpha = \frac{\left(\frac{a_{pi} - a_y}{d_{pi} - d_y}\right)}{\left(\frac{a_y}{d_y}\right)} = 0,102$$

$$\mu = \frac{d_{pi}}{d_y} = 6,33$$

Para el cálculo del amortiguamiento efectivo y periodo efectivo se utilizaron ecuaciones aproximadas explicadas en el Capítulo 2.5.3 de este trabajo. Estas expresiones son independientes del tipo de modelo histórico y del valor de alfa.

Para $\mu > 6,5$

$$T_{eff} = \left\{ 0,89 \left[\sqrt{\frac{(\mu - 1)}{1 + 0,05(\mu - 2)}} - 1 \right] + 1 \right\} T_0 = 3,36 \text{ seg}$$

$$\beta_{eff} = 19 \left[\frac{0,64(\mu - 1) - 1}{[0,64(\mu - 1)]^2} \right] \left(\frac{T_{eff}}{T_0} \right)^2 + \beta_0 = 15,70\%$$

El Espectro de Demanda Amortiguado, $(S_a)_\beta$ vs $(S_d)_\beta$, se obtiene a partir del coeficiente de amortiguamiento, B, calculado a continuación:

$$B = \frac{4}{5,6 - \ln \beta_{eff}(\text{en } \%)} = 1,405$$

El Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS se obtiene con las siguientes ecuaciones. En la Figura 158 se muestra el Espectro de Demanda y el Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS para este caso.

$$(S_a)_\beta = \frac{(S_a)_0}{B(\beta_{eff})}$$

$$(S_d)_\beta = \frac{T^2}{4\pi^2} * (S_a)_\beta$$

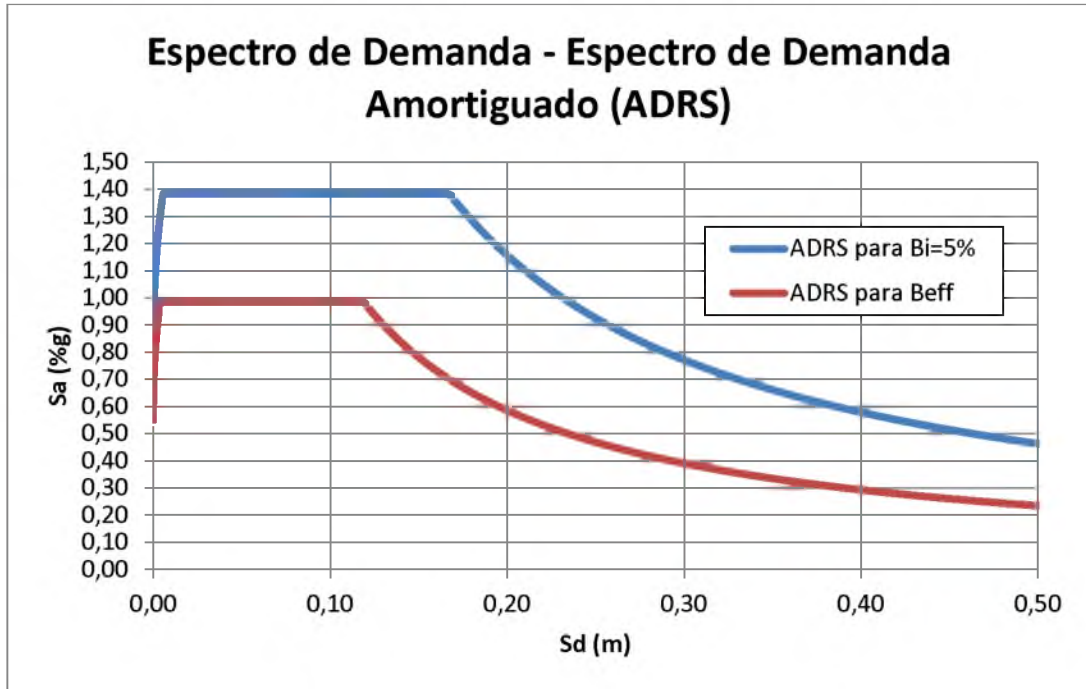


Figura 141. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Muy Raro

Se calculó el factor de modificación, M , por medio de la ecuación presentada en el Capítulo 2.5.3 de este trabajo, como se muestra a continuación:

$$M = \left(\frac{T_{eff}}{T_0}\right)^2 \left(\frac{T_0}{T_{sec}}\right)^2 = \left(\frac{T_{eff}}{T_0}\right)^2 \left(\frac{1 + \alpha(\mu - 1)}{\mu}\right) = 0,95$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento Modificado (MADRS) se obtiene dividiendo las ordenadas de aceleración (ADRS) para el factor M . En la Figura 152 se muestra el Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento Modificado (MADRS)

$$(S_a)_{MADRS} = (S_a)_\beta \times M$$

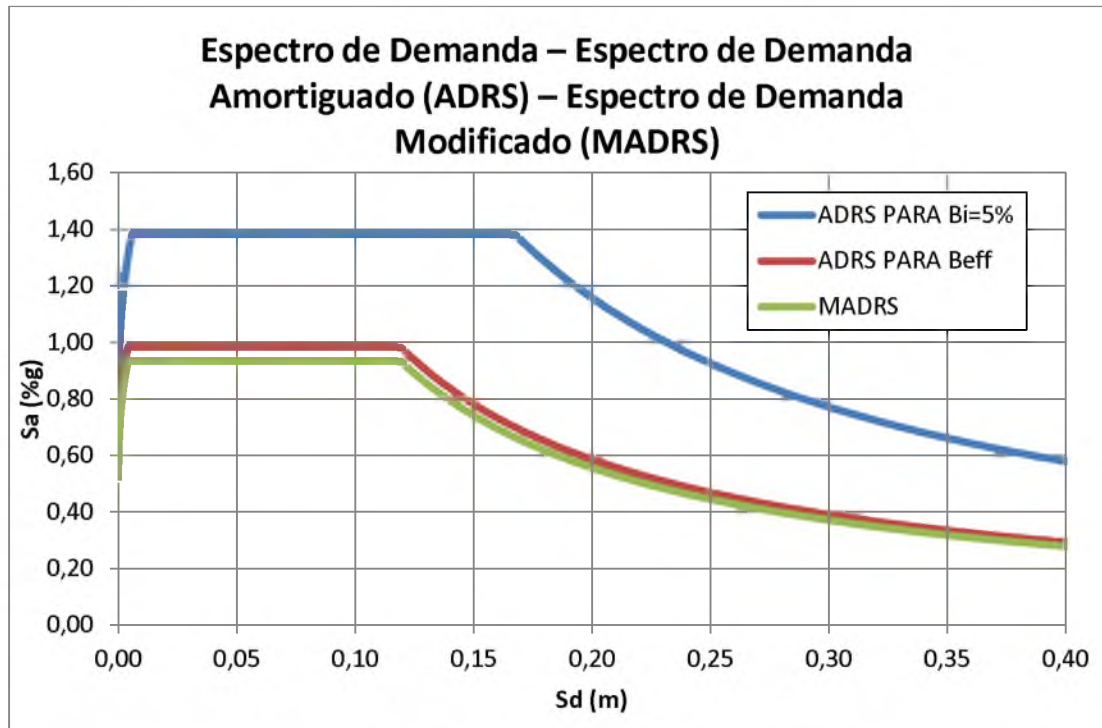


Figura 142. Espectro de demanda Modificado (MADRS) – Sismo Muy Raro

El punto de desempeño (d_i , a_i) se encontrar en la intersección de la Curva de Capacidad con el Espectro de Demanda Aceleración-Desplazamiento Modificado (ver Figura 153)

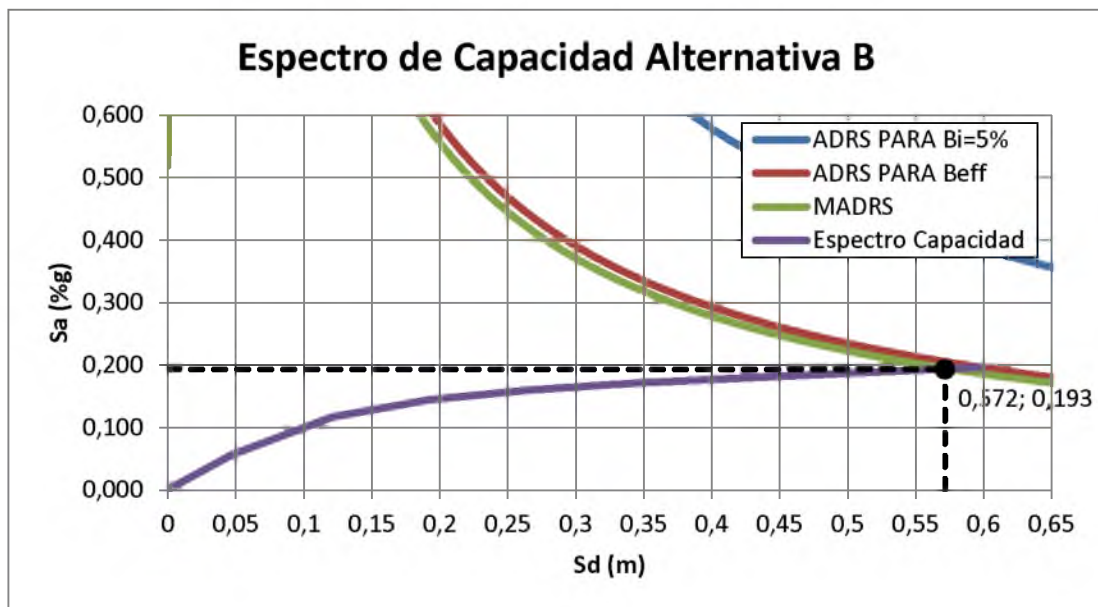


Figura 143. Método Espectro de Capacidad Alternativa B (Sismo Muy Raro) – Sentido X

El máximo desplazamiento esperado y la máxima aceleración esperada tuvieron los siguientes valores:

$$a_i = 0,193 (\%g)$$

$$d_i = 0,572 m$$

Como se muestra a continuación, estos valores deben ser comparados con los asumidos inicialmente; debido a que sus valores son los mismos (o muy cercanos) se acepta como correctos.

$$a_{pi} = 0,193 \rightarrow a_i = 0,193 \quad \underline{OK}$$

$$d_{pi} = 0,57 m \rightarrow d_i = 0,572 m \quad \underline{OK}$$

El desplazamiento espectral y aceleración espectral deben ser convertidos nuevamente a desplazamiento y cortante de la estructura aislada por medio de las ecuaciones.

$$\delta_{max} = d_i \times PF_1 \times \phi_{1,roof} = 65,12 cm$$

$$V_{max} = S_{a_i} \times \alpha_1 \times W = 547,03 Ton$$

4.5.3.4. SISMO MUY RARO. DIRECCIÓN Y

Se transformó el espectro de demanda para el Sismo Raro al formato Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento (ADRS) por medio de la siguiente fórmula:

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} * S_a \text{ (ATC - 40 Pag. 8 - 12)}$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento en formato ADRS para el Sismo Raro se muestra en la Figura 155:

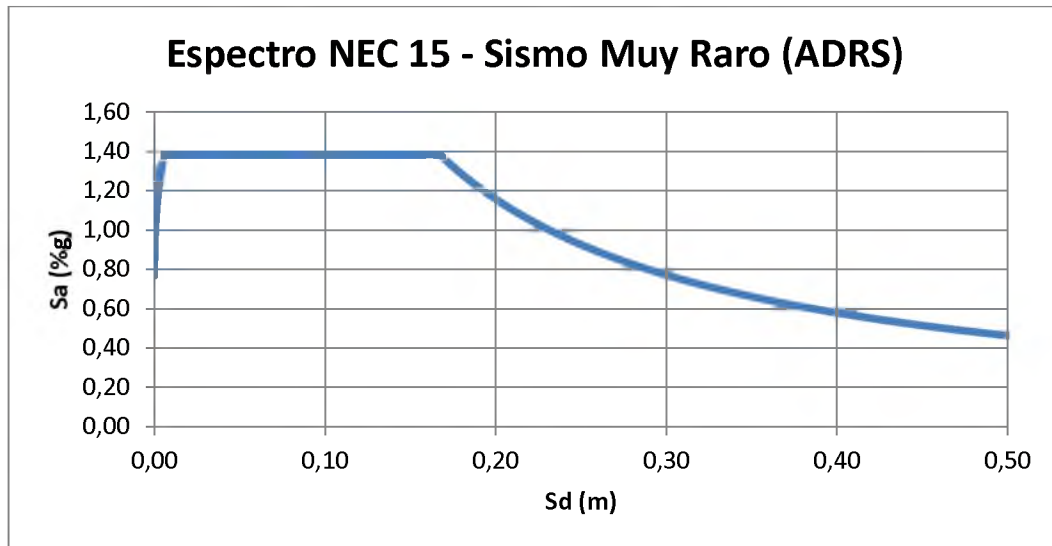


Figura 144. Espectro de Respuesta del Sismo Muy Raro en formato ADRS

La curva de capacidad, obtenida del programa Etabs y mostrada en Capítulo 2.2 de este trabajo, fue transformada también a formato ADRS por medio de las siguientes expresiones:

$$S_{a_i} = \frac{V_i/W}{\alpha_1} \text{ (ATC - 40 Pag. 8 - 12)}$$

$$S_{d_i} = \frac{\delta_i}{PF_1 \times \phi_{1,roof}} \text{ (ATC - 40 Pag. 8 - 12)}$$

α_1 , PF_1 y $\phi_{1,roof}$ fueron obtenidos del análisis modal del programa Etabs y sus valores son los siguientes:

$$\alpha_1 = 0,99$$

$$PF_1 \times \phi_{1,roof} = 1,057$$

En la Figura 156 se muestra la conversión de la Curva de Capacidad al formato ADRS.

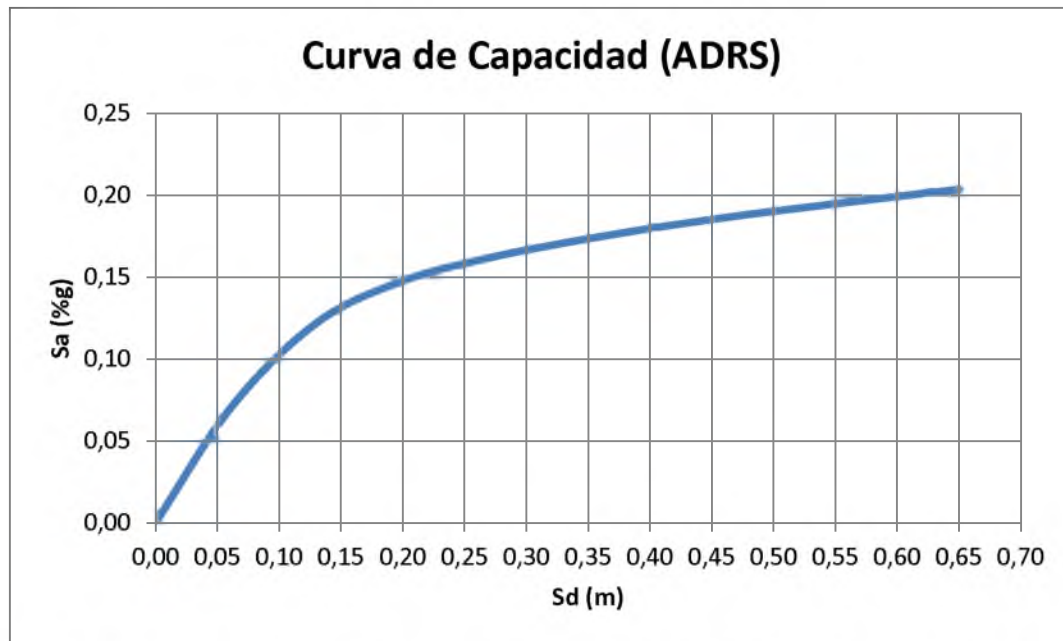


Figura 145. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido Y

De la Curva de Espectro de Capacidad se seleccionó un punto de desempeño el cual deberá ser verificado luego si es correcto o no. En este caso es punto de desempeño (d_{pi}, a_{pi}) tiene los siguientes valores:

$$a_{pi} = 0,195 (\%g)$$

$$d_{pi} = 0,569 m$$

Con el punto de desempeño seleccionado se desarrolló la curva bilineal, ver Capítulo 2.3. Como se muestran en la Figura 157, de la curva bilineal se obtiene el desplazamiento de fluencia, d_y , y la aceleración de fluencia, a_y . Estos valores se muestran a continuación:

$$a_y = 0,127 (\%g)$$

$$d_y = 0,09 m$$

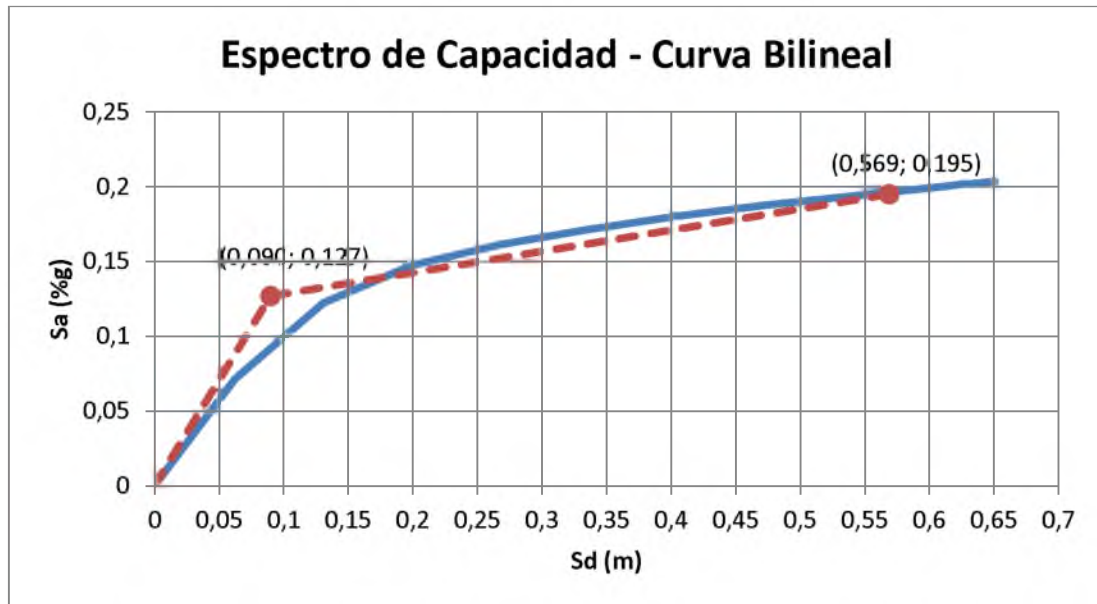


Figura 146. Representación bilineal del Espectro de Capacidad – Sentido Y

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{d_y}{a_y * g}} = 1,688 \text{ seg}$$

Como se indicó en el Capítulo 2.5.3 de este trabajo, la rigidez post-elástica, α , y la ductilidad, μ , se obtienen con las siguientes ecuaciones.

$$\alpha = \frac{\left(\frac{a_{pi} - a_y}{d_{pi} - d_y}\right)}{\left(\frac{a_y}{d_y}\right)} = 0,010$$

$$\mu = \frac{d_{pi}}{d_y} = 6,32$$

Para el cálculo del amortiguamiento efectivo y periodo efectivo se utilizaron ecuaciones aproximadas explicadas en el Capítulo 2.5.3 de este trabajo. Estas expresiones son independientes del tipo de modelo histórico y del valor de alfa.

Para $\mu > 6,5$

$$T_{eff} = \left\{ 0,89 \left[\sqrt{\frac{(\mu - 1)}{1 + 0,05(\mu - 2)}} - 1 \right] + 1 \right\} T_0 = 3,33 \text{ seg}$$

$$\beta_{eff} = 19 \left[\frac{0,64(\mu - 1) - 1}{[0,64(\mu - 1)]^2} \right] \left(\frac{T_{eff}}{T_0} \right)^2 + \beta_0 = 15,70\%$$

El Espectro de Demanda Amortiguado, $(S_a)_\beta$ vs $(S_d)_\beta$, se obtiene a partir del coeficiente de amortiguamiento, B, calculado a continuación:

$$B = \frac{4}{5,6 - \ln \beta_{eff}(\text{en } \%)} = 1,405$$

El Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS se obtiene con las siguientes ecuaciones. En la Figura 158 se muestra el Espectro de Demanda y el Espectro de Demanda Amortiguado en formato ADRS para este caso.

$$(S_a)_\beta = \frac{(S_a)_0}{B(\beta_{eff})}$$

$$(S_d)_\beta = \frac{T^2}{4\pi^2} * (S_a)_\beta$$

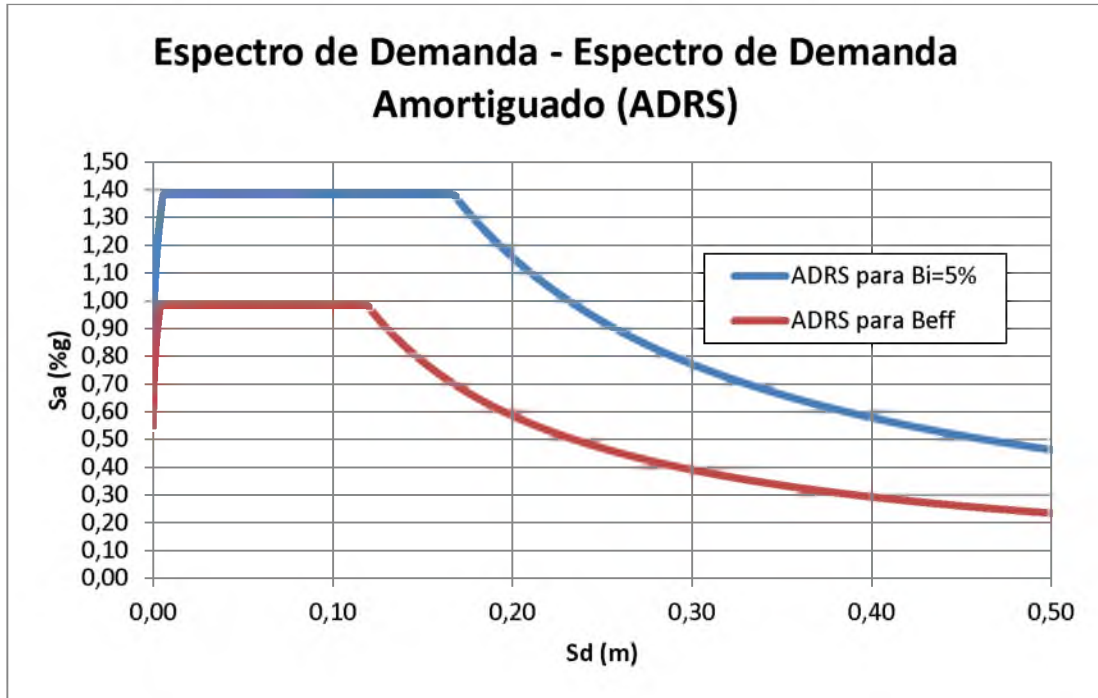


Figura 147. Espectro de Demanda – Espectro de Demanda Amortiguado (ADRS) – Sismo Muy Raro

Se calculó el factor de modificación, M , por medio de la ecuación presentada en el Capítulo 2.5.3 de este trabajo, como se muestra a continuación:

$$M = \left(\frac{T_{eff}}{T_0}\right)^2 \left(\frac{T_0}{T_{sec}}\right)^2 = \left(\frac{T_{eff}}{T_0}\right)^2 \left(\frac{1 + \alpha(\mu - 1)}{\mu}\right) = 0,94$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento Modificado (MADRS) se obtiene dividiendo las ordenadas de aceleración (ADRS) para el factor M . En la Figura 159 se muestra el Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento Modificado (MADRS).

$$(S_a)_{MADRS} = (S_a)_\beta \times M$$

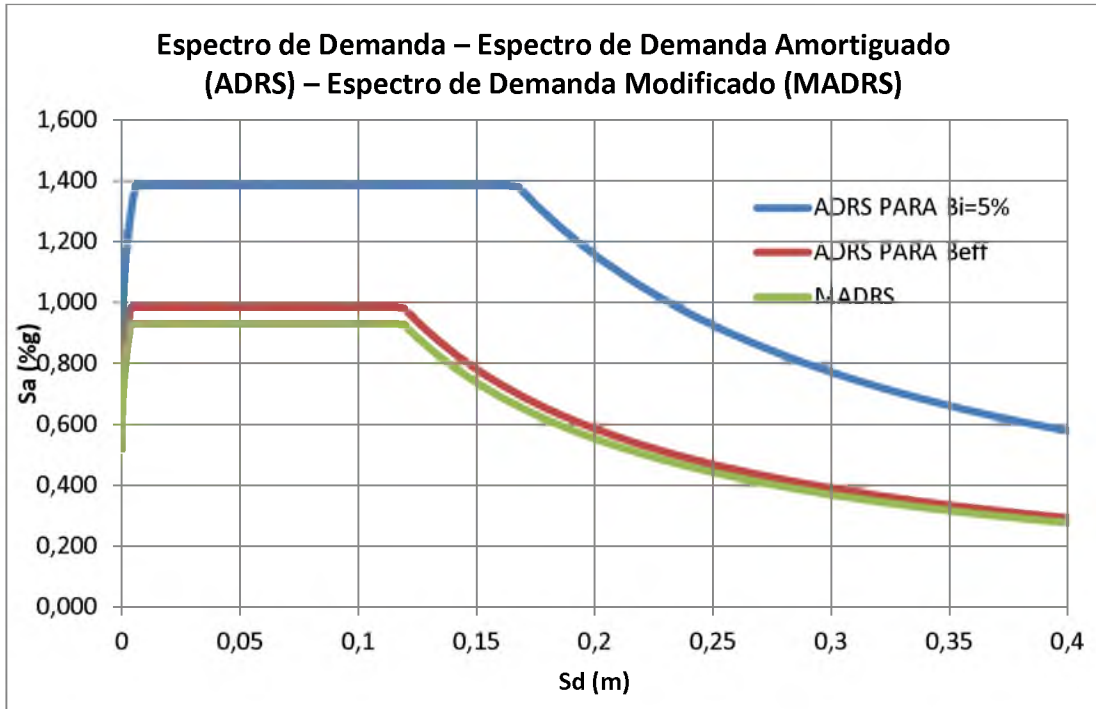


Figura 148. Espectro de demanda Modificado (MADRS) – Sismo Muy Raro

El punto de desempeño (d_i, a_i) se encontrar en la intersección de la Curva de Capacidad con el Espectro de Demanda Aceleración-Desplazamiento Modificado (ver Figura 160).

