



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**EXPERIMENTACIÓN Y SIMULACIÓN
COMPUTACIONAL DEL TRÁNSITO PEATONAL**

Autor: D. Fernando Juan Álvarez-Touchard Vita

Tutor: D. Antolín Lorenzana Ibán

Valladolid, Mayo, 2022

RESUMEN:

Durante el desarrollo del presente trabajo se va a estudiar la respuesta dinámica de una estructura esbelta sometida a tránsitos peatonales. Como modelo de referencia se tomará una plataforma real de 13.5 m.

A partir de los datos registrados mediante ensayos experimentales realizados sobre la misma, se procederá a realizar un modelo digital en el software de cálculo "SAP2000" que represente tanto la estructura real como el efecto del tránsito del peatón.

Una vez se tiene el modelo calibrado, se pueden realizar todo tipo de simulaciones variando las hipótesis de carga, para analizar la evolución de la estructura. Estos valores se pueden tomar como válidos y representativos, ya que el modelo computacional se ha ajustado a la realidad en alguno de los casos ensayados.

De esta manera queda de manifiesto la importancia del cálculo computacional, permitiendo reducir tiempos de trabajo y costes económicos asociados al estudio del diseño de estructuras.

ABSTRACT:

During the development of this work, the dynamic response of a slender structure subjected to pedestrian traffic will be studied. A real 13.5 m platform will be used as a reference model.

From the data recorded by means of experimental tests carried out on it, a digital model will be created in the calculation software "SAP2000" that represents both the real structure and the effect of pedestrian traffic.

Once the model has been calibrated, all kinds of simulations can be carried out, varying the load hypotheses, to analyse the evolution of the structure. These values can be taken as valid and representative, since the computational model has been adjusted to reality in some of the cases tested.

In this way, the importance of computational calculation is demonstrated, allowing the reduction of working time and economic costs associated with the study of the design of structures.

PALABRAS CLAVE:

Plataforma peatonal

Software de cálculo "SAP2000"

Análisis dinámico

Tránsito peatonal

ÍNDICE:

1.	Introducción y objetivos	1
1.1.	Introducción	1
1.2.	Objetivos	2
2.	Antecedentes	3
2.1.	Antecedentes formativos.....	3
2.2.	Trabajo e investigación desarrollado en el Laboratorio de Estructuras de la EII de la UVa	3
3.	Descripción de la plataforma empleada.....	5
4.	Descripción ensayos experimentales de la plataforma.....	7
4.1.	Instrumentación	7
4.2.	Descripción previa de los ensayos experimentales necesarios para el calibrado.....	10
4.2.1.	Introducción ensayos experimentales	10
4.2.2.	Ensayos experimentales realizados para calibrar la plataforma digital.....	10
4.2.3.	Ensayos experimentales (comprobación del “gemelo digital” y su calibrado)	11
5.	Calibrado de la pasarela en el software de cálculo “SAP2000”	13
5.1.	Software de cálculo empleado	13
5.2.	Ajuste y calibrado de la plataforma real en el software “SAP2000”	13
5.2.1.	Descripción de las características del modelo de la plataforma en “SAP2000”	13
5.2.2.	Comparación ensayos experimentales y simulación	15
5.3.	Ajuste y calibrado del amortiguamiento para las simulaciones	23
5.3.1.	Ajuste del amortiguamiento para las FRFs.....	24
5.3.2.	Ajuste del amortiguamiento para el resto de las simulaciones.....	27
6.	Simulaciones de verificación realizadas en el software de cálculo “SAP2000”	31
6.1.	Modelos S, D, P, R y realista de carga peatonal	36
6.2.	Caso pisadas medianas a 90 ppm.....	38

6.2.1.	Caso “Shaker”	38
6.2.2.	Caso deslizante	46
6.2.3.	Caso pulsante	53
6.2.4.	Caso robot	56
6.2.5.	Caso tránsito peatonal real	63
7.	Simulaciones de aplicación posteriores al calibrado del modelo digital de la plataforma	71
7.1.	Tránsito real M pero con el peatón con el doble de peso	72
7.2.	Tránsito real M pero con el peatón con la mitad de peso	73
7.3.	Tránsito real M pero el peatón caminado justo sobre el extremo lateral de la plataforma	74
7.4.	Tránsitos simplificados laterales	75
7.4.1.	Caso “Shaker” lateral	75
7.4.2.	Caso deslizante lateral	76
7.4.3.	Caso pulsante lateral.....	77
7.4.4.	Caso robot lateral	78
7.5.	Tránsito peatonal de dos peatones	80
7.5.1.	Caso dos peatones andando a la vez, mismo tamaño de pisada y frecuencia de paso.....	82
7.5.2.	Caso dos peatones a la vez, mismo tamaño de pisada, diferente frecuencia de paso.....	85
7.6.	Flujos peatonales.....	90
8.	Simulaciones de diseño	93
8.1.	Caso “Shaker” 2 peatones a 90 ppm ambos y pisadas medianas	96
8.2.	Caso “Shaker” 2 peatones a 90 ppm y 115 ppm y pisadas medianas.....	98
8.3.	Caso “Shaker” 2 peatones a 90 ppm y 143 ppm pisadas medianas	99
8.4.	Caso Pulsante 2 peatones a 90 ppm ambos, pisadas medianas y misma dirección.....	100
8.5.	Caso Pulsante 2 peatones a 90 ppm ambos, pisadas medianas y opuesta dirección	103
8.6.	Caso Pulsante 2 peatones uno a 90 ppm y otro a 143 ppm, pisadas M y misma dirección	104
8.7.	Caso Pulsante 2 peatones uno a 90 ppm, otro a 143 ppm, pisadas M, opuesta dirección.....	107
9.	Conclusiones	109
	Bibliografía	112

Anexos.....	113
1. Simulaciones de verificación en “SAP2000”. Caso pisadas cortas a 90 ppm	113
1.1. Caso “Shaker”	115
1.2. Caso deslizante	118
1.3. Caso pulsante	122
1.4. Caso robot	125
1.5. Caso tránsito peatonal real	130
2. Simulaciones de aplicación posteriores al calibrado. Caso pisadas cortas.....	135
2.1. Tránsito real C pero con el peatón con el doble de peso	135
2.2. Tránsito real C pero con el peatón con la mitad de peso	136
2.3. Tránsito real C pero peatón caminado justo sobre el extremo lateral de la plataforma.....	137
2.4. Tránsitos simplificados laterales	138
2.4.1. Caso “Shaker” lateral	138
2.4.2. Caso deslizante lateral	139
2.4.3. Caso pulsante lateral.....	140
2.4.4. Caso robot lateral	141
3. Comprobación resultados mediante el software de cálculo “CsiBridge”	143

Índice de ilustraciones:

Ilustración 1. Numeración vigas plataforma laboratorio	5
Ilustración 2. Apoyo central plataforma laboratorio	6
Ilustración 3. Tarjeta adquisición de datos para los ensayos experimentales	8
Ilustración 4. Plantillas bluetooth de la marca Loadsol	9
Ilustración 5. Histograma de longitud de pisadas de un tránsito peatonal	12
Ilustración 6. Propiedades del material de la plataforma.....	14
Ilustración 7. Propiedades de la sección de la plataforma.....	15
Ilustración 8. "Load case" del ensayo F800.....	16
Ilustración 9. Desplazamiento vertical punto central F800.....	17
Ilustración 10. FRFs experimental.....	18
Ilustración 11. Shaker del laboratorio.....	18
Ilustración 12. Posición punto aplicación F14	19
Ilustración 13. Load case F14 y amortiguamientos de la plataforma	20
Ilustración 14. Display FRFs en SAP2000.....	20
Ilustración 15. FRFs SAP2000 sin eje logarítmico	21
Ilustración 16. FRF SAP2000 importado a Excel con SAP2000	21
Ilustración 17. Comparativa FRF experimental y SAP2000 con Shaker	22
Ilustración 18. FRF SAP2000 sin Shaker sin ajuste de amortiguamientos	23
Ilustración 19. "Load case" F14 con los coeficientes experimentales del amortiguamiento.....	25
Ilustración 20. Comparativa FRF SAP2000 sin Shaker con y sin ajuste de amortiguamientos.....	26
Ilustración 21. Amortiguamientos históricos experimentales	27
Ilustración 22. Frecuencia del primer modo de vibración de la plataforma en SAP2000.....	27
Ilustración 23. Frecuencia del segundo modo de vibración de la plataforma en SAP2000	28
Ilustración 24. Frecuencia del tercer modo de vibración de la plataforma en SAP2000	28
Ilustración 25. Interpolación amortiguamiento real simulaciones sin shaker	29
Ilustración 26. Amortiguamiento simulaciones pisadas medianas M	30
Ilustración 27. Desplazamiento punto central M ida y vuelta sin referenciar	32
Ilustración 28. Aceleración punto central M ida y vuelta sin referenciar	33
Ilustración 29. Desplazamiento punto central M ida sin referenciar temporalmente	33
Ilustración 30. Aceleración punto central M ida sin referenciar temporalmente.....	34
Ilustración 31. Comparativa desplazamiento vertical punto central experimental M T1 T2 T3	35
Ilustración 32. Comparativa aceleración vertical punto central experimental M T1 T2 T3	35
Ilustración 33. Modelo digital SAP2000 inicial de la plataforma	38
Ilustración 34. "Auto Area Mesh" de la plataforma	38
Ilustración 35. Función Fuerza Pondera caso Shaker M	40
Ilustración 36. Load case Shaker M	41
Ilustración 37. "Joint Plot Function"	42
Ilustración 38. Desplazamiento punto central caso Shaker M.....	42
Ilustración 39. Aceleración punto central caso Shaker M.....	43
Ilustración 40. Comparativa desplazamiento punto central caso Shaker M.....	43
Ilustración 41. Comparativa aceleración punto central caso Shaker M	44
Ilustración 42. Comparativa desplazamiento punto central caso Shaker M ponderado.....	45
Ilustración 43. Comparativa aceleración punto central caso Shaker M ponderado	45
Ilustración 44. Divide Areas de la plataforma	46
Ilustración 45. Definir "Load Patterns" del tránsito.....	46
Ilustración 46. Pisada real vs Pisada deslizante.....	47
Ilustración 47. Función fuerza caso Deslizante M	48
Ilustración 48. Punto aplicación de la carga unidad caso Deslizante M	48
Ilustración 49. Load case caso Deslizante M	49