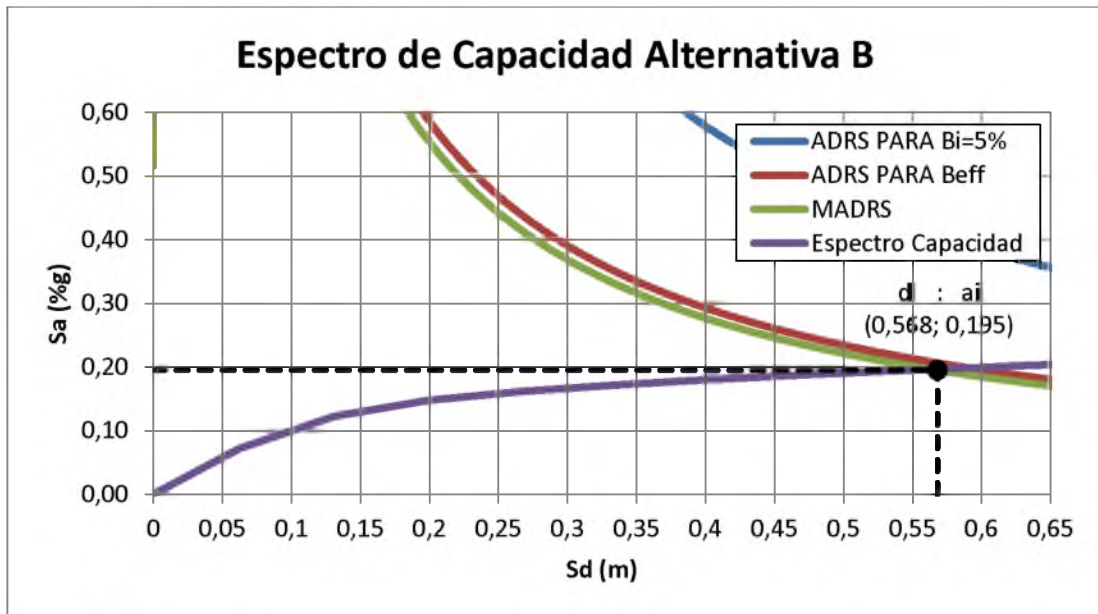


Figura 149. Método Espectro de Capacidad Alternativa B (Sismo Muy Raro) – Sentido

Y

El máximo desplazamiento esperado y la máxima aceleración esperada tuvieron los siguientes valores:

$$a_i = 0,195 (\%g)$$

$$d_i = 0,568 m$$

Como se muestra a continuación, estos valores deben ser comparados con los asumidos inicialmente; debido a que sus valores son los mismos (o muy cercanos) se acepta como correctos.

$$a_{pi} = 0,195 \rightarrow a_i = 0,195 \quad \underline{OK}$$

$$d_{pi} = 0,569 m \rightarrow d_i = 0,568 m \quad \underline{OK}$$

El desplazamiento espectral y aceleración espectral deben ser convertidos nuevamente a desplazamiento de la estructura por medio de las ecuaciones

$$\delta_{max} = d_i \times PF_1 \times \phi_{1,roof} = 60 cm$$

$$V_{max} = S_{a_i} \times \alpha_1 \times W = 554,50 Ton$$

4.5.4. MÉTODO ESPECTRO DE CAPACIDAD. ALTERNATIVA C.

En el Capítulo 2.5.4 de este trabajo se explica detalladamente la aplicación del Método Espectro de Capacidad Alternativa C especificado en el FEMA 440. A continuación se muestran los resultados obtenidos del uso de este método para hallar el punto de desempeño del Edificio de la Facultad de Ingeniería tanto para el sismo raro como para el sismo muy raro.

Algunos de los cálculos realizados en este método son iguales a la Alternativa A del Método Espectro de Capacidad. Estos cálculos se mostrarán nuevamente para que su desarrollo sea más claro.

4.5.4.1. SISMO RARO. DIRECCIÓN X

Se transformó el espectro de demanda para el Sismo Raro al formato Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento (ADRS) por medio de la siguiente fórmula:

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} * S_a \text{ (ATC - 40 Pag. 8 - 12)}$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento en formato ADRS para el Sismo Raro se muestra en la Figura 162:

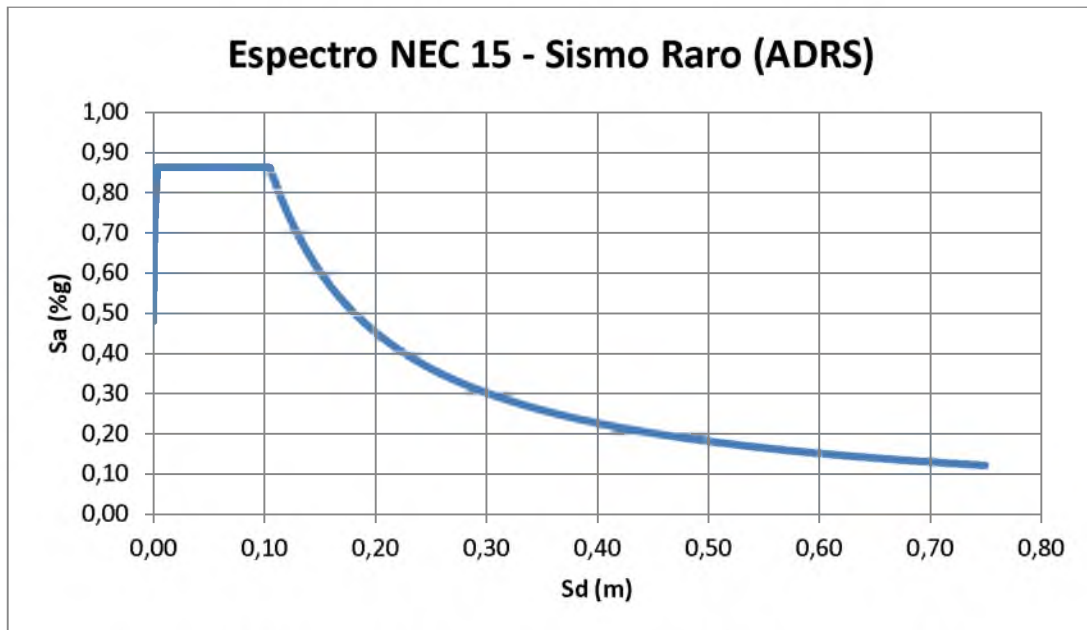


Figura 150. Espectro de Respuesta del Sismo Raro en formato ADRS

La curva de capacidad, obtenida del programa Etabs y mostrada en el Capítulo 4.4 de este trabajo, fue transformada también a formato ADRS por medio de las siguientes expresiones:

$$S_{a_i} = \frac{V_i/W}{\alpha_1} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

$$S_{d_i} = \frac{\delta_i}{PF_1 \times \phi_{1,roof}} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

α_1 , PF_1 y $\phi_{1,roof}$ fueron obtenidos del análisis modal del programa Etabs y sus valores son los siguientes:

$$\alpha_1 = 0,988$$

$$PF_1 \times \phi_{1,roof} = 1,14$$

En la Figura 163 se muestra la conversión de la Curva de Capacidad al formato ADRS.

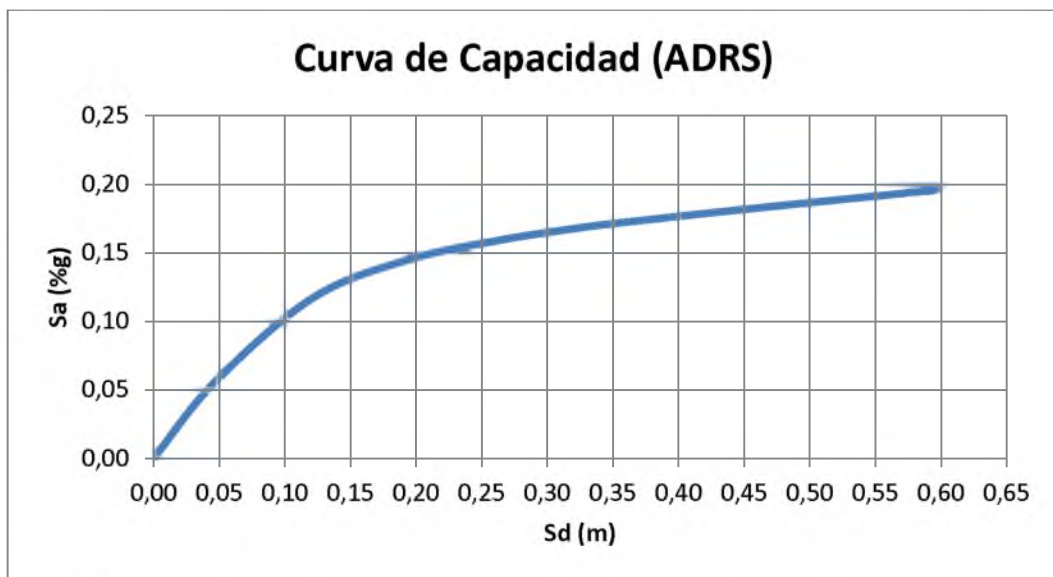


Figura 151. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido

X

Se asumen varios valores de ductilidad para los cuales se calcula el periodo efectivo, T_{eff} , el amortiguamiento efectivo, β_{eff} , el coeficiente M, y el periodo secante, T_{sec} , por medio de las ecuaciones mencionadas en el Capítulo 2.5.4.

Se debe de realizar la representación bilineal de la Curva de Espectro de Capacidad para cada ductilidad asumida (ver Capítulo 2.3).

A continuación se muestra una tabla con los valores de periodo efectivo, amortiguamiento efectivo, coeficiente M y periodo secante obtenidos para las ductilidades estudiadas.

Ductilidad μ	Periodo Efectivo T_{eff}	Amortiguamiento Efectivo β_{eff}	Coeficiente M	Periodo Secante T_{sec}
1	1,80	0	1	1,89
2	2,20	3,80	0,98	2,22
3	2,72	10,80	1,19	2,50
4	2,92	14,96	1,11	2,77
5	3,07	15,28	0,99	3,07
12	4,22	14,71	0,82	4,65

Tabla 12. Periodos efectivos, Amortiguamientos efectivos, Coeficientes M Y Periodo secantes para diferentes valores de ductilidad (Alternativa C).

Con los valores mostrados en la Tabla 12 se grafican los Espectros de Demanda Modificados (MDRAS) para cada uno de las ductilidades estudiadas, como se muestra en la Figura 164.

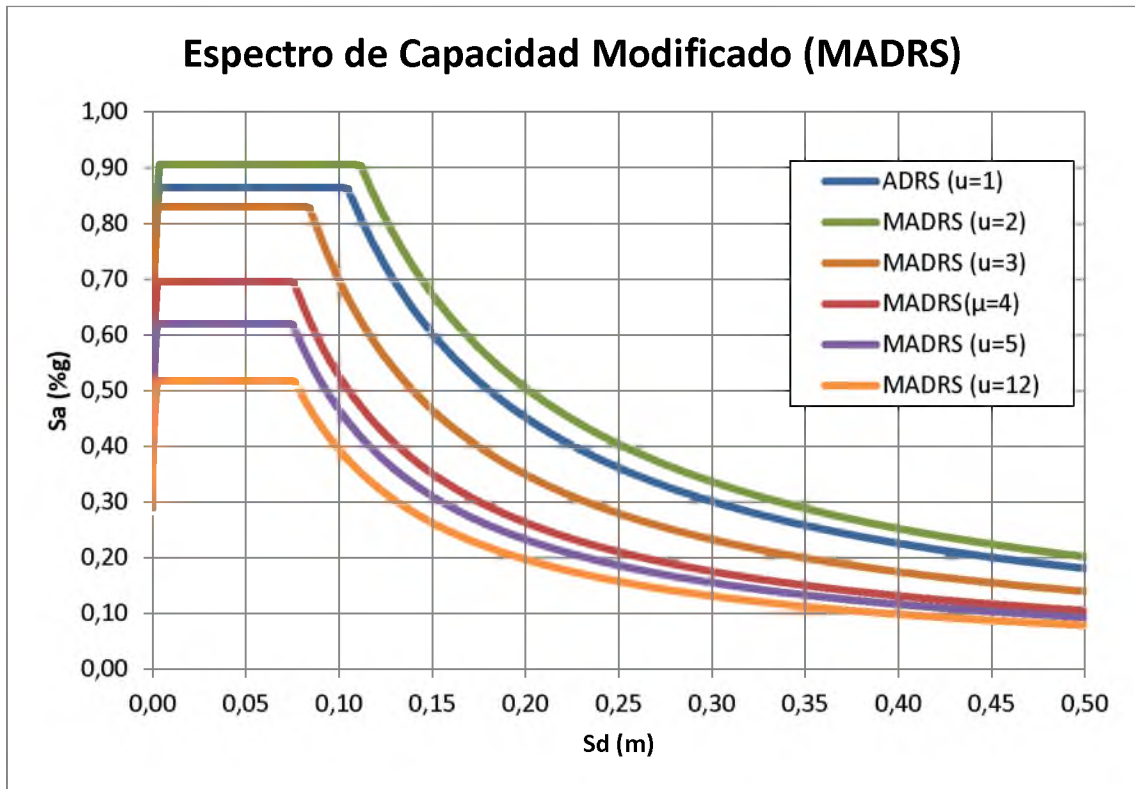


Figura 152. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) para diferentes valores de ductilidad.

Si se trazan líneas rectas al origen, cada una de estas representara un periodo secante. El posible punto de desempeño se encontrará en la intersección del periodo secante radial, T_{sec} , con el MADRS.

En la Figura 165 se muestra la intersección del periodo secante radial con el correspondiente Espectro de Demanda Modificado (MADRS)

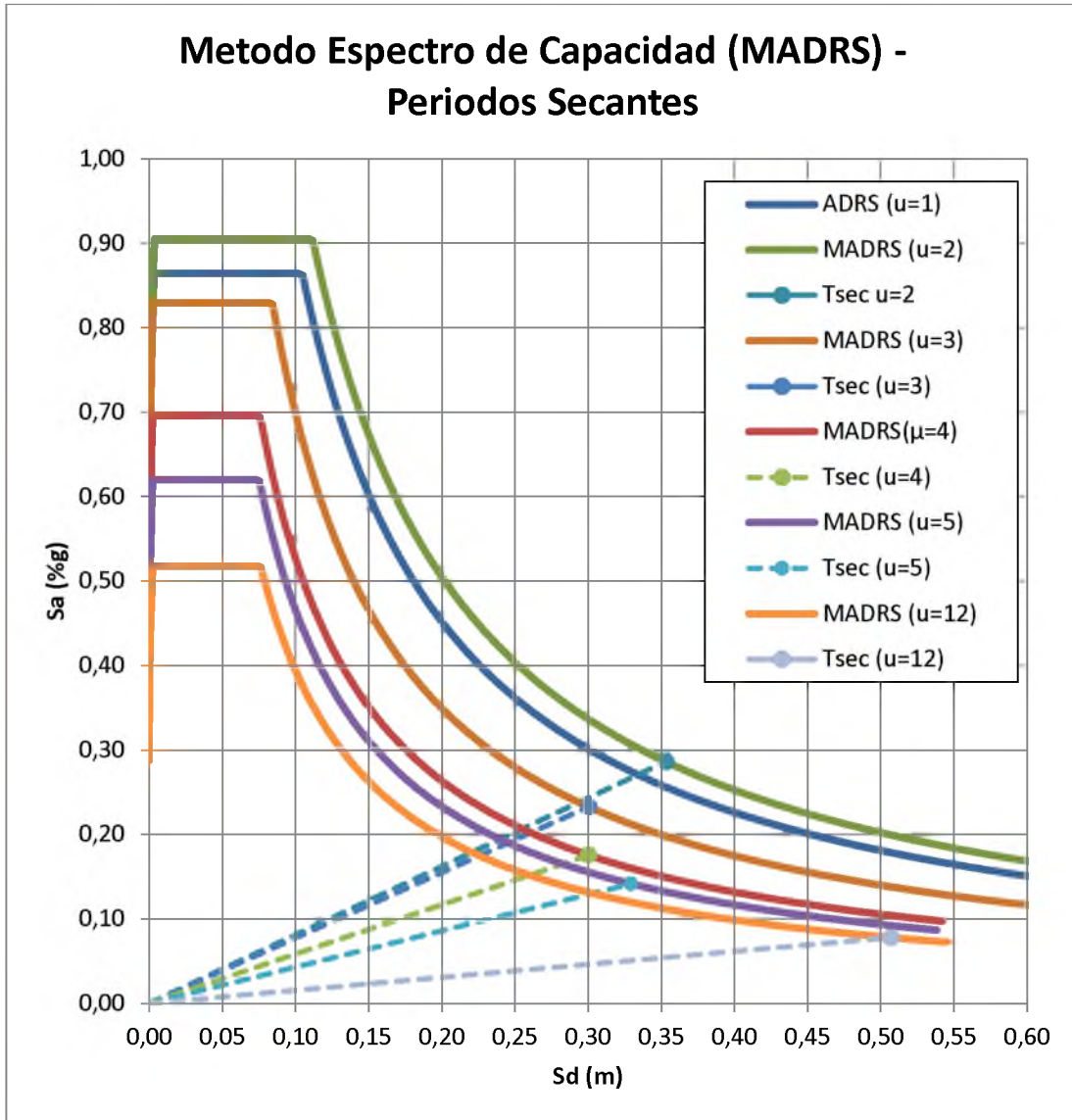


Figura 153. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) y Periodos secantes para diferentes valores de ductilidad.

El actual punto de desempeño deberá encontrarse sobre la línea que une la intersección de los periodos secantes con el Espectro de Capacidad Modificado correspondiente y sobre la Curva del Espectro de Capacidad. La intersección entre estas dos curvas definirá el punto de desempeño.

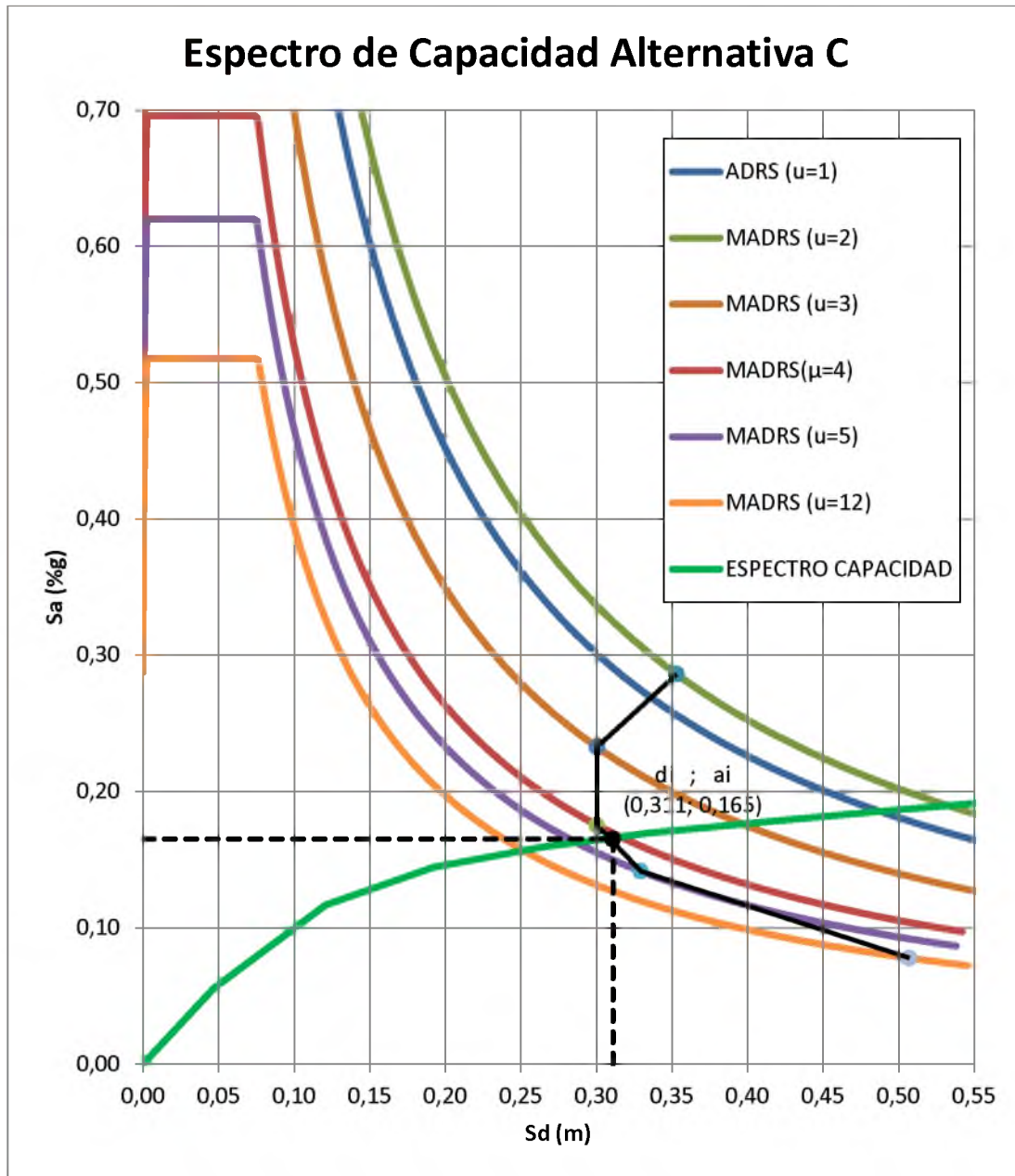


Figura 154. Método Espectro de Capacidad Alternativa C (Sismo raro) – Sentido X

De la Figura 166 se obtiene el máximo desplazamiento esperado y la máxima aceleración esperada, las cuales tuvieron los siguientes valores:

$$a_i = 0,165 (\%g)$$

$$d_i = 0,311 m$$

El desplazamiento espectral y aceleración espectral deben ser convertidos nuevamente a desplazamiento y cortante de la estructura aislada por medio de la ecuaciones.

$$\delta_{max} = d_i \times PF_1 \times \phi_{1,roof} = 35,43 \text{ cm}$$

$$V_{max} = S_{a_i} \times \alpha_1 \times W = 467,67 \text{ Ton}$$

4.5.4.2. SISMO RARO. DIRECCIÓN Y

Se transformó el espectro de demanda para el Sismo Raro al formato Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento (ADRS) por medio de la siguiente fórmula:

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} * S_a \text{ (ATC - 40 Pag. 8 - 12)}$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento en formato ADRS para el Sismo Raro se muestra en la Figura 168:

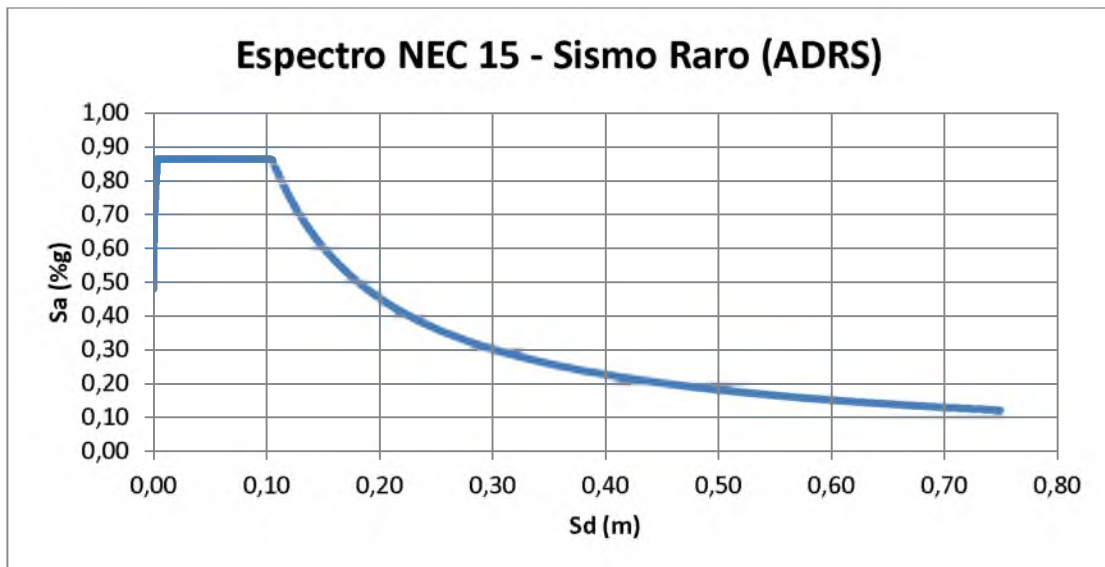


Figura 155. Espectro de Respuesta del Sismo Raro en formato ADRS

La curva de capacidad, obtenida del programa Etabs y mostrada en Capitulo 4.4 de este trabajo, fue transformada también a formato ADRS por medio de las siguientes expresiones:

$$S_{a_i} = \frac{V_i/W}{\alpha_1} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

$$S_{d_i} = \frac{\delta_i}{PF_1 \times \phi_{1,roof}} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

α_1 , PF_1 y $\phi_{1,roof}$ fueron obtenidos del análisis modal del programa Etabs y sus valores son los siguientes:

$$\alpha_1 = 0,99$$

$$PF_1 \times \phi_{1,roof} = 1,057$$

En la Figura 169 se muestra la conversión de la Curva de Capacidad al formato ADRS.

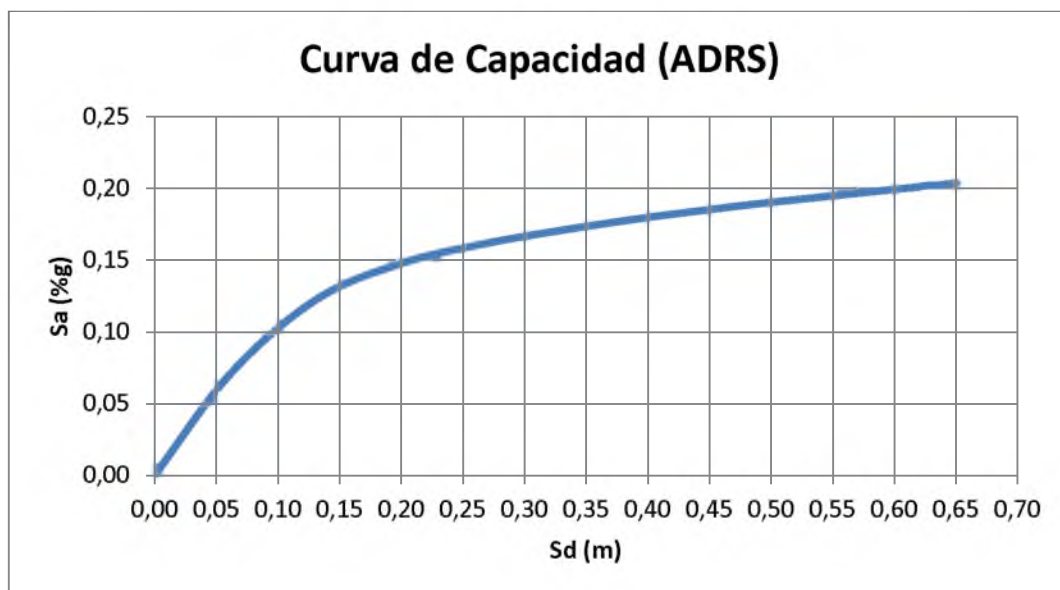


Figura 156. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido

Y

Se asumen varios valores de ductilidad para los cuales se calcula el periodo efectivo, T_{eff} , el amortiguamiento efectivo, β_{eff} , el coeficiente M, y el periodo secante, T_{sec} , por medio de las ecuaciones mencionadas en el Capítulo 2.5.4).

Se debe de realizar la representación bilineal de la Curva de Espectro de Capacidad para cada ductilidad asumida (ver Capitulo 2.3).

A continuación se muestra una tabla con los valores de periodo efectivo, amortiguamiento efectivo, coeficiente M y periodo secante obtenidos para las ductilidades estudiadas.

Ductilidad μ	Periodo Efectivo T_{eff}	Amortiguamiento Efectivo β_{eff}	Coficiente M	Periodo Secante T_{sec}
1	1,78	0	1	1,78
2	2,19	3,80	0,98	2,21
3	2,70	10,80	1,16	2,51
4	2,94	14,96	1,08	2,83
5	3,17	15,28	0,99	3,17
6	3,32	15,15	0,97	3,38

Tabla 13. Periodos efectivos, Amortiguamientos efectivos, Coeficientes M Y Periodo secantes para diferentes valores de ductilidad (Alternativa C).

Con los valores mostrados en la Tabla 13 se grafican los Espectros de Demanda Modificados (MDRAS) para cada uno de las ductilidades estudiadas, como se muestra en la Figura 170.

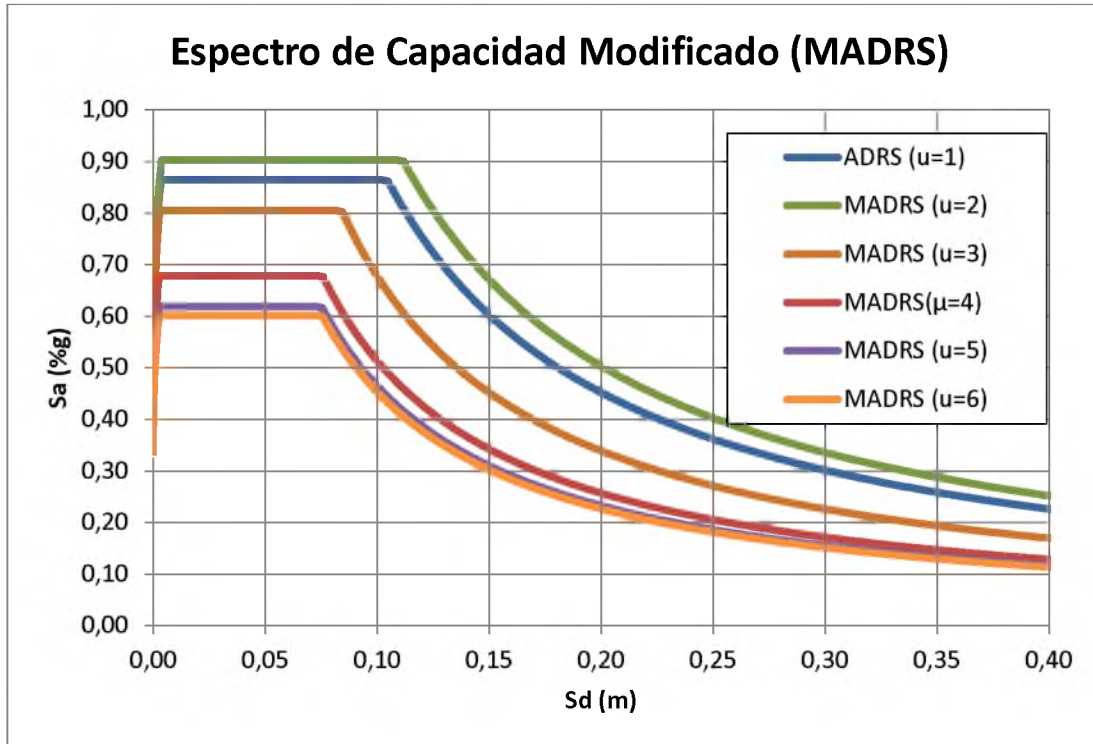


Figura 157. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) para diferentes valores de ductilidad.

Si se trazan líneas rectas al origen, cada una de estas representara un periodo secante. El posible punto de desempeño se encontrará en la intersección del periodo secante radial, T_{sec} , con el MADRS.

En la Figura 171 se muestra la intersección del periodo secante radial con el correspondiente Espectro de Demanda Modificado (MADRS)

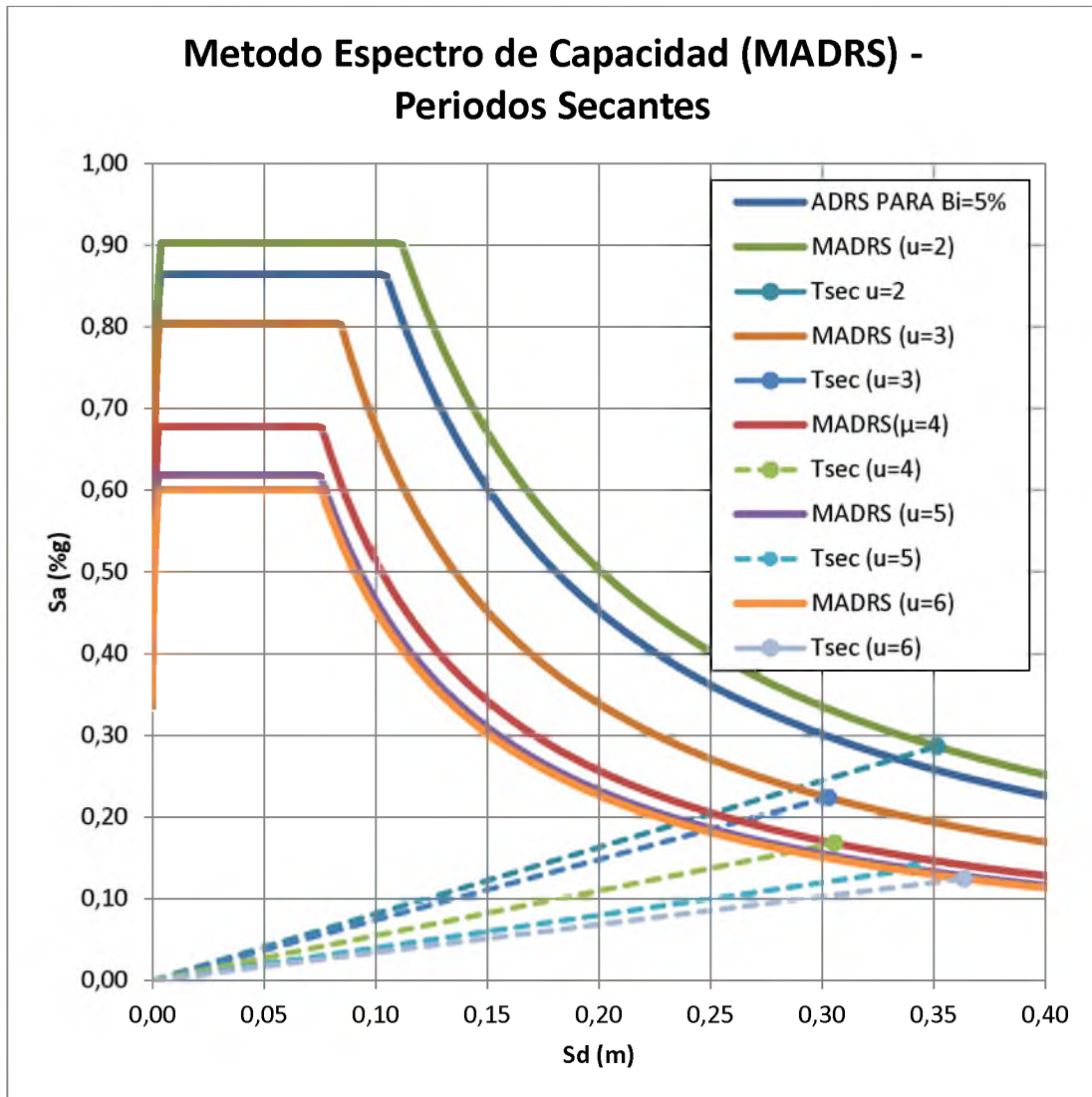


Figura 158. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) y Periodos secantes para diferentes valores de ductilidad.

El actual punto de desempeño deberá encontrarse sobre la línea que une la intersección de los periodos secantes con el Espectro de Capacidad Modificado correspondiente y sobre la Curva del Espectro de Capacidad. La intersección entre estas dos curvas definirá el punto de desempeño.

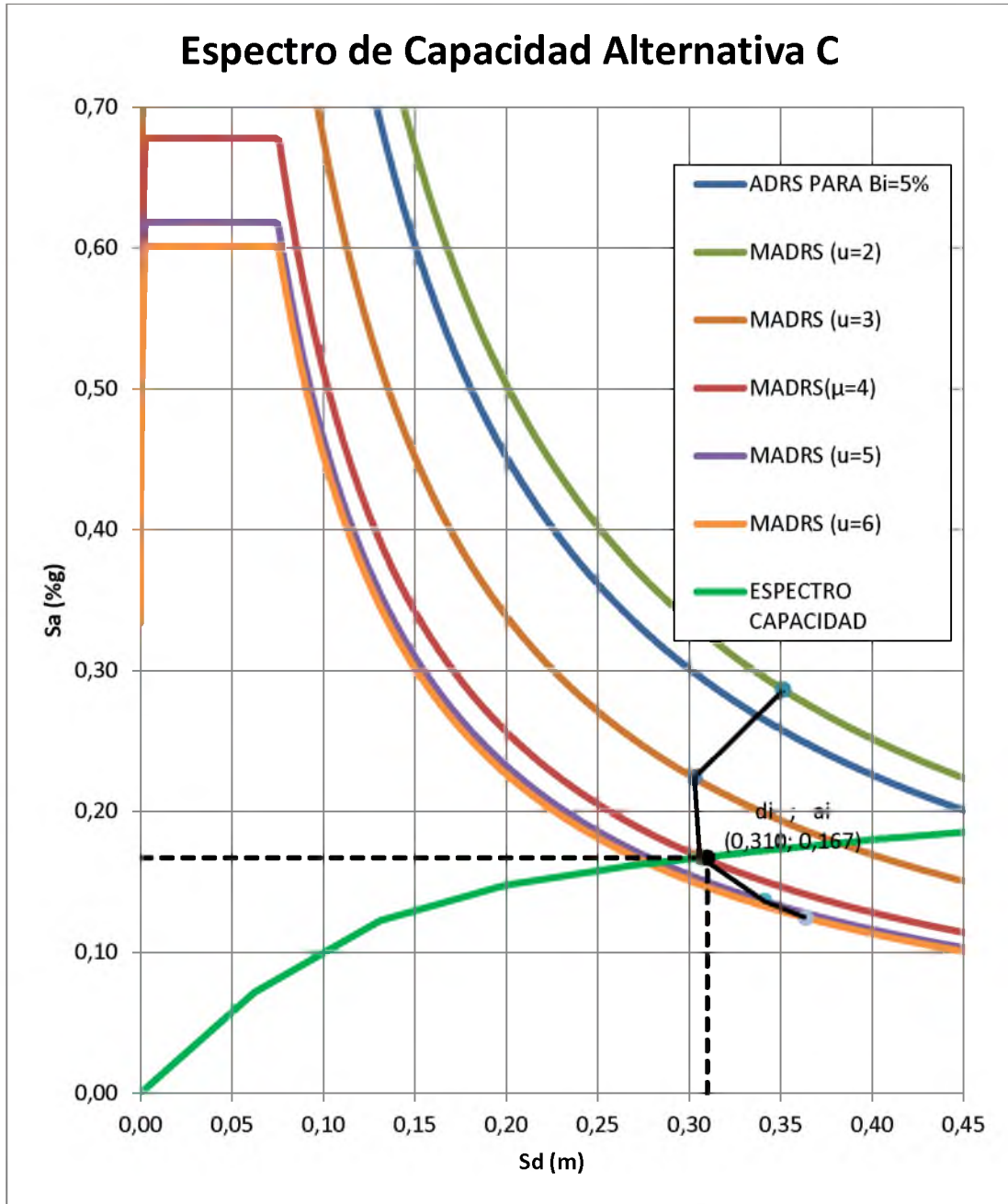


Figura 159. Método Espectro de Capacidad Alternativa C (Sismo raro) – Sentido Y

De la Figura 172 se obtiene el máximo desplazamiento esperado y la máxima aceleración esperada, las cuales tuvieron los siguientes valores:

$$a_i = 0,310 (\%g)$$

$$d_i = 0,167 m$$

El desplazamiento espectral debe ser convertido nuevamente a desplazamiento de la estructura por medio de las ecuaciones.

$$\delta_{max} = d_i \times PF_1 \times \phi_{1,roof} = 32,78 \text{ cm}$$

$$V_{max} = S_{a_i} \times \alpha_1 \times W = 474,87 \text{ Ton}$$

4.5.4.3. SISMO MUY RARO. DIRECCIÓN X

Se transformó el espectro de demanda para el Sismo Raro al formato Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento (ADRS) por medio de la siguiente fórmula:

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} * S_a \text{ (ATC - 40 Pag. 8 - 12)}$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento en formato ADRS para el Sismo Raro se muestra en la Figura 174:

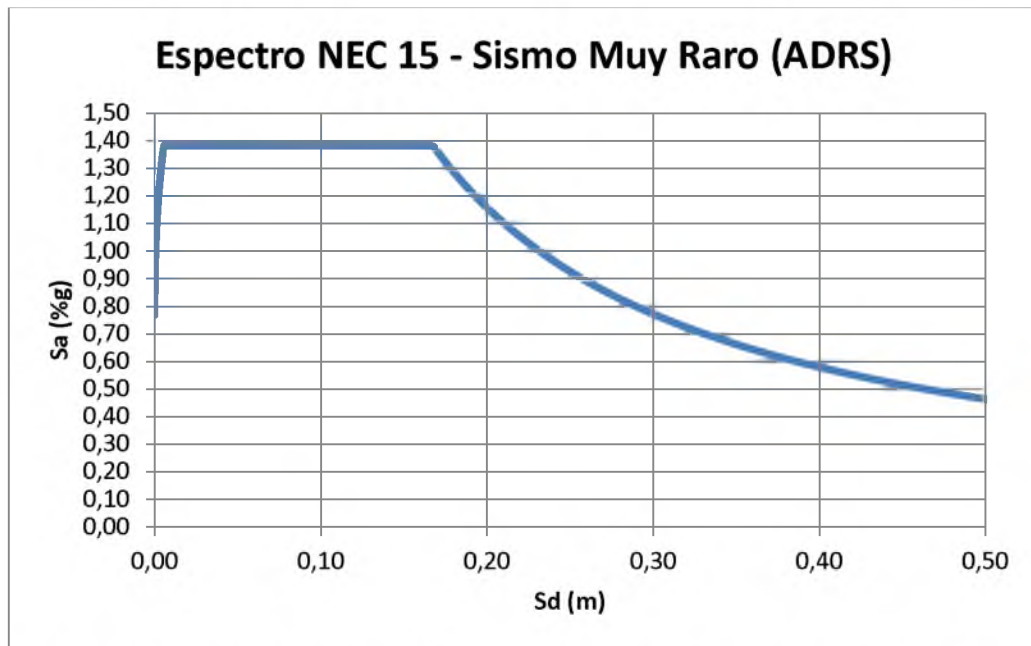


Figura 160. Espectro de Respuesta del Sismo Muy Raro en formato ADRS

La curva de capacidad, obtenida del programa Etabs y mostrada en el Capítulo 2.2 de este trabajo, fue transformada también a formato ADRS por medio de las siguientes expresiones:

$$S_{a_i} = \frac{V_i/W}{\alpha_1} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

$$S_{d_i} = \frac{\delta_i}{PF_1 \times \phi_{1,roof}} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

α_1 , PF_1 y $\phi_{1,roof}$ fueron obtenidos del análisis modal del programa Etabs y sus valores son los siguientes:

$$\alpha_1 = 0,988$$

$$PF_1 \times \phi_{1,roof} = 1,14$$

En la Figura 175 se muestra la conversión de la Curva de Capacidad al formato ADRS.