Ilustración 50. Comparativa desplazamiento punto central caso Deslizante M	50
Ilustración 51. Comparativa aceleración punto central caso Deslizante M	51
Ilustración 52. Comparativa desplazamiento punto central caso Deslizante M ponderado	52
Ilustración 53. Comparativa aceleración punto central caso Deslizante M ponderado	52
Ilustración 54. Load case caso pulsante M.....	53
Ilustración 55. Comparativa desplazamiento punto central caso Pulsante M.....	54
Ilustración 56. Comparativa aceleración punto central caso Pulsante M.....	54
Ilustración 57. Comparativa desplazamiento punto central caso Pulsante M ponderado.....	55
Ilustración 58. Comparativa aceleración punto central caso Pulsante M ponderado.....	55
Ilustración 59. Fuerza de las pisadas M a 90 ppm T1	56
Ilustración 60. Función fuerza Paso D6 caso Robot 1 paso M.....	57
Ilustración 61. Comparativa desplazamiento punto central caso Robot 1 paso D6 M.....	58
Ilustración 62. Comparativa aceleración punto central caso Robot 1 paso D6 M	58
Ilustración 63. Comparativa desplazamiento punto central caso Robot 1 paso D6 M ponderado.....	59
Ilustración 64. Comparativa aceleración punto central caso Robot 1 paso D6 M ponderado	59
Ilustración 65. Función fuerza paso I6 caso Robot 2 pasos M.....	60
Ilustración 66. Comparativa desplazamiento punto central caso Robot 2 pasos D6 I6 M	61
Ilustración 67. Comparativa aceleración punto central caso Robot 2 pasos D6 I6 M	61
Ilustración 68. Comparativa desplazamiento punto central caso Robot 2 pasos D6 I6 M ponderado ..	62
Ilustración 69. Comparativa aceleración punto central caso Robot 2 pasos D6 I6 M ponderado	62
Ilustración 70. Fuerza Pisadas experimentales M 90 ppm T1 sin referenciar.....	63
Ilustración 71. Fuerza Pisadas experimentales M 90 ppm T1 referenciada a la ida.....	64
Ilustración 72. "Load case" del tránsito peatonal real M 90 ppm	65
Ilustración 73. Comparativa desplazamiento punto central caso Tránsito peatonal real M vs T1 M ...	66
Ilustración 74. Comparativa aceleración punto central caso Tránsito peatonal real M vs T1 M	66
Ilustración 75. Fuerza de las pisadas casadas con desplazamiento experimental tránsito M 90 T1.....	67
Ilustración 76. Comparativa desplazamiento punto central caso Tránsito peatonal real M vs T1 M ponderado.....	68
Ilustración 77. Comparativa aceleración punto central caso Tránsito peatonal real M vs T1 M ponderado.....	69
Ilustración 78. Desplazamiento punto central caso Tránsito real peatonal M T1 x 2 vs T1 M.....	72
Ilustración 79. Aceleración punto central caso Tránsito real peatonal M T1 x 2 vs T1 M	72
Ilustración 80. Desplazamiento punto central caso Tránsito real peatonal M T1 x 0,5 vs T1 M.....	73
Ilustración 81. Aceleración punto central caso Tránsito real peatonal M T1 x 0,5 vs T1 M	73
Ilustración 82. Desplazamiento punto central caso Tránsito real peatonal M T1 lado derecho vs T1 M	74
Ilustración 83. Aceleración punto central caso Tránsito real peatonal M T1 lado derecho vs T1 M	74
Ilustración 84. Desplazamiento punto central caso Shaker M lateral vs T1 M	75
Ilustración 85. Aceleración punto central caso Shaker M lateral vs T1 M	75
Ilustración 86. Desplazamiento punto central caso Deslizante M lateral vs T1 M.....	76
Ilustración 87. Aceleración punto central caso Deslizante M lateral vs T1 M.....	76
Ilustración 88. Desplazamiento punto central caso Pulsante M lateral vs T1 M	77
Ilustración 89. Aceleración punto central caso Pulsante M lateral vs T1 M	77
Ilustración 90. Desplazamiento punto central caso Robot 1 paso D6 M lateral vs T1 M	78
Ilustración 91. Aceleración punto central caso Robot 1 paso D6 M lateral vs T1 M	78
Ilustración 92. Desplazamiento punto central caso Robot 2 pasos D6 I6 M lateral vs T1 M	79
Ilustración 93. Aceleración punto central caso Robot 2 pasos D6 I6 M lateral vs T1 M.....	79
Ilustración 94. Discretización plataforma para 2 peatones a la vez	80
Ilustración 95. Puntos de aplicación cargas unidad con 2 peatones	81
Ilustración 96. "Load patterns" para 2 peatones mismo tamaño de pisada y frecuencia de paso	82

Ilustración 97. "Load case" tránsito peatonal 2 peatones mismo tamaño de pisada y misma frecuencia de paso.....	82
Ilustración 98. Desplazamiento 2 peatones M 90 ppm misma dirección vs T1 M real experimental...	83
Ilustración 99. Aceleración 2 peatones M 90 ppm misma dirección vs T1 M real experimental.....	83
Ilustración 100. Desplazamiento 2 peatones M 90 opuesta dirección vs T1 M real experimental.....	84
Ilustración 101. Aceleración 2 peatones M 90 ppm opuesta dirección vs T1 M real experimental	84
Ilustración 102. "Load patterns" flujo peatonal mismo tamaño de pisada pero diferente frecuencia de paso.....	86
Ilustración 103. "Load case" tránsito peatonal 2 peatones mismo tamaño de pisada, pero diferente frecuencia de paso.....	86
Ilustración 104. Desplazamiento 2 peatones M 90 y 115 misma dirección vs T1 M real experimental	88
Ilustración 105. Aceleración 2 peatones M 90 y 115 ppm misma dirección vs T1 M real experimental	88
Ilustración 106. Desplazamiento 2 peatones M 90 y 115 opuesta dirección vs T1 M real experimental	89
Ilustración 107. Aceleración 2 peatones M 90 y 115 ppm opuesta dirección vs T1 M real experimental	89
Ilustración 108. Punto aplicación carga unidad de "load pattern" del flujo peatonal de 2 peatones...	90
Ilustración 109. "Load case" flujo peatonal 2 peatones M a 90 ppm con 3 segundos de retraso temporal.....	91
Ilustración 110. Desplazamiento flujo peatonal 2 p M 90 ppm misma dirección 3s vs T1 M 90 experimental	92
Ilustración 111. Aceleración flujo peatonal 2 p M 90 ppm misma dirección 3s vs T1 M 90 experimental	92
Ilustración 112. "Load case" caso 2 "Shaker" M 90	96
Ilustración 113. Comparativa desplazamiento caso 2 "Shaker" M 90 vs "Shaker" M 90.....	97
Ilustración 114. Comparativa aceleración caso 2 "Shaker" M 90 vs "Shaker" M 90	97
Ilustración 115. Comparativa desplazamiento caso 2 "Shaker" M 90 115 vs "Shaker" M 90	98
Ilustración 116. Comparativa aceleración caso 2 "Shaker" M 90 115 vs "Shaker" M 90.....	98
Ilustración 117. Comparativa desplazamiento caso 2 "Shaker" M 90 143 vs "Shaker" M 90	99
Ilustración 118. Comparativa aceleración caso 2 "Shaker" M 90 143 vs "Shaker" M 90.....	99
Ilustración 119. Función de fuerza Pulsante M 90 ppm.....	100
Ilustración 120. "Load case" caso 2 Pulsantes M 90	101
Ilustración 121. Comparativa desplazamiento caso 2 Pulsantes M 90 misma dirección vs Pulsante M 90	101
Ilustración 122. Comparativa aceleración caso 2 Pulsantes M 90 misma dirección vs Pulsante M 90	102
Ilustración 123. Comparativa desplazamiento caso 2 Pulsantes M 90 opuesta dirección vs Pulsante M 90	103
Ilustración 124. Comparativa aceleración caso 2 Pulsantes M 90 opuesta dirección vs Pulsante M 90	103
Ilustración 125. Función de fuerza Pulsante M 143 ppm.....	104
Ilustración 126. "Load case" caso 2 Pulsante M 90 143.....	105
Ilustración 127. Comparativa desplazamiento caso 2 Pulsantes M 90 143 misma dirección vs Pulsante M 90	105
Ilustración 128. Comparativa aceleración caso 2 Pulsantes M 90 143 misma dirección vs Pulsante M 90	106
Ilustración 129. Comparativa desplazamiento caso 2 Pulsantes M 90 143 opuesta dirección vs Pulsante M 90.....	107
Ilustración 130. Comparativa aceleración caso 2 Pulsantes M 90 143 misma dirección vs Pulsante M 90	107