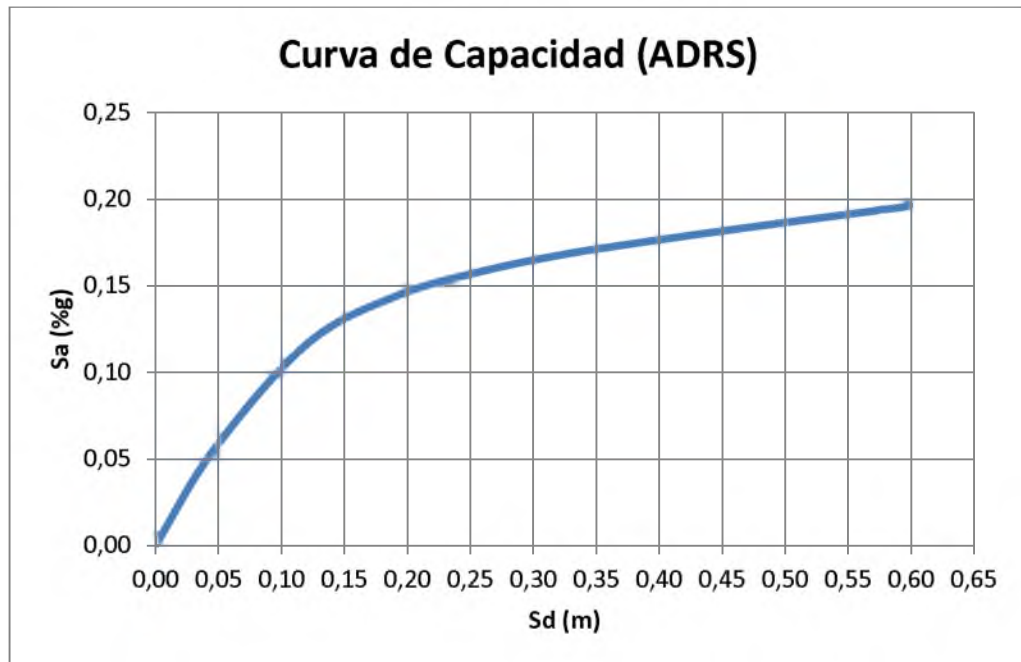


Figura 161. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido

X

Se asumen varios valores de ductilidad para los cuales se calcula el periodo efectivo, T_{eff} , el amortiguamiento efectivo, β_{eff} , el coeficiente M, y el periodo secante, T_{sec} , por medio de las ecuaciones mencionadas en el Capítulo 2.5.4.

Se debe de realizar la representación bilineal de la Curva de Espectro de Capacidad para cada ductilidad asumida (ver Capitulo 2.3).

A continuación se muestra una tabla con los valores de periodo efectivo, amortiguamiento efectivo, coeficiente M y periodo secante obtenidos para las ductilidades estudiadas.

Ductilidad μ	Periodo Efectivo T_{eff}	Amortiguamiento Efectivo β_{eff}	Coeficiente M	Periodo Secante T_{sec}
1	1,80	0	1	1,89
2	2,20	3,80	0,98	2,22
3	2,72	10,80	1,19	2,50
4	2,92	14,96	1,11	2,77
5	3,07	15,28	0,99	3,07
7	3,42	15,53	0,95	3,50

Tabla 14. Periodos efectivos, Amortiguamientos efectivos, Coeficientes M Y Periodo secantes para diferentes valores de ductilidad (Alternativa C).

Con los valores mostrados en la Tabla 14 se grafican los Espectros de Demanda Modificados (MDRAS) para cada uno de las ductilidades estudiadas, como se muestra en la Figura 176.

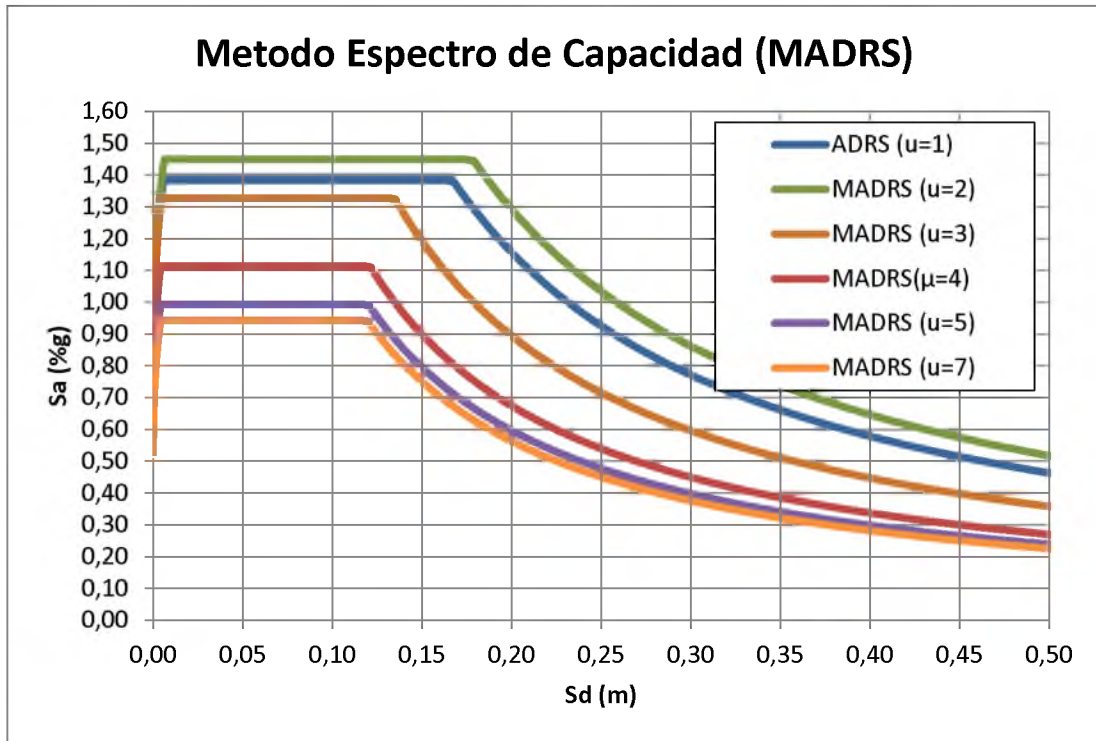


Figura 162. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) para diferentes valores de ductilidad.

Si se trazan líneas rectas al origen, cada una de estas representara un periodo secante. El posible punto de desempeño se encontrará en la intersección del periodo secante radial, T_{sec} , con el MADRS.

En la Figura 177 se muestra la intersección del periodo secante radial con el correspondiente Espectro de Demanda Modificado (MADRS)

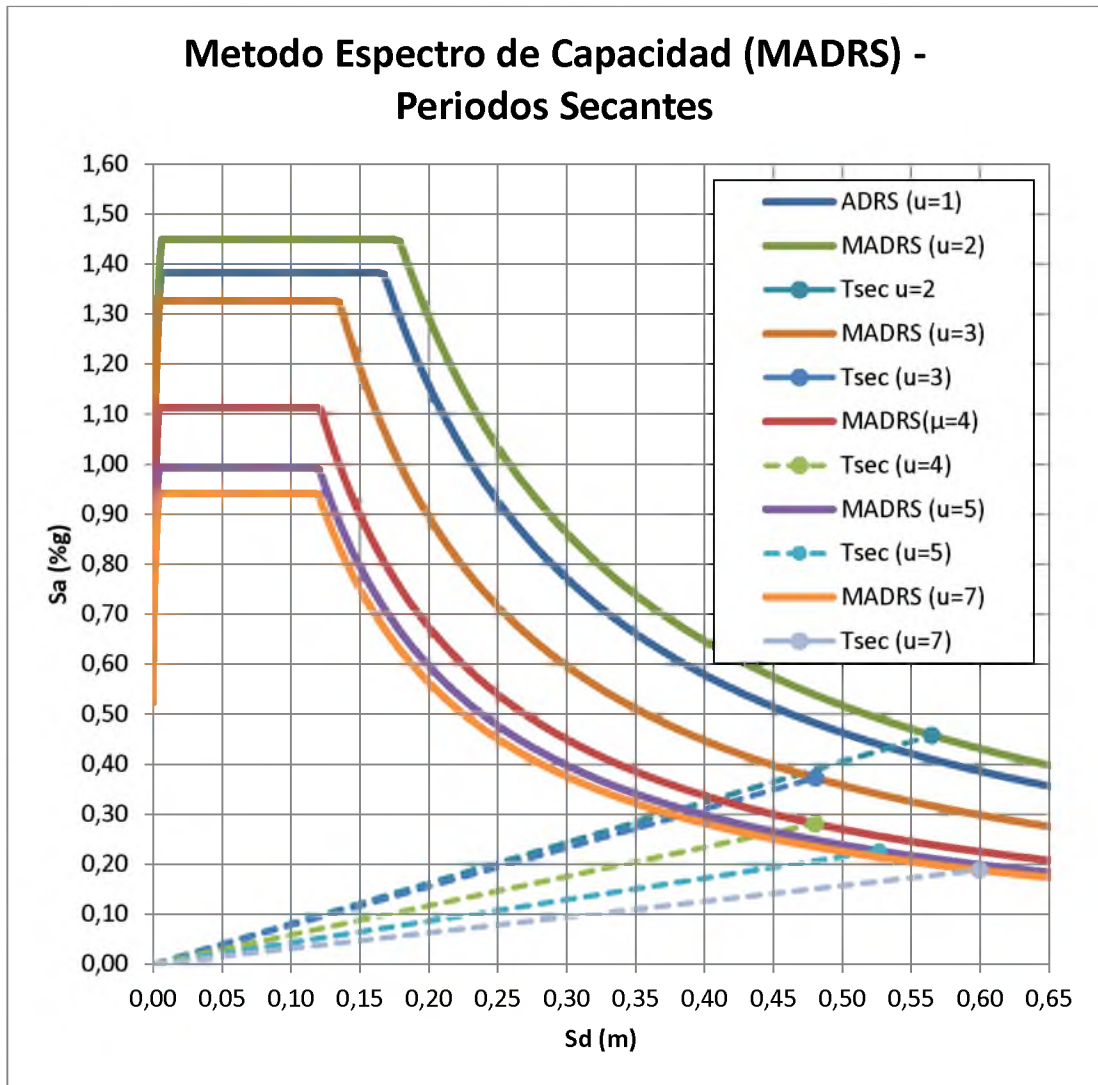


Figura 163. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) y Periodos secantes para diferentes valores de ductilidad.

El actual punto de desempeño deberá encontrarse sobre la línea que une la intersección de los periodos secantes con el Espectro de Capacidad Modificado correspondiente y sobre la Curva del Espectro de Capacidad. La intersección entre estas dos curvas definirá el punto de desempeño.

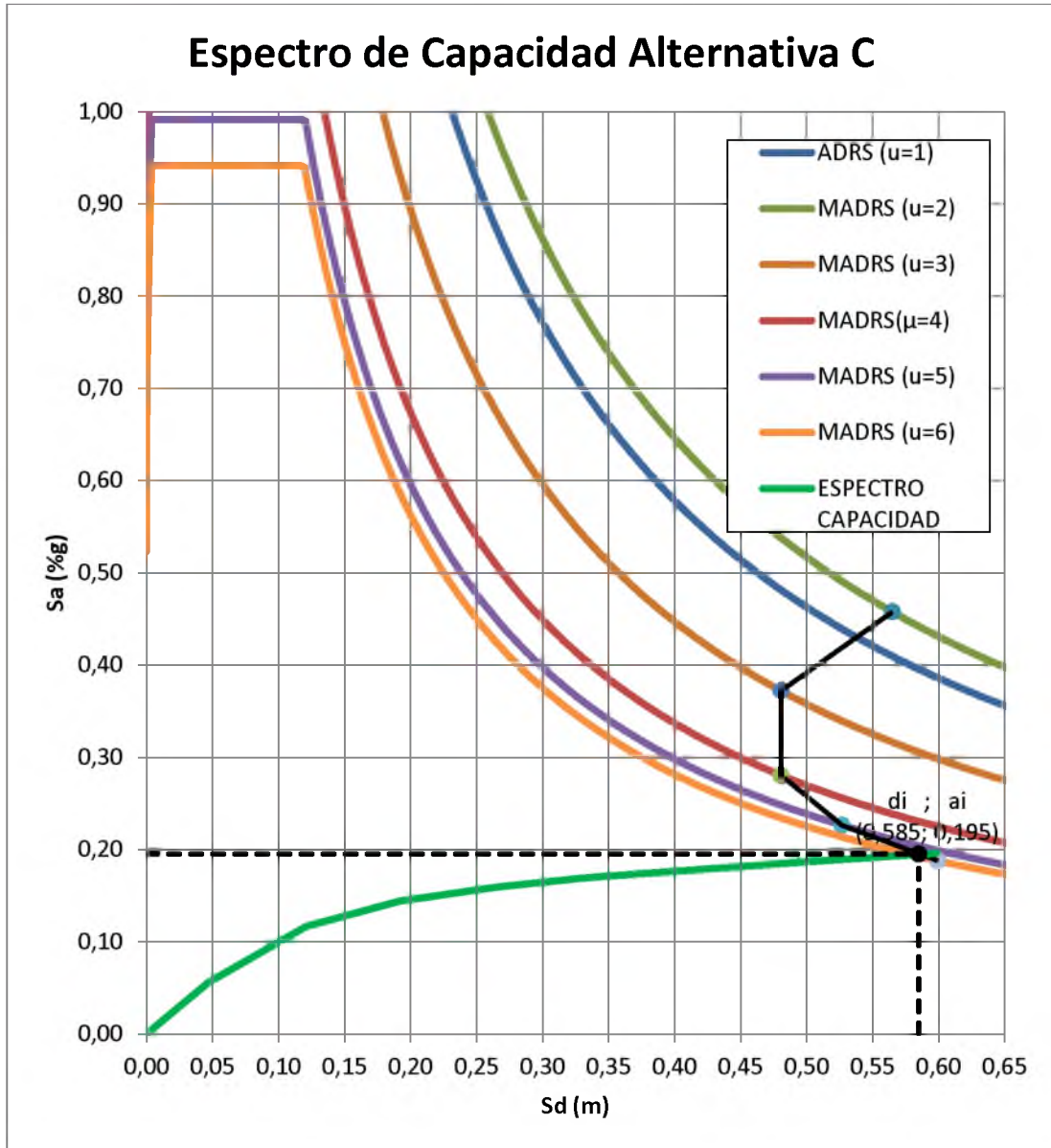


Figura 164. Método Espectro de Capacidad Alternativa C (Sismo Muy Raro) – Sentido

X

De la Figura 178 se obtiene el máximo desplazamiento esperado y la máxima aceleración esperada, las cuales tuvieron los siguientes valores:

$$a_i = 0,195 (\%g)$$

$$d_i = 0,585 m$$

El desplazamiento espectral y aceleraciones espectrales deben ser convertidos nuevamente a desplazamiento de la estructura por medio de las ecuaciones.

$$\delta_{max} = d_i \times PF_1 \times \phi_{1,roof} = 66,65 \text{ cm}$$

$$V_{max} = S_{a_i} \times \alpha_1 \times W = 552,70 \text{ Ton}$$

4.5.4.4. SISMO MUY RARO. DIRECCIÓN Y

Se transformó el espectro de demanda para el Sismo Raro al formato Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento (ADRS) por medio de la siguiente fórmula:

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} * S_a \text{ (ATC - 40 Pag. 8 - 12)}$$

El Espectro de Respuesta Aceleración-Desplazamiento en formato ADRS para el Sismo Raro se muestra en la Figura 180:

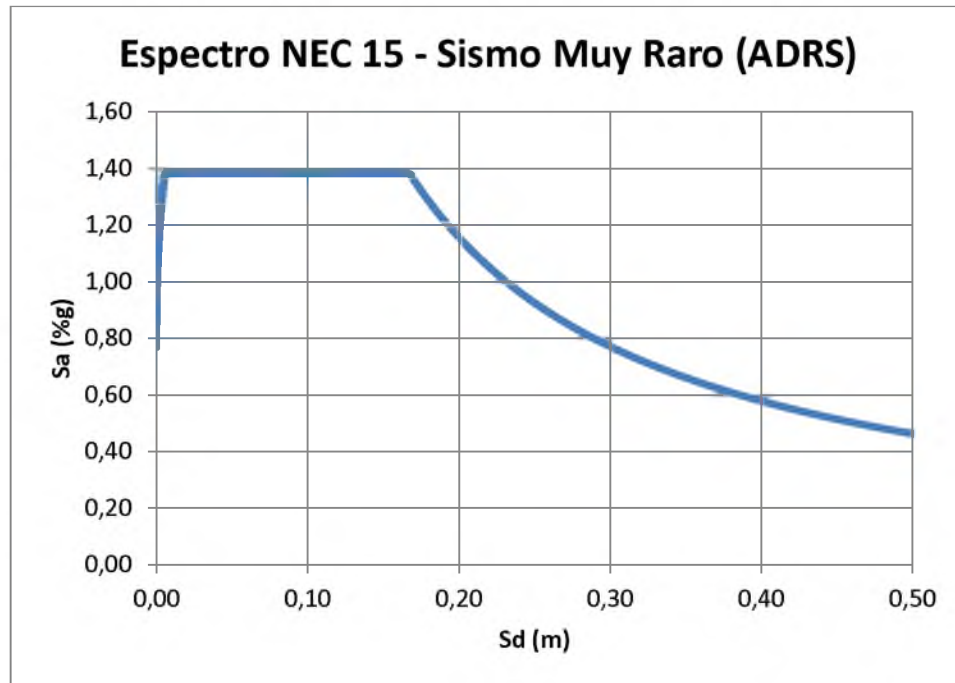


Figura 165. Espectro de Respuesta del Sismo Muy Raro en formato ADRS

La curva de capacidad, obtenida del programa Etabs y mostrada en Capítulo 2.2 de este trabajo, fue transformada también a formato ADRS por medio de las siguientes expresiones:

$$S_{a_i} = \frac{V_i/W}{\alpha_1} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

$$S_{d_i} = \frac{\delta_i}{PF_1 \times \phi_{1,roof}} \quad (ATC - 40 \text{ Pag. } 8 - 12)$$

α_1 , PF_1 y $\phi_{1,roof}$ fueron obtenidos del análisis modal del programa Etabs y sus valores son los siguientes:

$$\alpha_1 = 0,99$$

$$PF_1 \times \phi_{1,roof} = 1,057$$

En la Figura 181 se muestra la conversión de la Curva de Capacidad al formato ADRS.

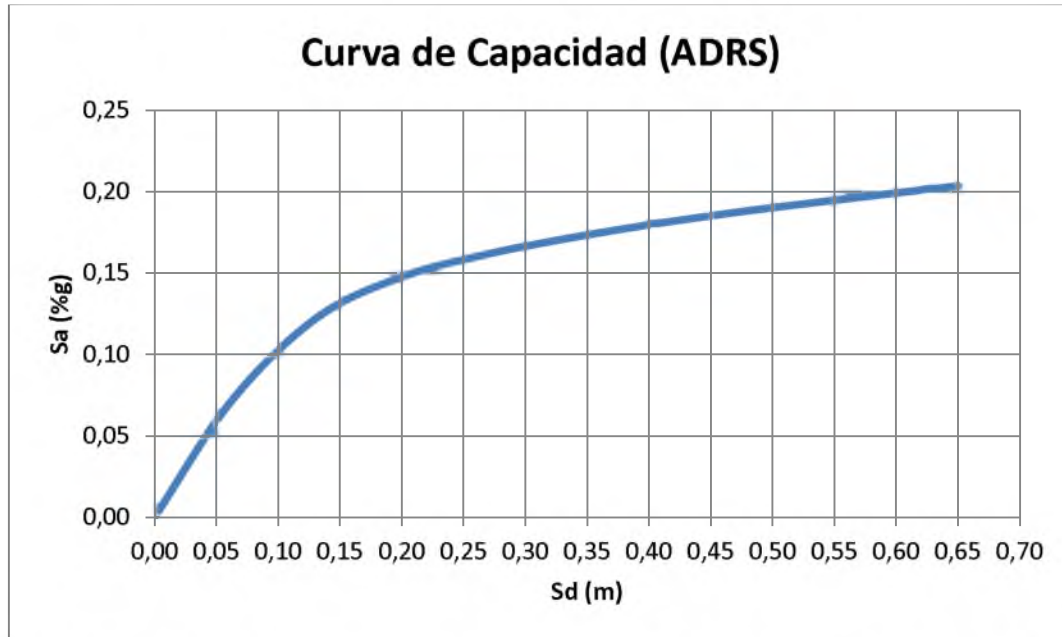


Figura 166. Curva de Capacidad en formato ADRS (Espectro de Capacidad) – Sentido Y

Se asumen varios valores de ductilidad para los cuales se calcula el periodo efectivo, T_{eff} , el amortiguamiento efectivo, β_{eff} , el coeficiente M, y el periodo secante, T_{sec} , por medio de las ecuaciones mencionadas en el Capítulo 2.5.4.

Se debe de realizar la representación bilineal de la Curva de Espectro de Capacidad para cada ductilidad asumida (ver Capítulo 2.3).

A continuación se muestra una tabla con los valores de periodo efectivo, amortiguamiento efectivo, coeficiente M y periodo secante obtenidos para las ductilidades estudiadas.

Ductilidad μ	Periodo Efectivo T_{eff}	Amortiguamiento Efectivo β_{eff}	Coefficiente M	Periodo Secante T_{sec}
1	1,78	0	1	1,78
2	2,19	3,80	0,98	2,21
3	2,70	10,80	1,16	2,51
4	2,94	14,96	1,08	2,83
5	3,17	15,28	0,99	3,17
6,50	3,39	15,39	0,95	3,47

Tabla 15. Periodos efectivos, Amortiguamientos efectivos, Coeficientes M Y Periodo secantes para diferentes valores de ductilidad (Alternativa C).

Con los valores mostrados en la Tabla 15 se grafican los Espectros de Demanda Modificados (MDRAS) para cada uno de las ductilidades estudiadas, como se muestra en la Figura 182.

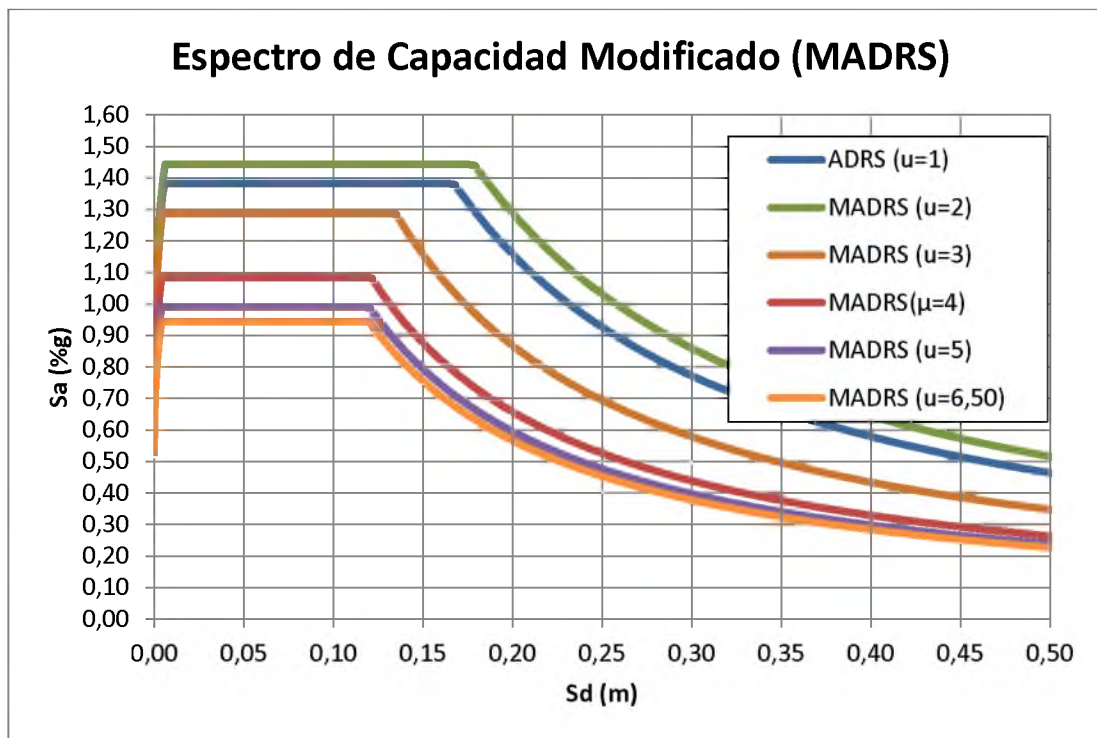


Figura 167. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) para diferentes valores de ductilidad.

Si se trazan líneas rectas al origen, cada una de estas representara un periodo secante. El posible punto de desempeño se encontrará en la intersección del periodo secante radial, T_{sec} , con el MADRS.

En la Figura 183 se muestra la intersección del periodo secante radial con el correspondiente Espectro de Demanda Modificado (MADRS)

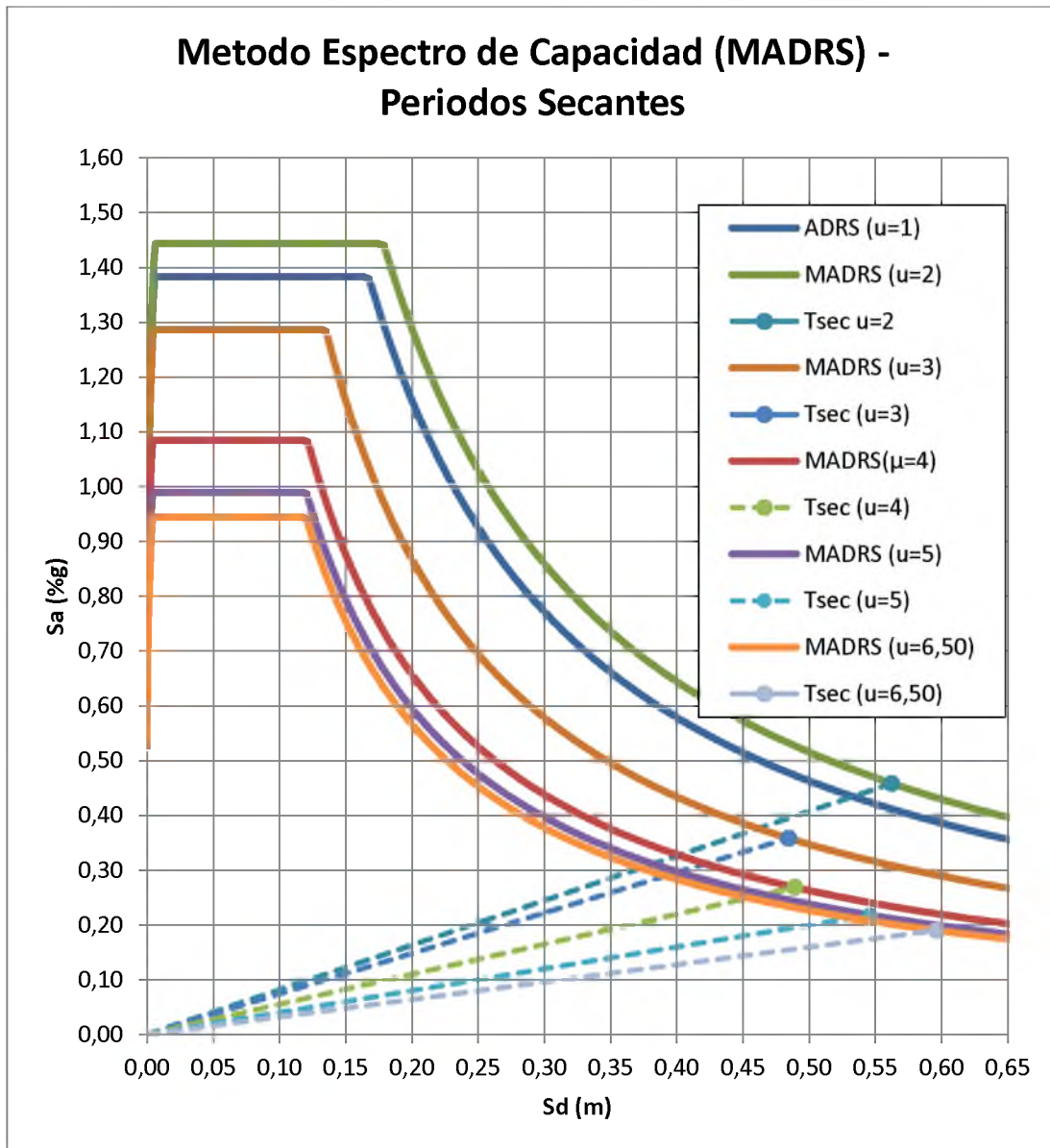


Figura 168. Espectros de Capacidad Modificados (MADRS) y Periodos secantes para diferentes valores de ductilidad.

El actual punto de desempeño deberá encontrarse sobre la línea que une la intersección de los periodos secantes con el Espectro de Capacidad Modificado correspondiente y sobre la Curva del Espectro de Capacidad. La intersección entre estas dos curvas definirá el punto de desempeño.

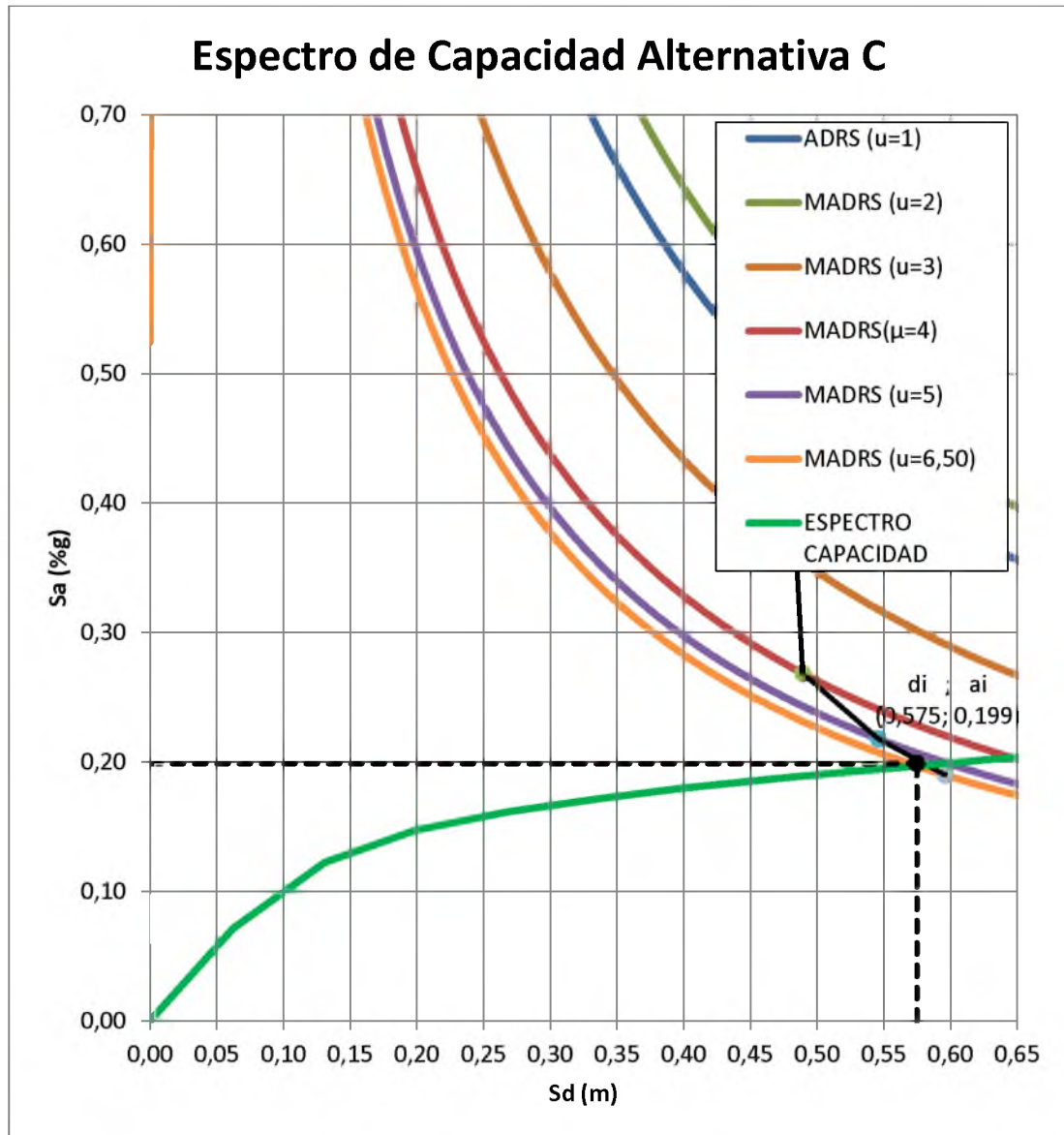


Figura 169. Método Espectro de Capacidad Alternativa C (Sismo raro) – Sentido Y

De la Figura 184 se obtiene el máximo desplazamiento esperado y la máxima aceleración esperada, las cuales tuvieron los siguientes valores:

$$a_i = 0,199 (\%g)$$

$$d_i = 0,575 m$$

El desplazamiento espectral y aceleración espectral deben ser convertidos nuevamente a desplazamiento y cortante de la estructura aislada por medio de las ecuaciones.

$$\delta_{max} = d_i \times PF_1 \times \phi_{1,roof} = 60,80 cm$$

$$V_{max} = S_{a_i} \times \alpha_1 \times W = 565,86 Ton$$

4.6. RESUMEN DE DESPLAZAMIENTOS DE EDIFICIO + AISLACION

Comparación de los Métodos Aplicados					
Método		Desplazamiento Edificio + Aislación (cm)			
		SISMO RARO		SISMO MUY RARO	
		DIRECCION X	DIRECCION Y	DIRECCION X	DIRECCION Y
Método de los coeficientes		36,20	34,00	58,60	57,00
Método Espectro Capacidad	Alternativa A	39,00	35,83	65,12	60,00
	Alternativa B	39,00	35,83	65,12	60,00
	Alternativa C	35,43	32,78	66,65	60,80

Tabla 16. Comparación de Desplazamientos máximos del Edificio + Aislador según los Métodos Aplicados – Edificio con aisladores sísmicos

4.7. DETERMINACIÓN DE DESPLAZAMIENTOS EN EL SISTEMA DE AISLACION Y EDIFICIO.

Para evaluar de manera correcta los resultados se debe analizar por separado los desplazamientos ocurridos en el sistema de aislación y los desplazamientos en el edificio.

Para obtener los desplazamientos del edificio, se considera que el cortante basal obtenido en los métodos utilizados para calcular el punto de desempeño es el mismo cortante basal al que va a estar sometido el edificio sobre el sistema de aislación. Para ello se necesita convertir la aceleración espectral, correspondiente al punto de desempeño, a cortante basal y se debe de modificar la curva de capacidad del edificio sin aislación la cual considere la inclusión de una losa de planta baja.

En la Figura 186 y Figura 187 se muestran la comparación de la Curva de Capacidad del edificio sin aislación, con y sin la inclusión de la losa de planta baja en sentido “X” y “Y” respectivamente.

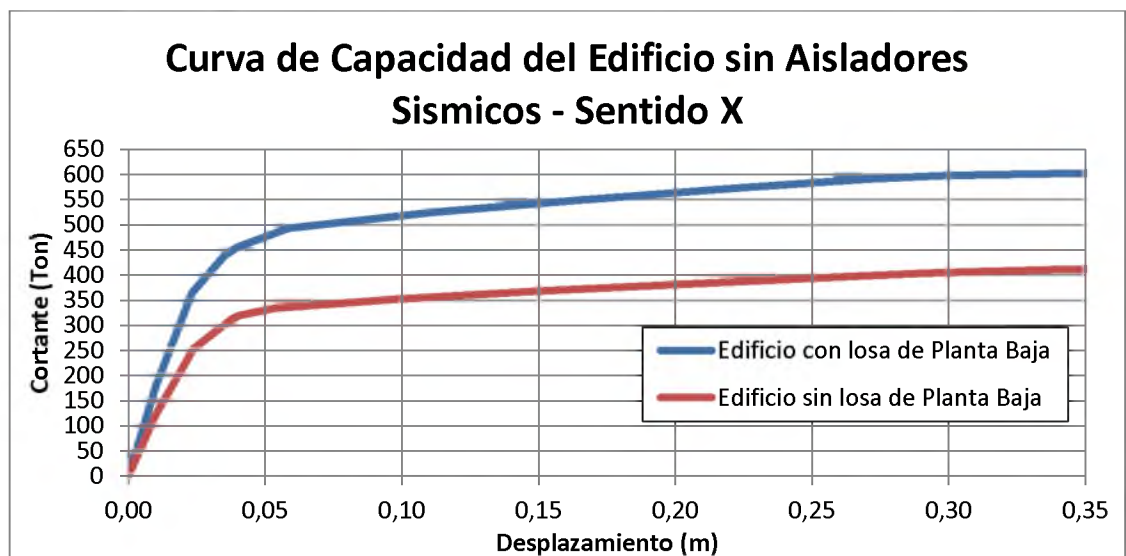


Figura 170. Curva de Capacidad del Edificio sin Aisladores Sísmicos – Sentido X

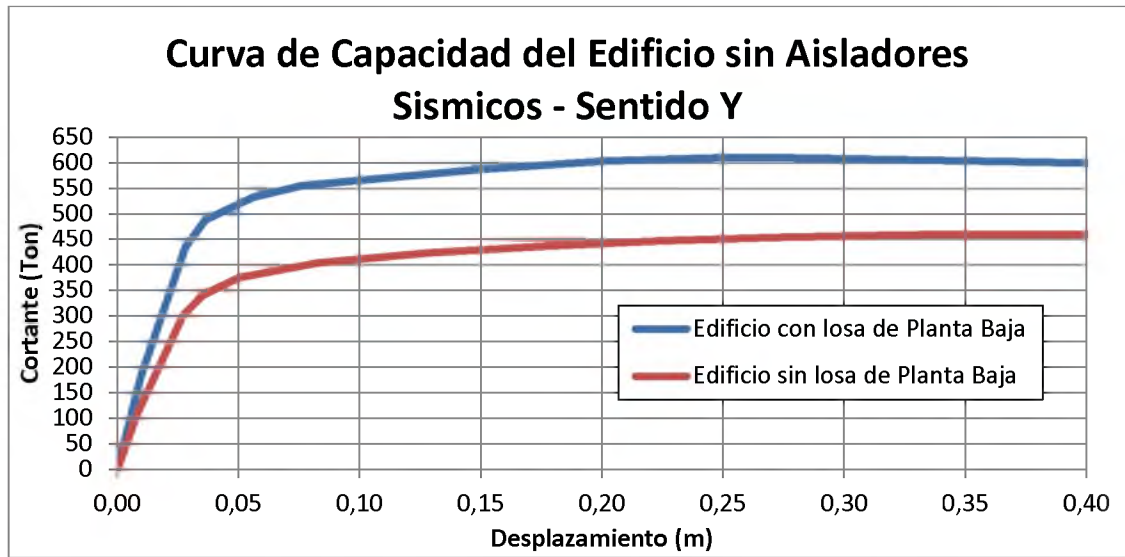


Figura 171. Curva de Capacidad del Edificio sin Aisladores Sísmicos – Sentido Y

Finalmente, se calcula los desplazamientos en el edificio mediante las gráficas, es decir utilizando el respectivo Cortante Basal según el método aplicado se busca en la Curva de Capacidad del edificio sin aislación, el desplazamiento que genera. A continuación se presentaran los desplazamientos en los dos sentidos, obtenidos para cada método.

4.7.1. METODO DE LOS COEFICIENTES (ASCE 41 – 06)

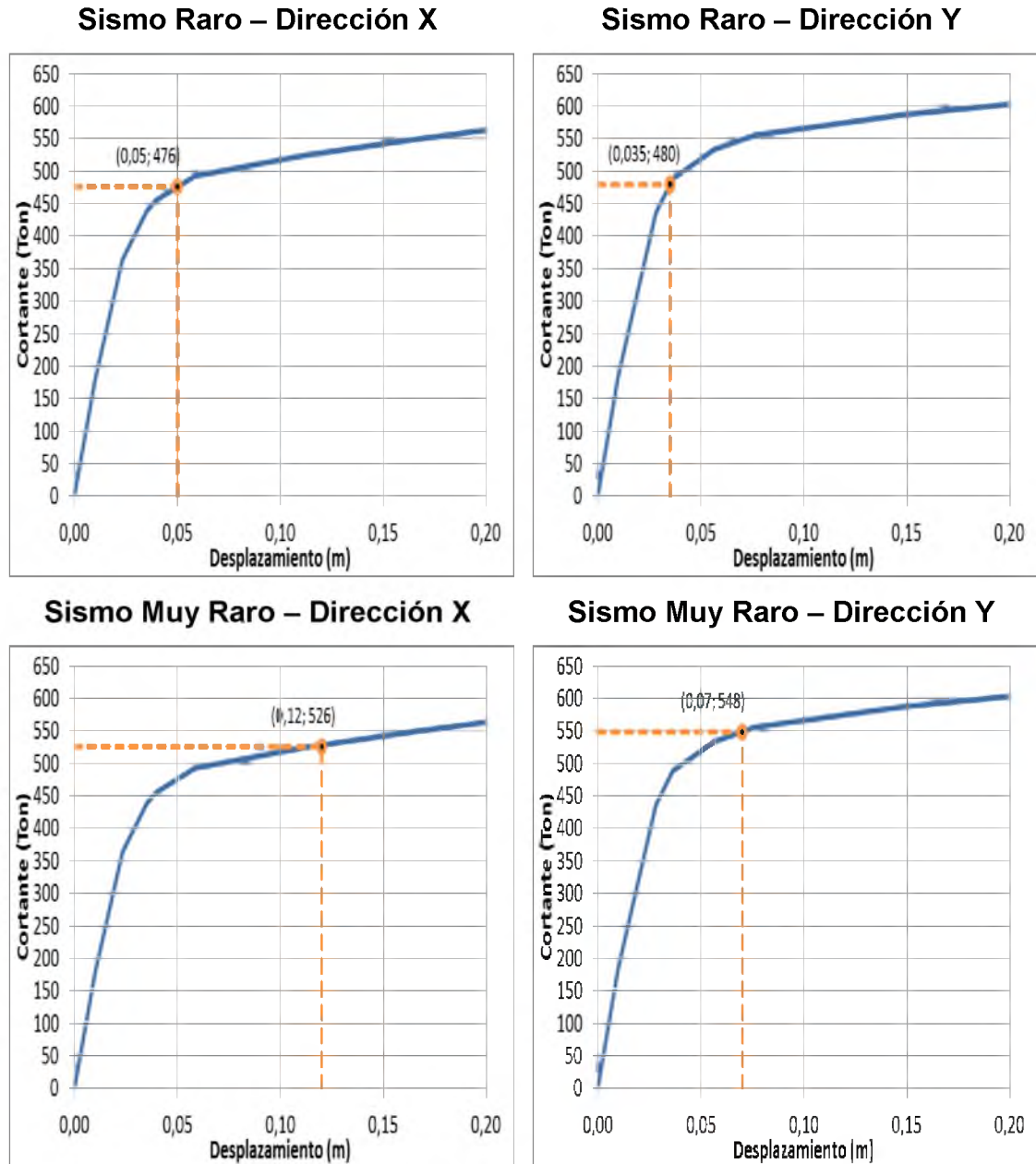


Figura 172. Desplazamientos del Edificio – Sismo Raro y Sismo Muy Raro (Método de los Coeficientes)

4.7.2. METODO ESPECTRO CAPACIDAD ALTERNATIVA A (FEMA 440)

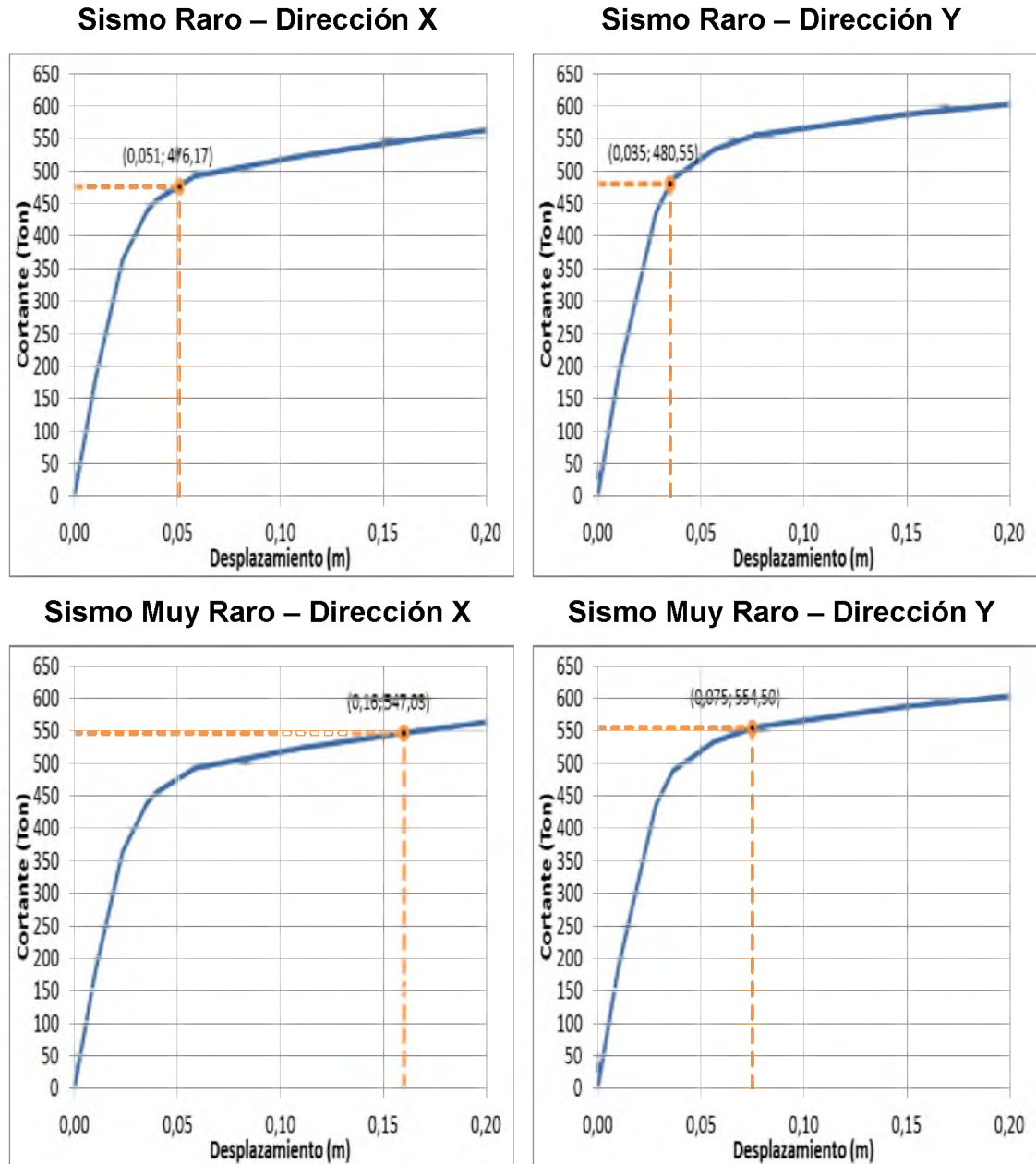
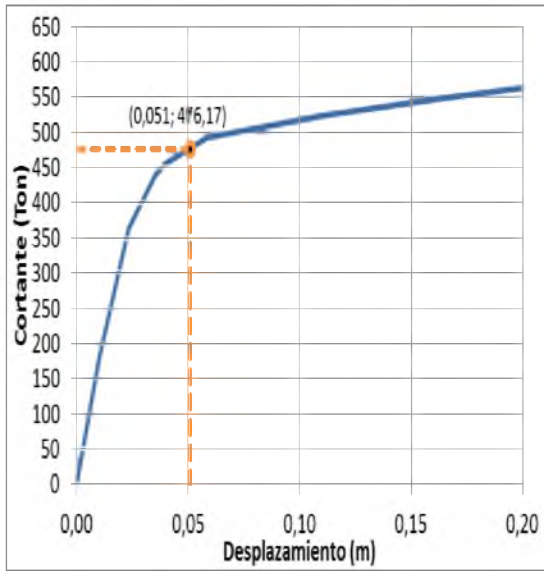