Ilustración 131. Desplazamiento punto central C ida sin referenciar temporalmente	113
Ilustración 132. Aceleración punto central C ida sin referenciar temporalmente	113
Ilustración 133. Comparativa desplazamiento vertical punto central experimental C T4 T5 T6	114
Ilustración 134. Comparativa aceleración vertical punto central experimental C T4 T5 T6	114
Ilustración 135. Comparativa desplazamiento punto central caso Shaker C vs T4 C	116
Ilustración 136. Comparativa aceleración punto central caso Shaker C vs T4 C	116
Ilustración 137. Comparativa desplazamiento punto central caso Shaker C vs T4 C ponderado	117
Ilustración 138. Comparativa aceleración punto central caso Shaker C vs T4 C ponderado	117
Ilustración 139. Función fuerza caso Deslizante C	118
Ilustración 140. "Load case" caso Deslizante C	119
Ilustración 141. Comparativa desplazamiento punto central caso Deslizante C vs T4 C	119
Ilustración 142. Comparativa aceleración punto central caso Deslizante C vs T4 C	120
Ilustración 143. Comparativa desplazamiento punto central caso Deslizante C vs T4 C ponderado ..	120
Ilustración 144. Comparativa aceleración punto central caso Deslizante C vs T4 C ponderado	121
Ilustración 145. "Load case" caso pulsante C	122
Ilustración 146. Comparativa desplazamiento punto central caso Pulsante C vs T4 C	123
Ilustración 147. Comparativa aceleración punto central caso Pulsante C vs T4 C	123
Ilustración 148. Comparativa desplazamiento punto central caso Pulsante C vs T4 C ponderado	124
Ilustración 149. Comparativa aceleración punto central caso Pulsante C vs T4 C ponderado	124
Ilustración 150. Comparativa desplazamiento punto central caso Robot 1 paso D6 C vs T4 C	125
Ilustración 151. Comparativa aceleración punto central caso Robot 1 paso D6 C vs T4 C	126
Ilustración 152. Comparativa desplazamiento punto central caso Robot 1 paso D6 C vs T4 C ponderado	126
Ilustración 153. Comparativa aceleración pto central caso Robot 1 paso D6 C vs T4 C ponderado ...	127
Ilustración 154. Comparativa desplazamiento punto central caso Robot 2 pasos D6 I6 C vs T4 C	128
Ilustración 155. Comparativa aceleración punto central caso Robot 2 pasos D6 I6 C vs T4 C	128
Ilustración 156. Comparativa desplazamiento punto central caso Robot 2 pasos D6 I6 C vs T4 C ponderado	129
Ilustración 157. Comparativa aceleración pto central caso Robot 2 p D6 I6 C vs T4 C ponderado	129
Ilustración 158. Fuerza Pisadas experimentales C 90 ppm T4 sin referenciar	130
Ilustración 159. Fuerza Pisadas experimentales C 90 ppm T4 referenciada a la ida	130
Ilustración 160. Comparativa desplazamiento punto central caso Tránsito peatonal real C vs T4 C ..	132
Ilustración 161. Comparativa desplazamiento punto central caso Tránsito peatonal real C vs T4 C ..	132
Ilustración 162. Fuerza de las pisadas casadas con desplazamiento experimental tránsito C 90 T4 ..	133
Ilustración 163. Comparativa desplazamiento punto central caso Tránsito peatonal real C vs T4 C ponderado	134
Ilustración 164. Comparativa aceleración punto central caso Tránsito peatonal real C vs T4 C ponderado	134
Ilustración 165. Desplazamiento punto central caso Tránsito real peatonal C T4 x 2 vs T4 C	135
Ilustración 166. Aceleración punto central caso Tránsito real peatonal C T4 x 2 vs T4 C	135
Ilustración 167. Desplazamiento punto central caso Tránsito real peatonal C T4 x 0,5 vs T4 C	136
Ilustración 168. Aceleración punto central caso Tránsito real peatonal C T4 x 0,5 vs T4 C	136
Ilustración 169. Desplazamiento punto central caso Tránsito real peatonal C T4 lado derecho vs T4 C	137
Ilustración 170. Aceleración punto central caso Tránsito real peatonal C T4 lado derecho vs T4 C ...	137
Ilustración 171. Desplazamiento punto central caso Shaker C lateral vs T4 C	138
Ilustración 172. Aceleración punto central caso Shaker C lateral vs T4 C	138
Ilustración 173. Desplazamiento punto central caso Deslizante C lateral vs T4 C	139
Ilustración 174. Aceleración punto central caso Deslizante C lateral vs T4 C	139
Ilustración 175. Desplazamiento punto central caso Pulsante C lateral vs T4 C	140
Ilustración 176. Aceleración punto central caso Pulsante C lateral vs T4 C	140

Ilustración 177. Desplazamiento punto central caso Robot 1 paso D6 C lateral vs T4 C.....	141
Ilustración 178. Aceleración punto central caso Robot 1 paso D6 C lateral vs T4 C.....	141
Ilustración 179. Desplazamiento punto central caso Robot 2 pasos D6 I6 C lateral vs T4 C.....	142
Ilustración 180. Aceleración punto central caso Robot 2 pasos D6 I6 C lateral vs T4 C	142
Ilustración 181. Menú principal CsiBridge	143
Ilustración 182. Exportar fichero SAP2000 a archivo ".S2k"	144
Ilustración 183. Lista a exportar a archivo ".S2k" en SAP2000.....	144
Ilustración 184. Abrir archivo ".S2k" con el bloc de notas del PC.....	145
Ilustración 185. Equiparar versiones entre SAP2000 y CsiBridge.....	145
Ilustración 186. Importar fichero ".txt" en CsiBridge	146
Ilustración 187. Seleccionar archivo ".txt" para abrirlo en CsiBridge	146
Ilustración 188. Aceptar tipo de importación a CsiBridge	147
Ilustración 189. Lista de errores, avisos, informes al importar a CsiBridge	147
Ilustración 190. "Run analysis" CsiBridge.....	148
Ilustración 191. "Show plot functions" en CsiBridge	148
Ilustración 192. Comprobación desplazamiento T1 M 90 real entre SAP2000, CsiBridge y experimental	149
Ilustración 193. Comprobación aceleración T1 M 90 real entre SAP2000, CsiBridge y experimental	150
Ilustración 194. Comprobación desplazamiento T4 C 90 real -SAP2000, CsiBridge y experimental...	150
Ilustración 195. Comprobación aceleración T4 C 90 real entre SAP2000, CsiBridge y experimental .	151