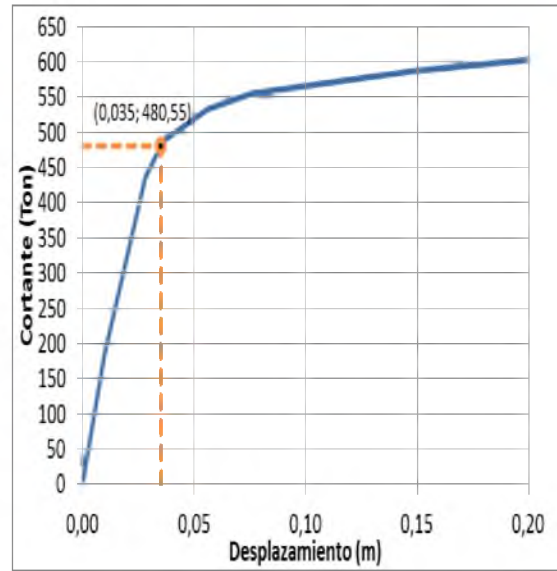
Figura 173. Desplazamientos del Edificio – Sismo Raro y Sismo Muy Raro (Metodo Espectro Capacidad – Alternativa A)

4.7.3. METODO ESPECTRO CAPACIDAD ALTERNATIVA B (FEMA 440)

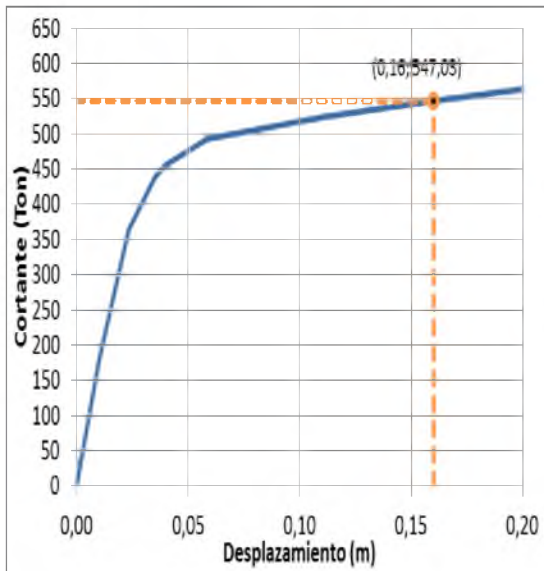
Sismo Raro – Dirección X



Sismo Raro – Dirección Y



Sismo Muy Raro – Dirección X



Sismo Muy Raro – Dirección Y

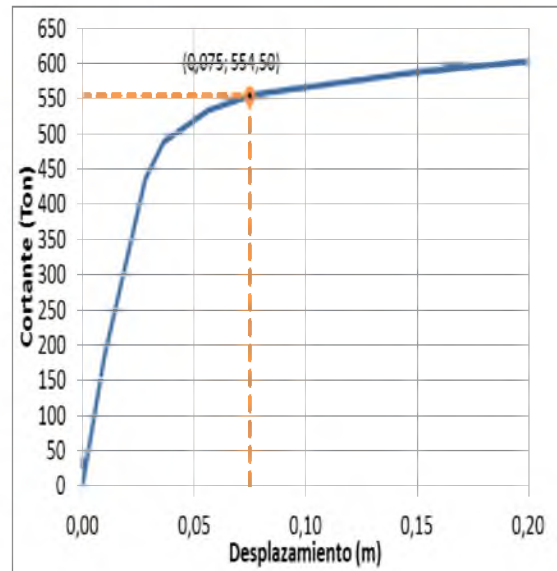


Figura 174. Desplazamientos del Edificio – Sismo Raro y Sismo Muy Raro (Metodo Espectro Capacidad – Alternativa B)

4.7.4. METODO ESPECTRO CAPACIDAD ALTERNATIVA C (FEMA 440)

Sismo Raro – Dirección X

Sismo Raro – Dirección Y

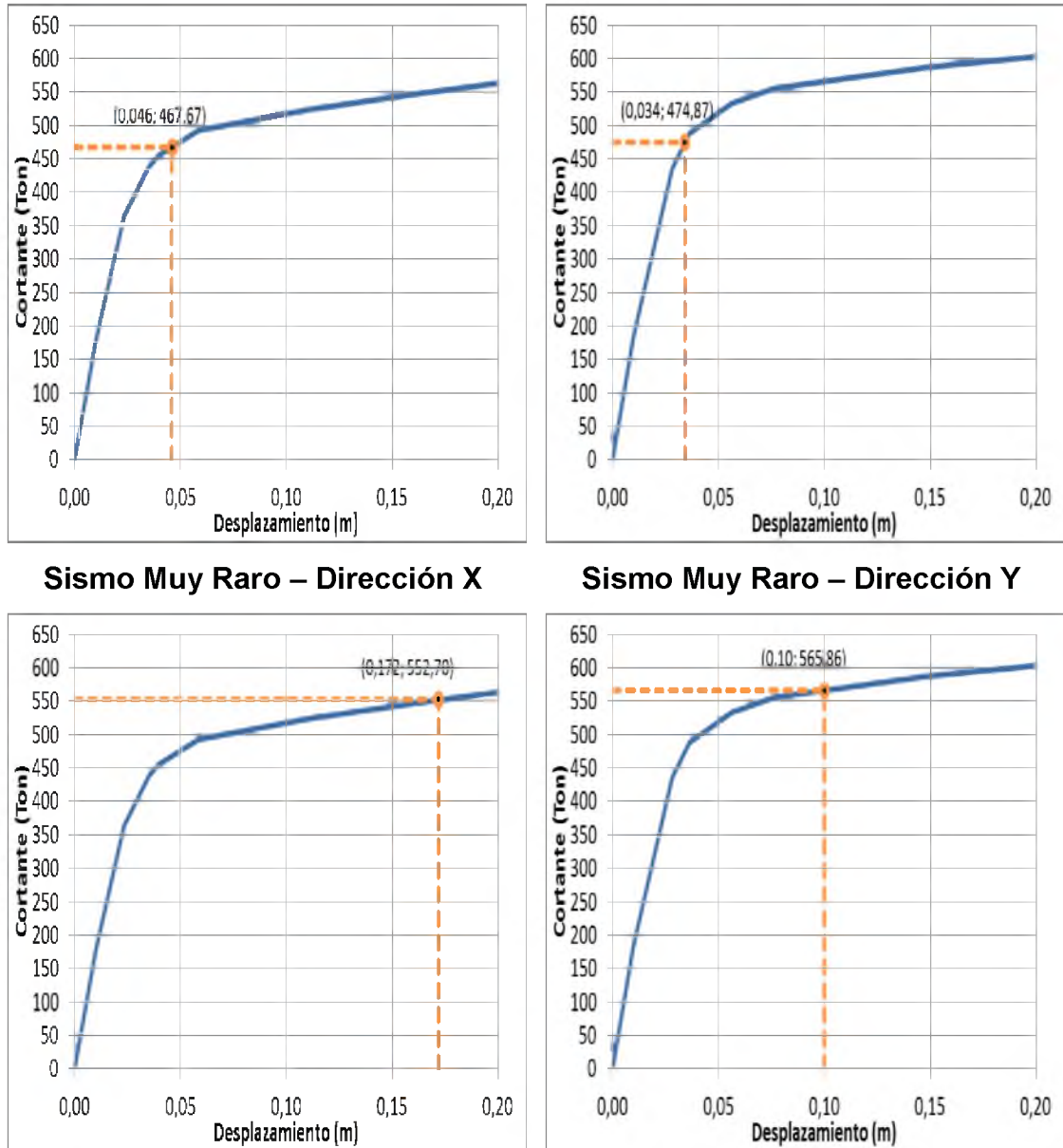


Figura 175. Desplazamientos del Edificio – Sismo Raro y Sismo Muy Raro (Metodo Espectro Capacidad – Alternativa C)

4.8. RESUMEN DE RESULTADOS Y NIVELES DE DESEMPEÑO

A continuación se presenta un resumen de los desplazamientos de desempeño obtenidos del edificio (Ver Tabla 17) y de los aisladores sísmicos (Ver Tabla 18)

mediante 4 métodos (Método de los Coeficientes, Método Espectro de Capacidad Alternativa A, Método Espectro de Capacidad Alternativa B, y Método Espectro de Capacidad Alternativa C) tanto para el Sismo Raro como para el Sismo Muy Raro en las direcciones “X” y “Y”.

Comparación de los Métodos Aplicados					
Método		Desplazamiento Edificio (cm)			
		SISMO RARO		SISMO MUY RARO	
		DIRECCION	DIRECCION	DIRECCION	DIRECCION
		X	Y	X	Y
Método de los coeficientes		5,00	3,50	12,00	7,00
Método Espectro Capacidad	Alternativa A	5,00	3,50	16,00	7,50
	Alternativa B	5,00	3,50	16,00	7,50
	Alternativa C	4,60	3,40	17,20	10,00

Tabla 17. Comparación de Desplazamientos máximos del Edificio según los Métodos Aplicados – Edificio con aisladores sísmicos

Comparación de los Métodos Aplicados					
Método		Desplazamiento Aislación (cm)			
		SISMO RARO		SISMO MUY RARO	
		DIRECCION	DIRECCION	DIRECCION	DIRECCION

		X	Y	X	Y
Método de los coeficientes		31,20	30,50	46,60	50,00
Método Espectro Capacidad	Alternativa A	29,20	32,35	49,12	52,50
	Alternativa B	29,20	32,35	49,12	52,50
	Alternativa C	30,83	29,38	49,45	50,80

Tabla 18. Comparación de Desplazamientos máximos de los Aisladores sísmicos según los Métodos Aplicados – Edificio con aisladores sísmicos

Según la sectorización de la Curva de Capacidad sugerida por NEC 15 presentada en el Capítulo 2.4 de este trabajo, los niveles de desempeño para el edificio de la Facultad de Ingeniería estarían determinados como lo muestran la Figura 193 y la Figura 194, respectivamente.

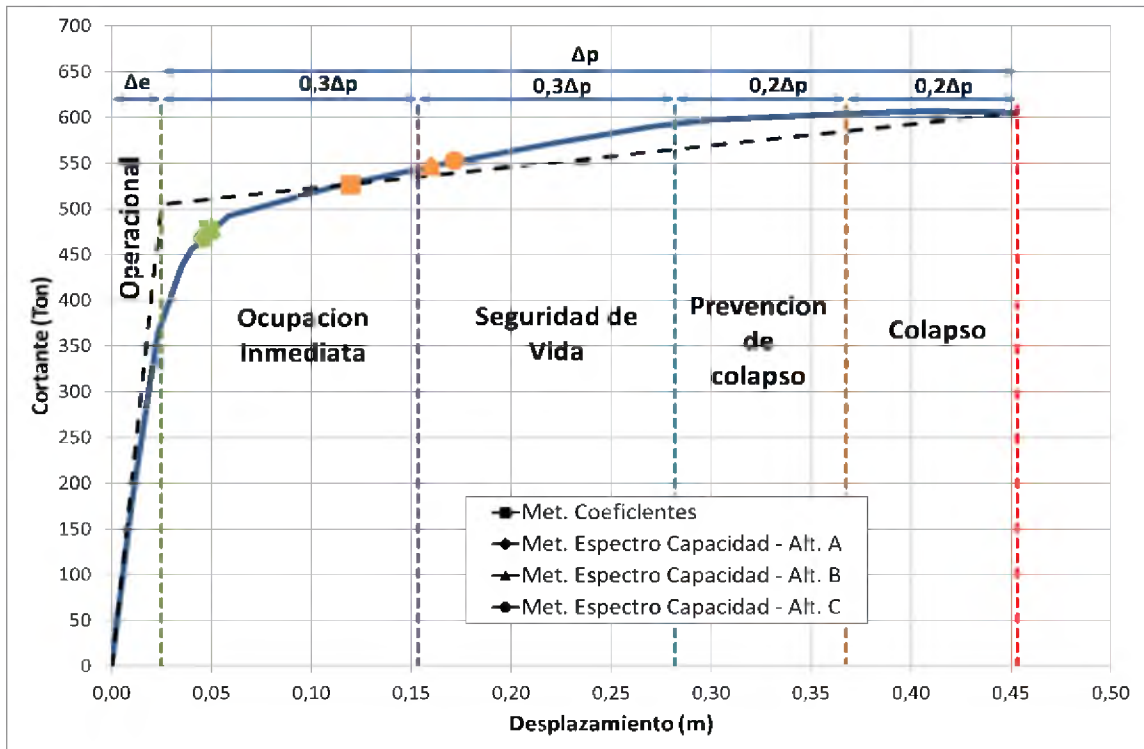


Figura 176. Sectorización de la Curva de Capacidad - Sentido X (NEC 15)

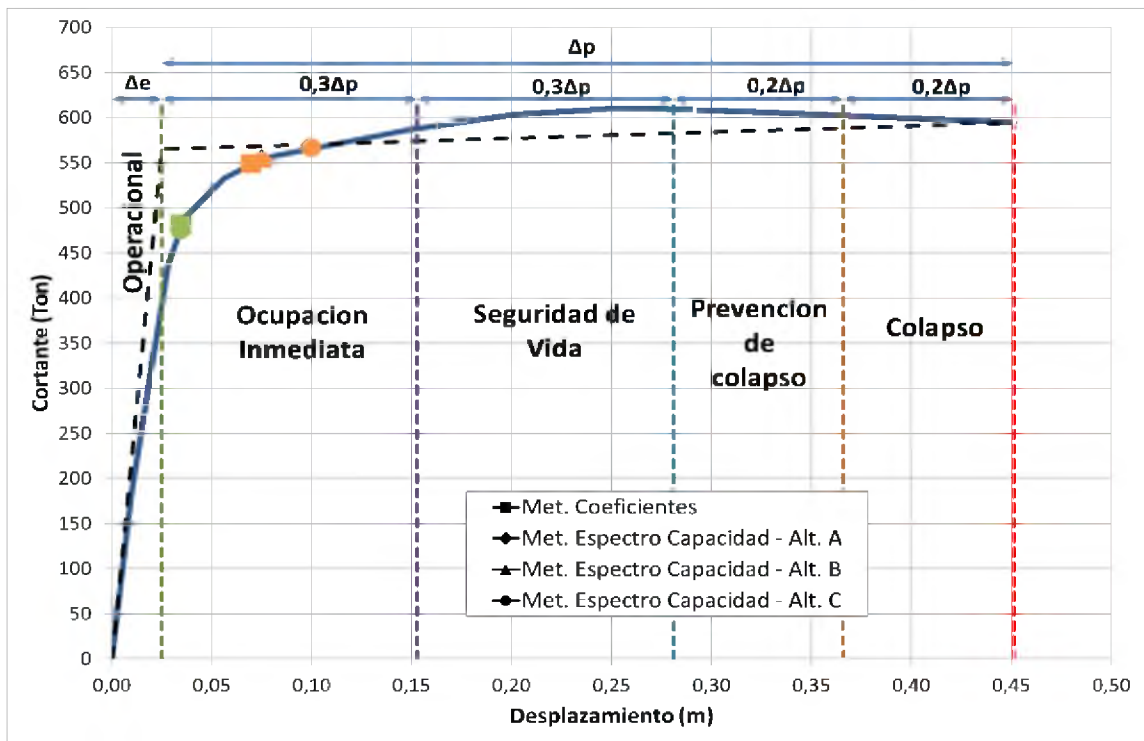


Figura 177. Sectorización de la Curva de Capacidad - Sentido Y (NEC 15)

Según NEC 2015 las estructuras especiales deben tener un nivel de desempeño de seguridad de vida para un sismo severo o raro de diseño (periodo de retorno de 475 años) y un desempeño de Prevención al colapso para un sismo muy raro (periodo de retorno de 2500 años).

A continuación se presentara una tabla con el desempeño obtenido para cada uno de los casos estudiados:

Comparación de los Desempeños Obtenidos					
Método		SISMO RARO		SISMO MUY RARO	
		DIRECCION X	DIRECCION Y	DIRECCION X	DIRECCION Y
Método de los coeficientes		Ocupación inmediata	Ocupación inmediata	Ocupación inmediata	Ocupación inmediata
Método Espectro Capacidad	Alternativa A	Ocupación inmediata	Ocupación inmediata	Seguridad de vida	Ocupación inmediata
	Alternativa B	Ocupación inmediata	Ocupación inmediata	Seguridad de vida	Ocupación inmediata
	Alternativa C	Ocupación inmediata	Ocupación inmediata	Seguridad de vida	Ocupación inmediata

Tabla 19. Comparación de Desempeños sísmicos del Edificio según los métodos Aplicados – Edificio con aisladores sísmicos.

CAPITULO 5: DETALLES CONSTRUCTIVOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE AISLACIÓN PROPUESTO

5.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se mostraran los detalles constructivos debido a la implementación de aisladores sísmicos en las bases. Con la ayuda de planos en planta y cortes, y además de fotos se explicaran estos detalles de manera clara. En los planos se podrán observar los siguientes detalles constructivos:

- Muro Perimetral (Estructural)
- Juntas (No Estructural)
- Etc.

Se deberá picar hormigón, remover tuberías, alcantarillas y vegetación en algunas zonas, para tener una junta de 55 cm en el perímetro de la Facultad.

También se muestra que en la zona de las escaleras de la parte frontal de la Facultad se aprovechara el muro existente y se usaran juntas verticales.

5.2. DETALLE DEL AISLADOR Y CORTES DE LA FACULTAD

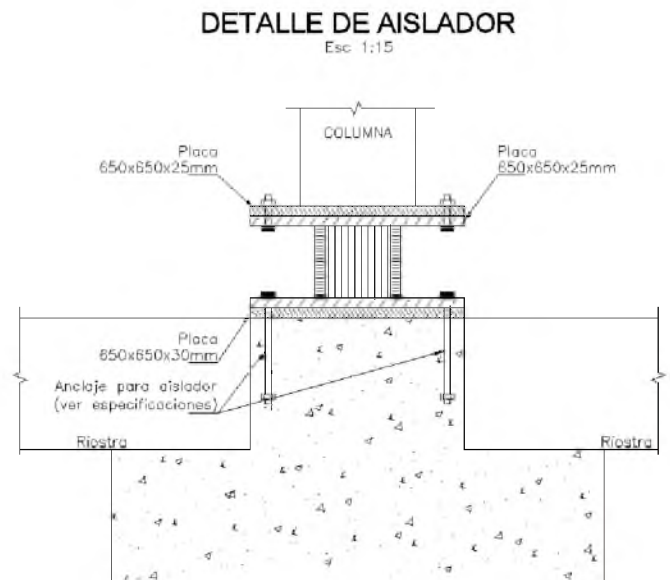


Figura 178. Detalle del Aislador

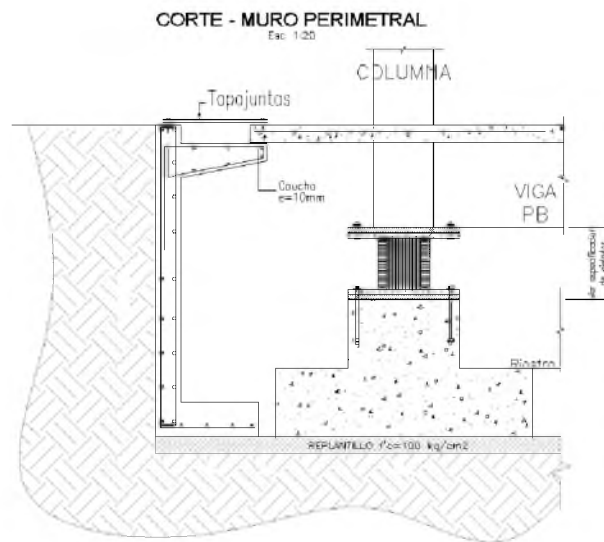


Figura 179. Corte mostrando Aislador y Muro Perimetral

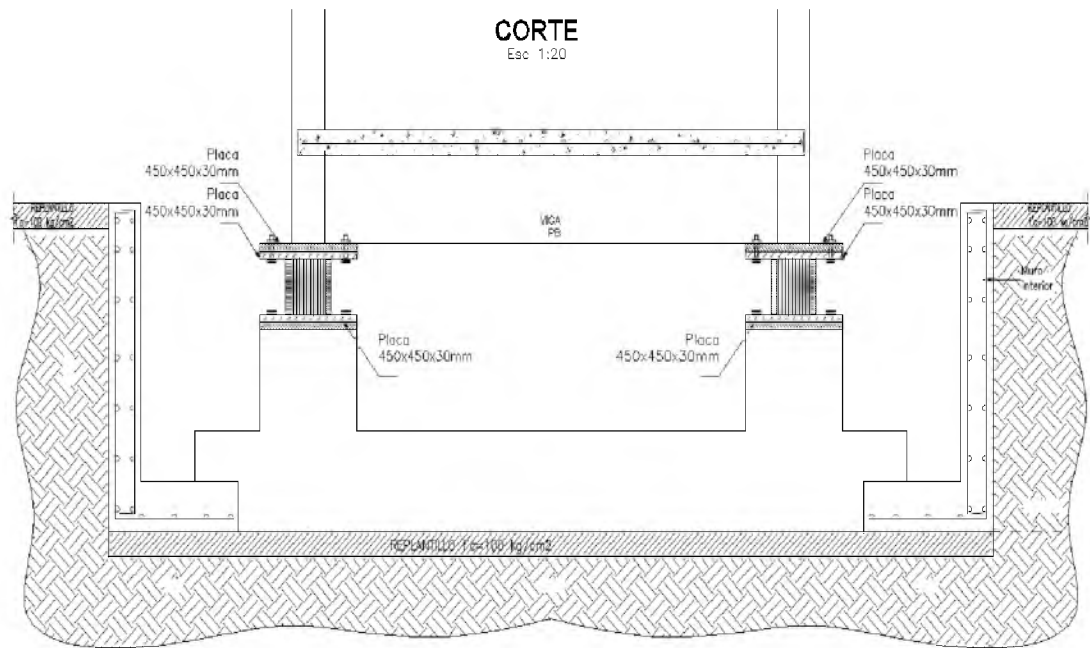


Figura 180. Corte - Semisotano

5.3. FOTOS DE LA FACULTAD INDICANDO DETALLES CONSTRUCTIVOS



Figura 181. Vista posterior de la Facultad – Muro perimetral y Junta



Figura 182. Vista Frontal de la Facultad – Junta vertical

CAPITULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. RESUMEN

- Se modificó el análisis realizado en el trabajo de Loor (2015). Las modificaciones realizadas fueron las siguientes:
 - se consideró el F_y de las varillas de acero igual a 4200 kg/cm^2 .
 - se calcularon nuevos diagramas de momento-curvatura que consideren la carga axial en el caso de las columnas.
 - se aplicaron por separado rotulas tipo M2 y M3 a las columnas.
 - se realizó el análisis para el Sismo Raro (475 años periodo de retorno) y el Sismo Muy Raro (2500 años periodo de retorno).
- Con las modificaciones realizadas en Loor (2015), se obtuvo un nivel de desempeño de Seguridad de Vida para el sismo Raro en dirección X, Seguridad de Vida para el sismo Raro en dirección Y, Colapso para el sismo muy Raro en dirección X, y Colapso para el sismo muy Raro en dirección Y.
- Se determinó que los niveles de desempeño del trabajo de Loor (2015) modificado para el Sismo muy Raro en dirección X y Sismo muy Raro en dirección Y no cumplían los requerimientos especificados en NEC 15, los cuales debían ser Prevención al colapso.
- Se estudió una propuesta de aislación para el Edificio de la Facultad de Ingeniería. La aislación consistió en 50 aisladores. Las características no lineales de cada uno de los aisladores son las siguientes:
 - Rigidez Inicial, $K_0=800 \text{ KN/m}$
 - Fuerza de Fluencia, $F_y= 80 \text{ KN}$
 - Rigidez Post-elástica, $K_2= 80 \text{ KN/m}$

- Para el cálculo de la Curva de Capacidad del edificio aislado se consideró el peso de la losa y vigas de planta baja.
- Se realizó el cálculo de los puntos de desempeño mediante 4 métodos: Método de los Coeficientes, Método Espectro-Capacidad Alternativa A, Espectro-Capacidad Alternativa B y Espectro-Capacidad Alternativa C.
- Para el Sismo Raro, los desplazamientos edificio-aislación fueron en promedio de 36 cm para la dirección X y de 35,85 para la dirección Y. El método Espectro Capacidad – Alternativa A dio los resultados más críticos.
- Para el Sismo Raro, el cortante basal del edificio aislado fue en promedio de 476,17 Ton para la dirección X y de 480,55 Ton para la dirección Y. El método Espectro Capacidad – Alternativa A dio los resultados más críticos.
- Para el Sismo Muy Raro, los desplazamientos edificio-aislación en promedio fueron de 66,55 cm para la dirección X y de 60,80 cm para la dirección Y. El método Espectro Capacidad – Alternativa C dio los resultados más críticos.
- Para el Sismo Muy Raro, el cortante basal del edificio aislado fue en promedio de 552,70 Ton para la dirección X y de 565,86 Ton para la dirección Y. El método Espectro Capacidad – Alternativa C dio los resultados más críticos.
- Se calculó la Curva de Capacidad del Edificio Sin Aislación considerando la losa y vigas de planta baja para el cálculo de los desplazamientos del edificio.

- Para el Sismo Raro, los desplazamientos del edificio fueron en promedio de 5 cm para la dirección X y de 3,50 cm para la dirección Y. El método Espectro Capacidad – Alternativa A dio los resultados más críticos.
- Los niveles de desempeño para el Sismo Raro, para la dirección X fueron de Ocupación Inmediata y para la dirección Y de Ocupación Inmediata. El método Espectro Capacidad – Alternativa A dio los resultados más críticos.
- Para el Sismo Muy Raro, los desplazamientos del edificio fueron en promedio de 17,20 cm para la dirección X y de 10 cm para la dirección Y. El método Espectro Capacidad – Alternativa C dio los resultados más críticos.
- Los niveles de desempeño para el Sismo Muy Raro, para la dirección X fueron de Seguridad de Vida y para la dirección Y de Ocupación Inmediata. El método Espectro Capacidad – Alternativa C dio los resultados más críticos.
- Se calcularon los desplazamientos del sistema de aislación restando el desplazamiento del edificio-aislación menos el desplazamiento del edificio.
- Para el Sismo Raro, los desplazamientos del sistema de aislación fueron en promedio de 30 cm para la dirección X y de 32,50 cm para la dirección Y. El método Espectro Capacidad – Alternativa A dio los resultados más críticos.
- Para el Sismo Muy Raro, los desplazamientos del sistema de aislación fueron en promedio de 49,50 cm para la dirección X y de 52,50 cm para la dirección Y. El método Espectro Capacidad – Alternativa A dio los resultados más críticos.

- Para la implementación de la aislación en el edificio de la Facultad de Ingeniería deberá construirse un muro perimetral, formando un semisótano donde se encontraran ubicados los aisladores. La junta entre los muros y la losa de planta baja será de 55 cm.

6.2. CONCLUSIONES

- Para la implementación de aislación mejoro el desempeño del edificio ante el Sismo Raro y el Sismo Muy Raro. El nivel de desempeño del edificio es de Ocupación Inmediata y de Seguridad de Vida respectivamente por lo que se puede anticipar poco daño para esos sismos.
- Las propiedades no lineales de los aisladores permitieron la reducción de los cortantes basales a cambio del desplazamiento del sistema de aislación (55 cm). Los valores de desplazamiento en los aisladores pueden disminuir cambiando las características no lineales de los mismos, siempre y cuando los cortantes basales se mantengan en niveles de desempeño aceptables.
- El método más crítico para el cálculo de los desplazamientos de desempeño fue el de Espectro Capacidad – Alternativa C. En general todas las alternativas para el Método de Capacidad dan los mismos resultados.
- El método para el cálculo de los desplazamientos de desempeño que resulto más fácil de aplicar fue el método de Espectro Capacidad – Alternativa A.

6.3. RECOMENDACIONES

- Para un Análisis Estático No lineal usar el Método Espectro Capacidad – Alternativa A, debido a que es el más eficiente y fácil de aplicar.
- Todos los resultados obtenidos nos dan una idea de lo que se espera ante un movimiento sísmico. Pero es necesario realizar un análisis dinámico para obtener resultados más reales.
- Se deberá realizar un Análisis Tiempo – Historia, tanto para obtener el desplazamiento real del aislador como para saber el cortante real que recibirá el edificio.

BIBLIOGRAFIA

- American Society of Civil Engineers (2007). Seismic Rehabilitation of Existing Buildings (ASCE/SEI 41-06). Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers.
- American Society of Civil Engineers (2010). Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings (ASCE/SEI 41-13). Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers.
- Department of Homeland Security Federal Emergency Management Agency (2005). Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures FEMA 440.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). NEC. Capítulo 2: Peligro sísmico y Requisitos de Diseño Sismo – Resistentes, Ecuador.
- Computers & Structures, Inc. (2015). CSI Analysis Reference Manual – Etabs 2015.

- CALIFORNIA SEISMIC SAFETY COMMISSION (1996). Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings Volume 1 (ATC-40).
- Loo, D., (2015). Comportamiento Lineal y no Lineal del Edificio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.
- Federal Emergency Management Agency (1997). NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings. FEMA 373
- Federal Emergency Management Agency (2000). Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. FEMA 356

ANEXOS

APENDICE A

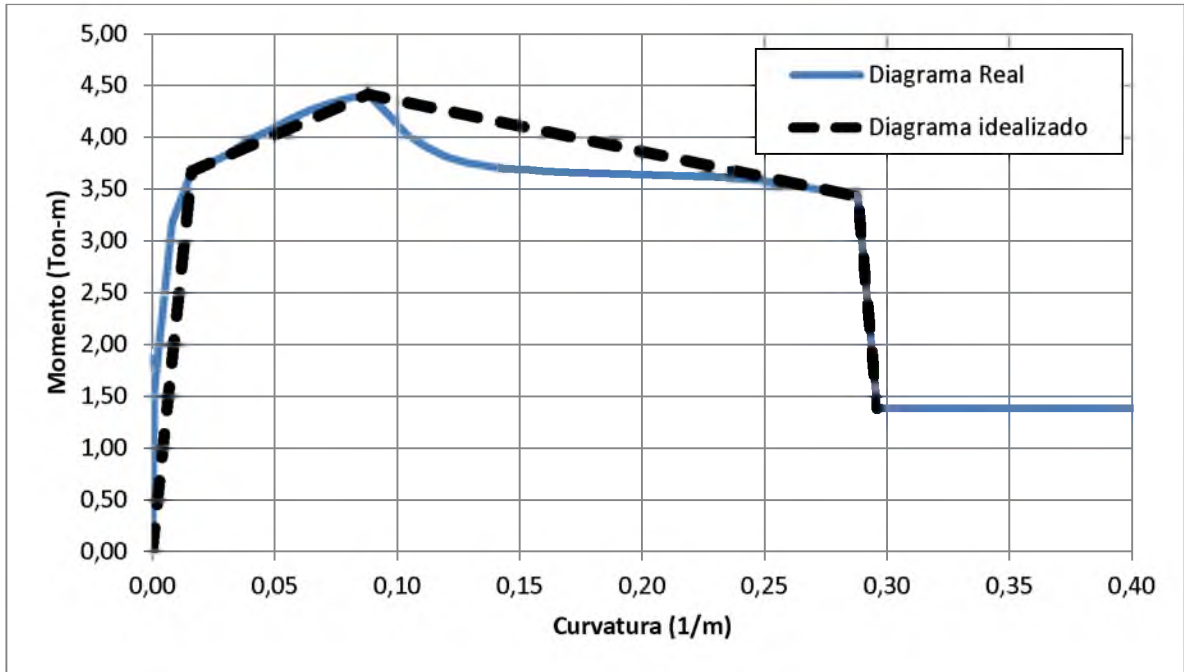
TRABAJO DE GRADO

DIAGRAMA MOMENTO – CURVATURA (KSU_RC)

COLUMNA DE BORDE 30X30

P= 5,50 Ton, $F_y=2800 \text{ kg/cm}^2$, Armado= 8 ϕ 12 mm

DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (1/m)	Momento (Ton-m)
0,000	0,000
0,016	3,670
0,088	4,410
0,288	3,430
0,296	1,380



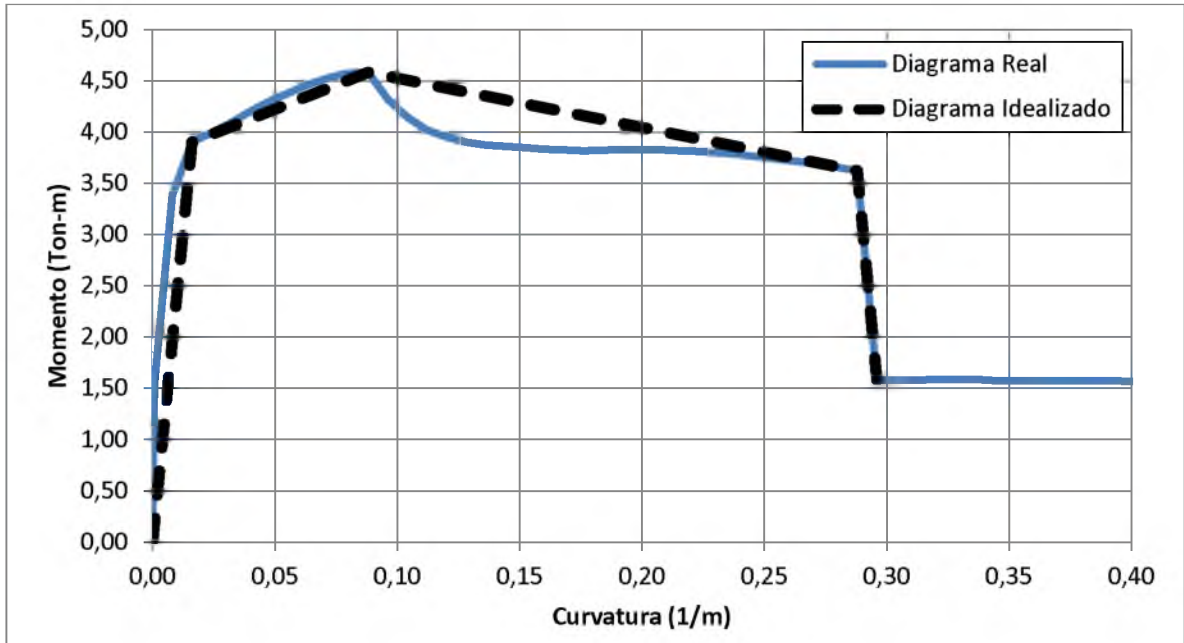
TRABAJO DE GRADO

DIAGRAMA MOMENTO – CURVATURA (KSU_RC)

COLUMNA INTERIOR DE 30X30

$P = 7,50 \text{ Ton}$, $F_y = 2800 \text{ kg/cm}^2$, Armado = $8\phi 12 \text{ mm}$

DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (1/m)	Momento (Ton-m)
0,000	0,000
0,016	3,902
0,088	4,585
0,288	3,623
0,296	1,579



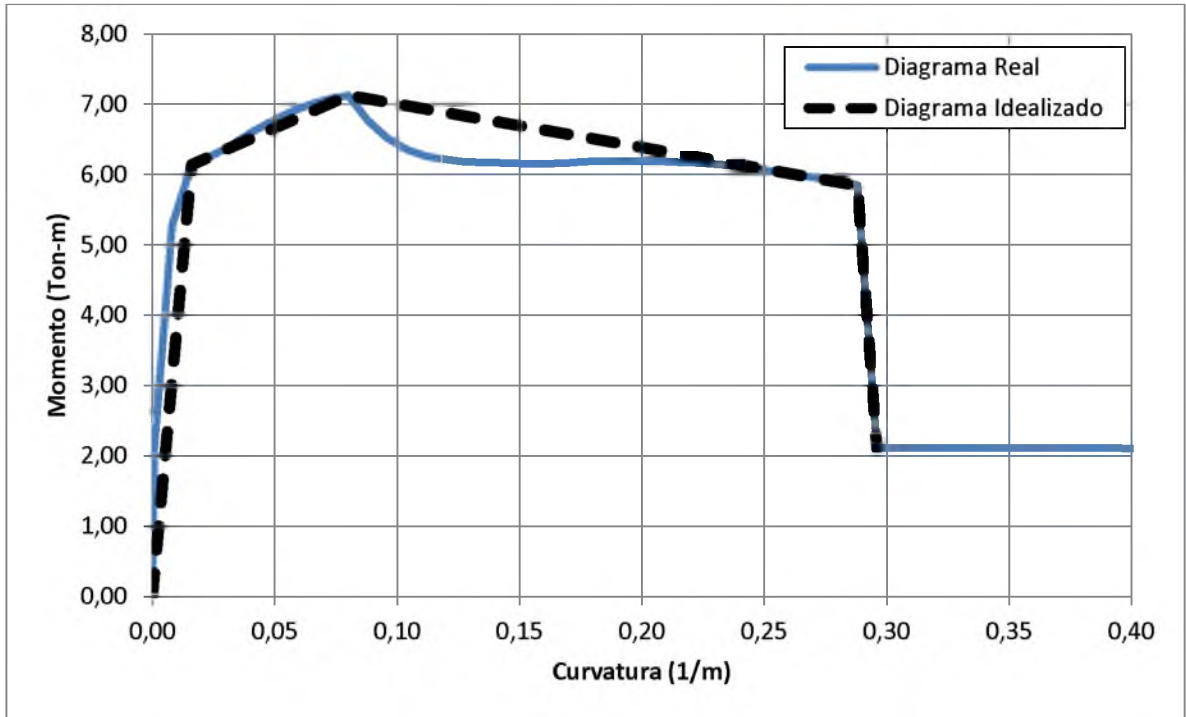
TRABAJO DE GRADO

DIAGRAMA MOMENTO – CURVATURA (KSU_RC)

COLUMNA ESQUINERA DE 30X40

P= 10,50 Ton, $F_y=2800 \text{ kg/cm}^2$, Armado= 10 ϕ 14 mm

DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (1/m)	Momento (Ton-m)
0	0
0,016	6,142
0,080	7,128
0,288	5,846
0,296	2,111



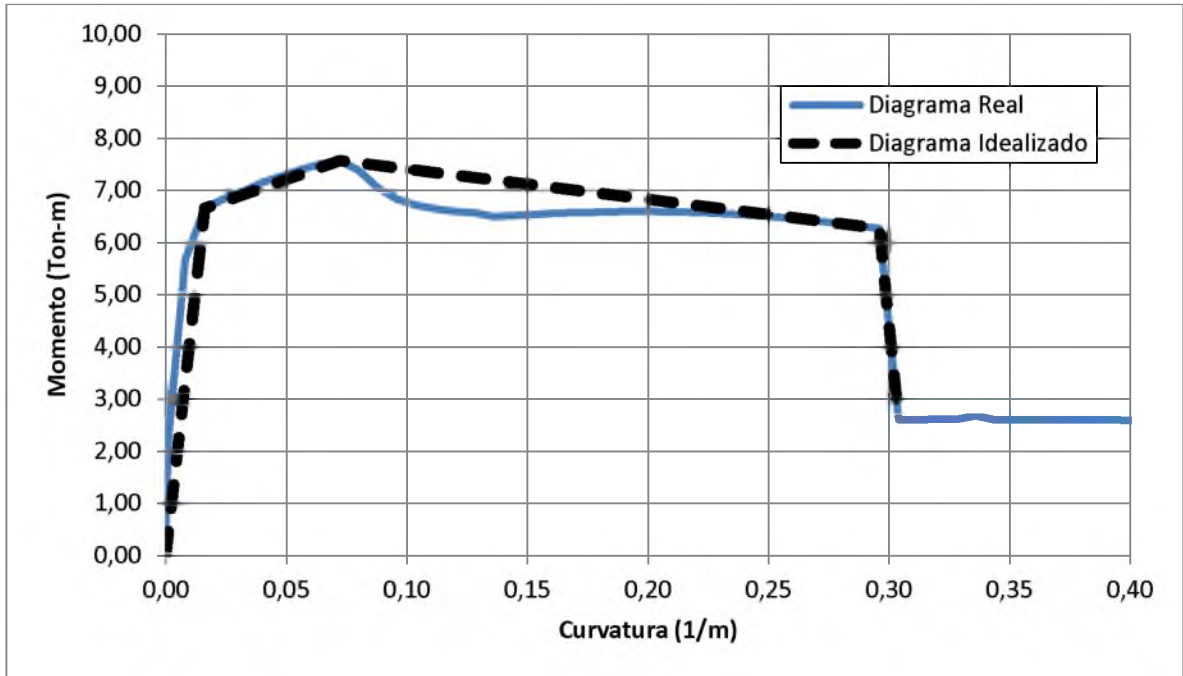
TRABAJO DE GRADO

DIAGRAMA MOMENTO – CURVATURA (KSU_RC)

COLUMNA INTERIOR DE 30X40

P= 15,20 Ton, $F_y=2800 \text{ kg/cm}^2$, Armado= 10 ϕ 14 mm

DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (1/m)	Momento (Ton-m)
0	0
0,016	6,657
0,072	7,573
0,296	6,268
0,304	2,603



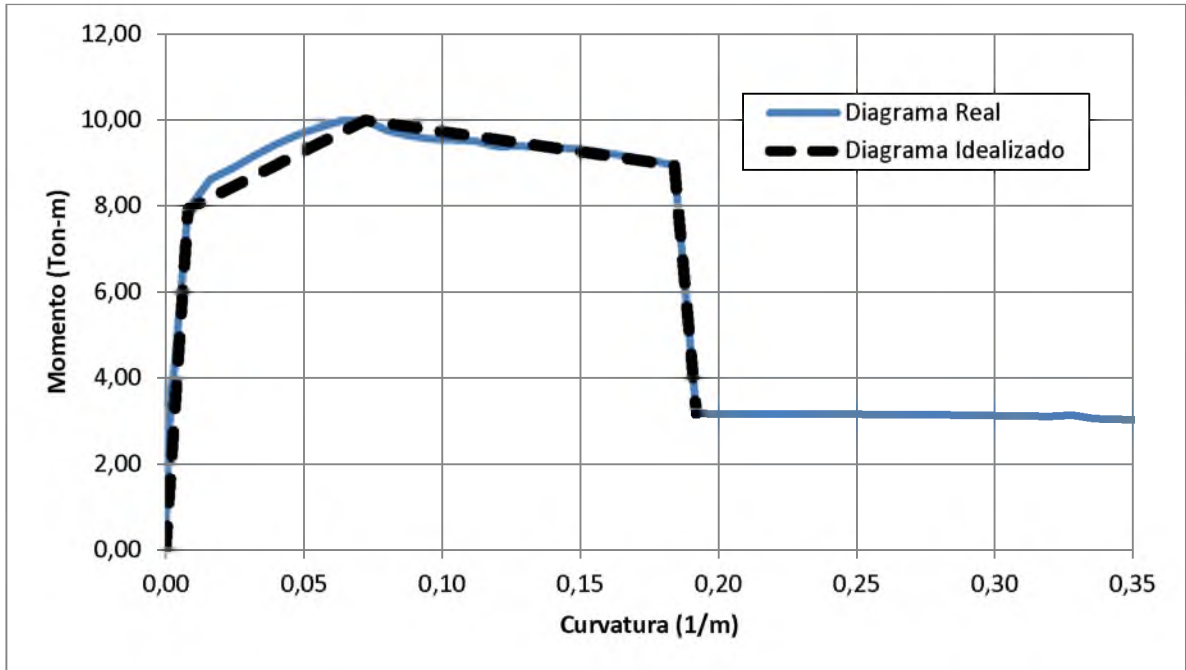
TRABAJO DE GRADO

DIAGRAMA MOMENTO – CURVATURA (KSU_RC)

COLUMNA ESQUINERA DE 40X30

P= 10,50 Ton, $F_y=2800 \text{ kg/cm}^2$, Armado= 10 ϕ 14 mm

DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (1/m)	Momento (Ton-m)
0	0
0,008	7,922
0,072	9,995
0,184	8,944
0,192	3,167



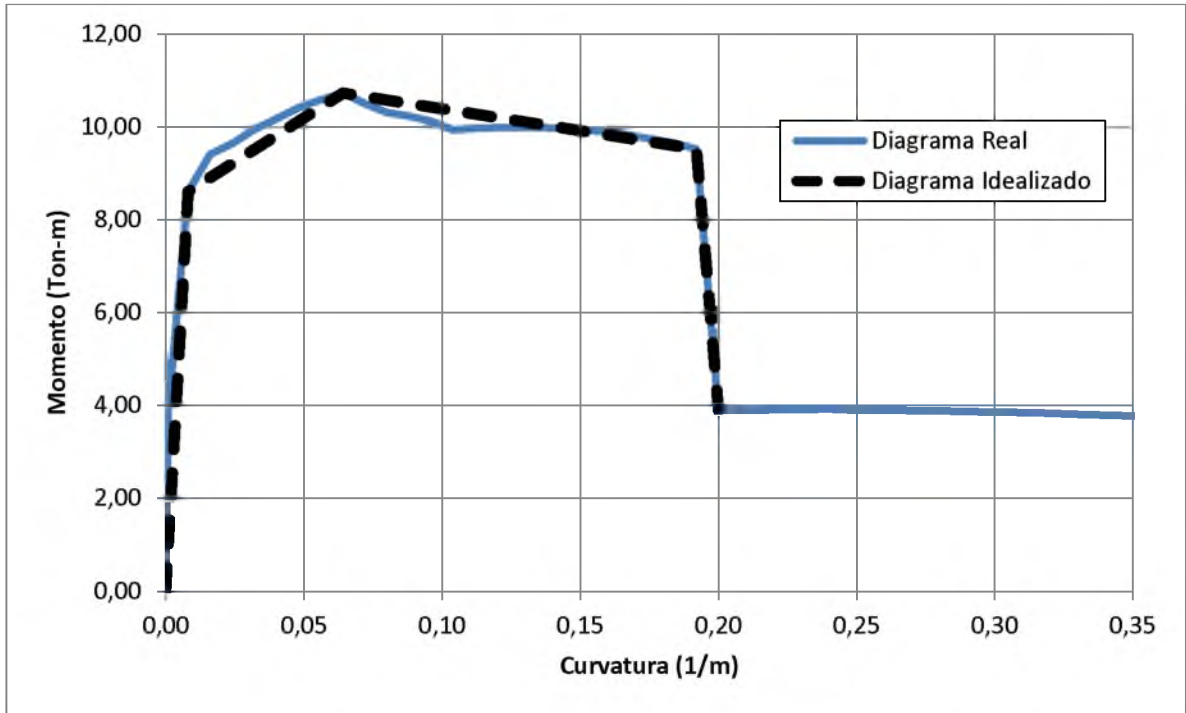
. TRABAJO DE GRADO

DIAGRAMA MOMENTO – CURVATURA (KSU_RC)

COLUMNA INTERIOR DE 40X30

P= 15,20 Ton, $F_y=2800 \text{ kg/cm}^2$, Armado= 10 ϕ 14 mm

DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (1/m)	Momento (Ton-m)
0	0
0,008	8,607
0,064	10,725
0,192	9,518
0,200	3,891



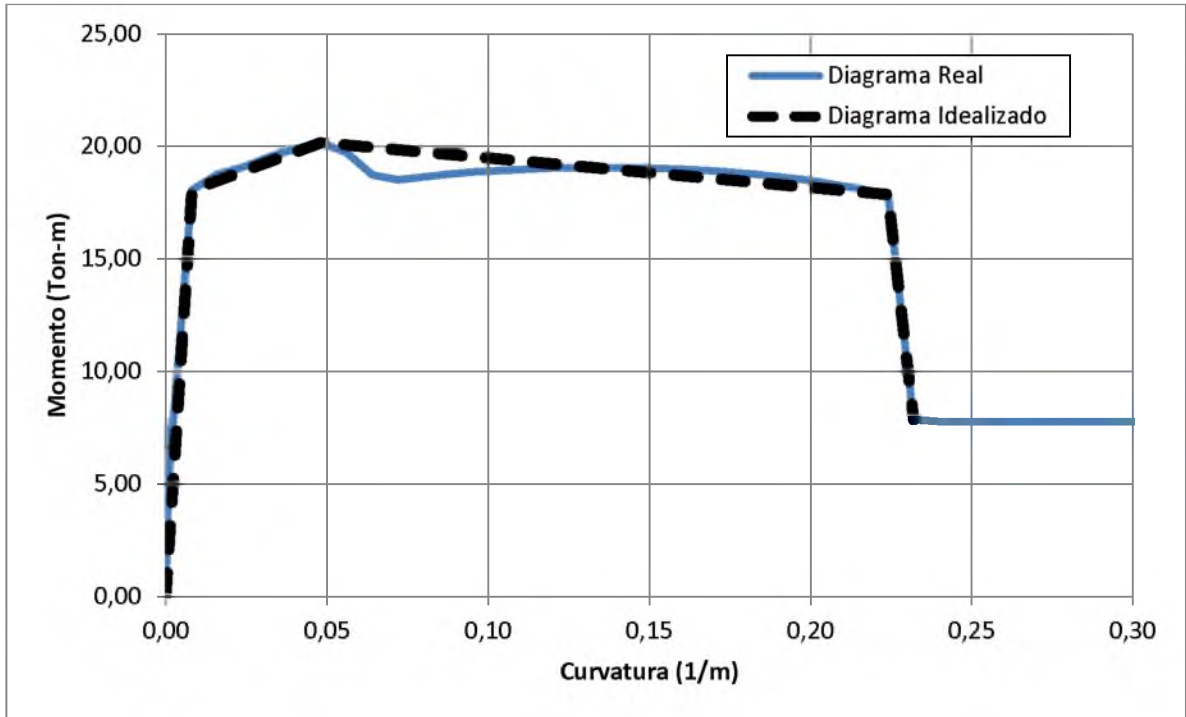
TRABAJO DE GRADO

DIAGRAMA MOMENTO – CURVATURA (KSU_RC)

COLUMNA BORDE DE 40X40

P= 55 Ton, $F_y=2800 \text{ kg/cm}^2$, Armado= 4 ϕ 28 mm

DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (1/m)	Momento (Ton-m)
0	0
0,008	18,070
0,048	20,171
0,224	17,873
0,232	7,854



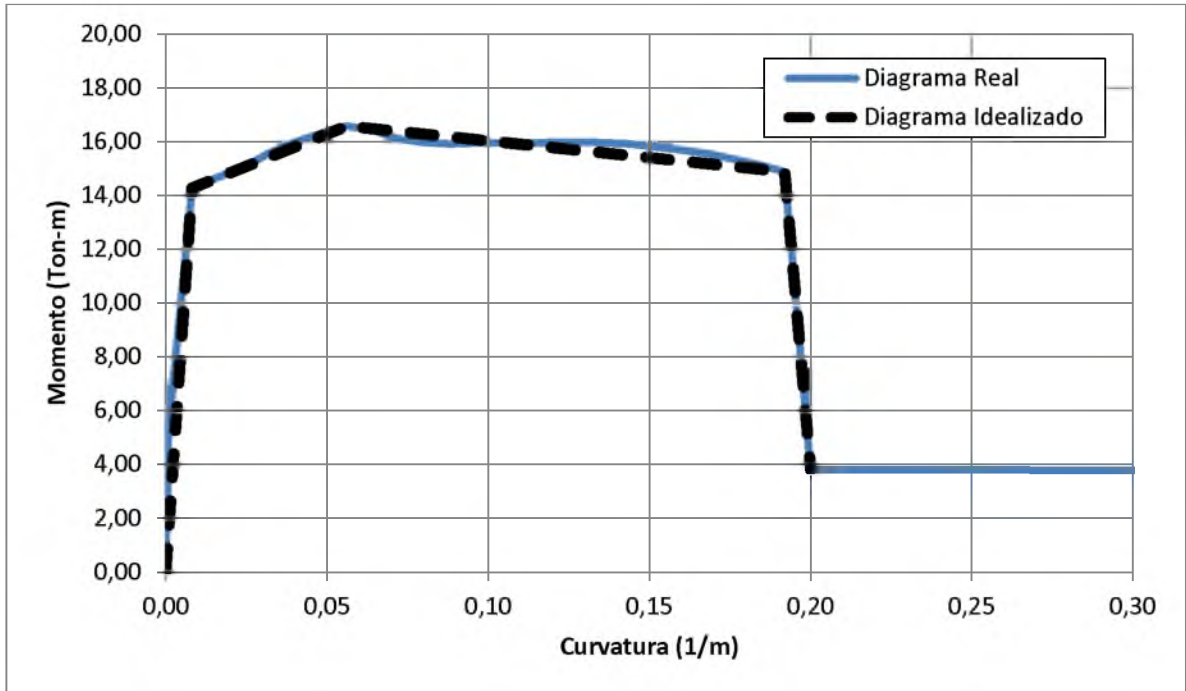
TRABAJO DE GRADO

DIAGRAMA MOMENTO – CURVATURA (KSU_RC)

COLUMNA ESQUINERA DE 40X40

P= 25,60 Ton, $F_y=2800 \text{ kg/cm}^2$, Armado= 4 ϕ 28 mm

DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (1/m)	Momento (Ton-m)
0	0
0,008	14,265
0,056	16,577
0,192	14,874
0,200	3,802



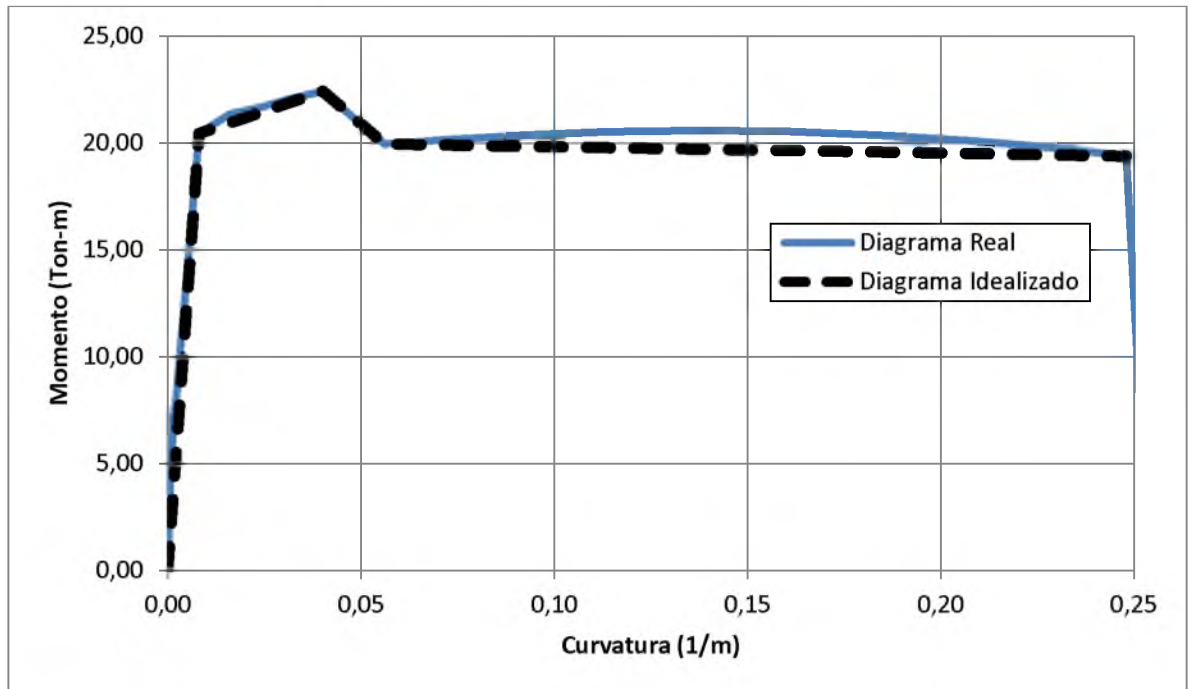
TRABAJO DE GRADO

DIAGRAMA MOMENTO – CURVATURA (KSU_RC)

COLUMNA INTERIOR DE 40X40

P= 75 Ton, $F_y=2800 \text{ kg/cm}^2$, Armado= 4 ϕ 28 mm

DIAGRAMA IDEAL	
Curvatura (1/m)	Momento (Ton-m)
0	0
0,008	20,431
0,040	22,415
0,056	19,941
0,248	19,382

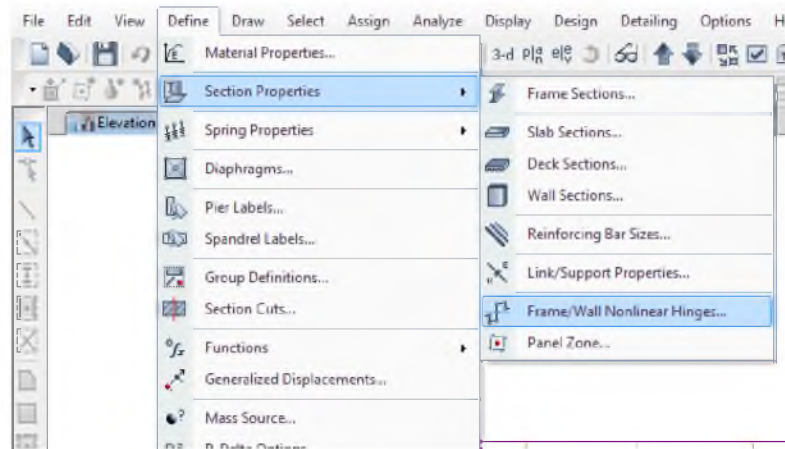


APENDICE B

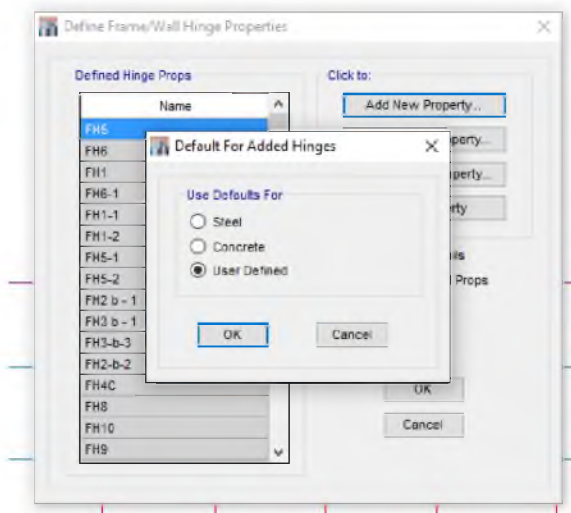
PASOS PARA DEFINICIÓN DE ROTULAS PLÁSTICAS DE LAS COLUMNAS EN ETABS 2015

Para definir las rotulas plásticas en el modelo estructural se deben de seguir los siguientes pasos:

1. Hacemos clic en *Define- Section Properties- Frame/Wall Nonlinear Hinges*

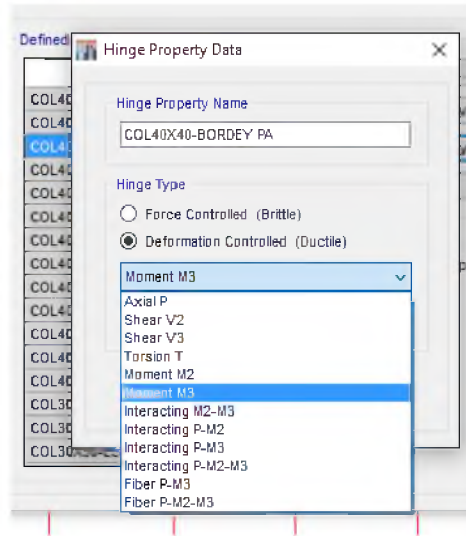


2. Aparecerá una ventana en la cual podremos definir la rótula plástica, para esto damos clic en *Add New Property-User Define*, y luego damos clic en *ok*.

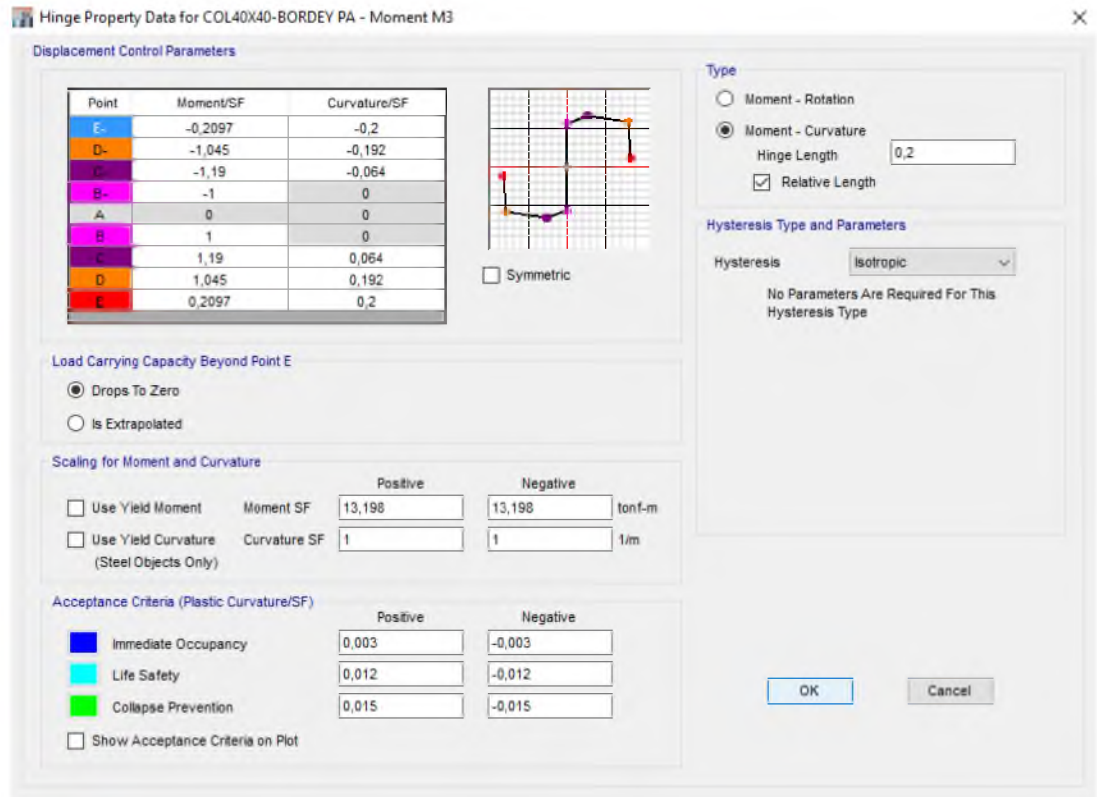


3. En la siguiente ventana se da nombre a la rótula y además se define el tipo de rotula que se desea, en el caso de las vigas conservamos las ya definidas en el trabajo de grado anterior por lo ya antes explicado. Las columnas por su parte habían sido definidas como interacción P-M2-M3, en este tipo de rotula se utiliza una superficie de interacción calculada por el programa la cual no se sabe con exactitud lo que el programa realiza, debido a esto se decidió utilizar rotulas tipo M2 y M3 en las

cuales se sabe lo que el programa está realizando ya que se generan las rotulas a partir del momento de fluencia ingresado. Para esto se da clic en Deformation Controlled (Ductile), luego se da clic en la flecha donde se despliega una lista con los tipos de rotulas, escogemos tipo M3 y luego hacemos lo mismo pero con tipo M2.

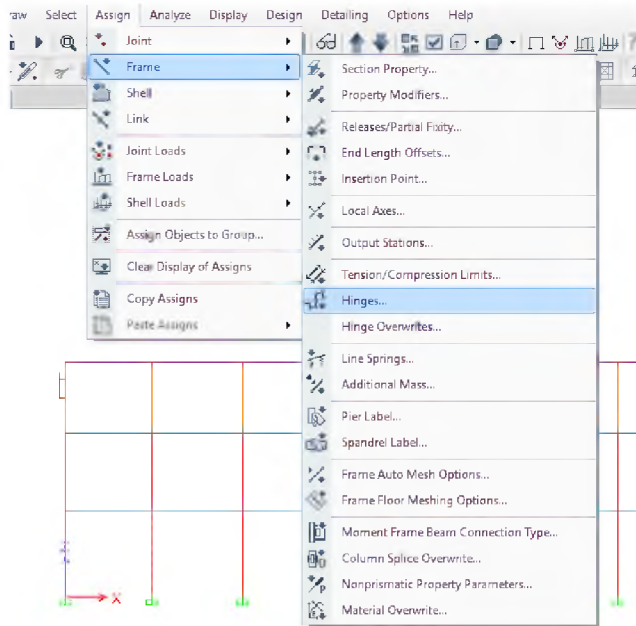


4. Aparece una ventana en la cual se ingresa el diagrama de momento-curvatura idealizado, el momento de fluencia, la longitud de la rótula plástica y se escoge el tipo de Histéresis.

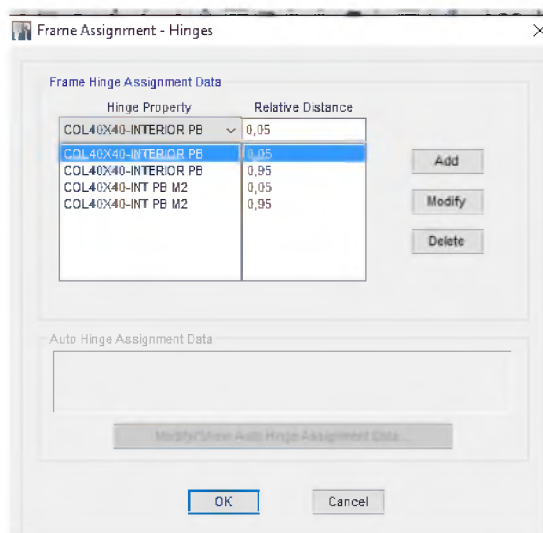


5. Repetimos estos pasos para cada tipo de columna.

6. Luego se asignaran las rotulas en las columnas, para esto se seleccionaran las columnas que se desean asignarle una de las rotulas ya antes definidas, una vez seleccionadas las columnas nos dirigimos a *Assign - Frame - Hinges*.



7. Aparecerá una ventana en la cual se asignaran las rotulas que tienen ese grupo de columnas seleccionadas anteriormente, se asignaran a 0.05 de la altura de la columna y a 0.95 de la altura de la columna, es decir dos rotulas tipo M2 y dos rotulas tipo M3.





Presidencia
de la República
del Ecuador



Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes



SENESCYT

Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, Dunn Arias, Kevin Bertín, con C.C: # 0926931346 autor del trabajo de titulación: **Rehabilitación estructural de la facultad de ingeniería mediante aisladores sísmicos**, previo a la obtención del título de **INGENIERO CIVIL** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 21 de marzo de 2016

f. _____

Nombre: Dunn Arias, Kevin Bertín

C.C: 0926931346

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	REHABILITACIÓN ESTRUCTURAL DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA MEDIANTE AISLADORES SÍSMICOS		
AUTOR(ES)	DUNN ARIAS, KEVIN BERTÍN		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	ING. HERNÁNDEZ BARREDO, JAIME FRANCISCO		
INSTITUCIÓN:	UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL		
FACULTAD:	FACULTAD DE INGENIERÍA		
CARRERA:	INGENIERÍA CIVIL		
TÍTULO OBTENIDO:	INGENIERO CIVIL		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	21 DE MARZO DEL 2016	NO. DE PÁGINAS:	283
ÁREAS TEMÁTICAS:	ESTRUCTURAS		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	REHABILITACIÓN, DESEMPEÑO, SISMOS, PUSHOVER, CAPACIDAD, AISLADORES.		
RESUMEN/ABSTRACT	<p>La Rehabilitación Estructural es requerida cuando una estructura no cumple con los Niveles de Desempeño Sísmico estipulado en los Códigos. Este trabajo plantea la Rehabilitación Estructural de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil mediante Aisladores Sísmicos. Para esto se realizaron Análisis Estático No Lineales (Pushover) para la obtención de la Capacidad del Edificio. Para la obtención del Punto de Desempeño se realizaron el Método de los Coeficientes (ASCE 41-06) y el Método Espectro de Capacidad (FEMA 440). Mediante pruebas se definieron las propiedades no lineales de los aisladores buscando que el edificio mejore su desempeño sísmico tanto para el Sismo Raro como para el Sismo muy Raro del NEC 15. El Nivel de Desempeño Sísmico para el Sismo Raro fue de Ocupación Inmediata y para el Sismo muy Raro de Seguridad de Vida, por lo que se puede anticipar poco daño ante esos sismos.</p>		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593- 992146155	E-mail: kevindunnarias93@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN:	Nombre: ING. HERNÁNDEZ BARREDO, JAIME FRANCISCO		
	Teléfono: +593-4-202763		
	E-mail: jaime.hernandez@cu.uscg.edu.ec		

SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA

Nº. DE REGISTRO (en base a datos):	
Nº. DE CLASIFICACIÓN:	
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):	