Índice de Tablas:

Tabla 1. Características de la madera de construcción de la plataforma	5
Tabla 2. Valores "SAP2000"	14
Tabla 3. Cálculo "arrival time" pisadas M 90 ppm.....	65
Tabla 4. Calculo valores "arrival time" pisadas M a 115 ppm	85
Tabla 5. Cálculo "arrival time" pisadas C 90 ppm	131

Índice de Ecuaciones:

Ecuación 1. Segunda Ley de Newton	9
Ecuación 2. Amortiguamientos de Rayleigh.....	24
Ecuación 3. Función de fuerza SETRA	39
Ecuación 4. Cálculo tiempo que se tarda en recorrer la plataforma	39
Ecuación 5. Cálculo tiempo que se tarda en recorrer la plataforma en función de la frecuencia de paso y la longitud de la pisada	94
Ecuación 6. Cálculo longitud de la pisada en función del número de pasos.....	94
Este valor es el que se debe introducir en el término " T_{Total} " de la ecuación "Ecuación 7. Función de fuerza SETRA"	94

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS:

1.1. Introducción:

La necesidad de superar determinados obstáculos naturales y artificiales para permitir la movilidad de las personas ha hecho que se hayan desarrollado y optimizado diferentes estructuras cada vez más esbeltas y ligeras, como es el caso de las pasarelas peatonales.

Que estas pasarelas reduzcan su peso y aumenten a la par su esbeltez tiene muchas ventajas, pero también tiene una clara contraprestación relacionada con el aumento de vibraciones debido al tránsito de las personas que se mueven sobre las mismas.

Todas estas vibraciones en definitiva son movimientos que se generan en la pasarela con el paso de las personas, que pueden llevar asociadas un conjunto de sensaciones a los propios peatones que las generan o a otros usuarios de la plataforma.

Por lo tanto, el objetivo de multitud de estudios relacionados con este tema es mejorar la sensación y el bienestar de los ciudadanos, para aumentar la seguridad y el nivel de satisfacción durante su utilización.

Todo esto hace que no solo el diseño y la construcción de las mismas sean importantes, sino que el mantenimiento tiene también un papel determinante.

Los avances en las técnicas de diseño y construcción hacen que las pasarelas sean más esbeltas y más ligeras, pero por tanto menos amortiguadas, además las tendencias constructivas buscan trabajar con factores de seguridad más reducidos, aumentando aún más las vibraciones.

Después de todo lo anterior queda de manifiesto que las cargas que generan las personas al caminar, es decir, el tránsito peatonal, o incluso de vehículos, corresponden con factores dinámicos que afectan a la estructura y a la respuesta que esta presenta.

Estos factores dinámicos deben ser estudiados y tenidos en cuenta para tener la certeza de que el diseño y la construcción de la estructura cumplirán con las prestaciones para las que está dimensionada.

Todos estos estudios se han visto notablemente simplificados gracias a la simulación computacional, que permite realizar casi cualquier tipo de ensayo para entender la respuesta de la estructura ante determinadas situaciones de carga reales, con mayor o menor grado de exactitud.

Las situaciones de carga a estudiar permiten simular ensayos no destructivos sobre la estructura y determinar la máxima sollicitación de cargas que esta puede soportar o qué tipo de carga es más perjudicial para el diseño seleccionado de la plataforma.

En definitiva, las simulaciones permiten someter a diferentes casos de carga la estructura que se está estudiando, pero como es lógico estos resultados serán más fidedignos cuanto más realistas sean las condiciones de ensayo introducidas en el modelo digital.

Como condiciones de diseño, se debe tener en cuenta el caso de carga, es decir, representar la carga lo más similar a la realidad, pero, además se deben ajustar correctamente los parámetros dimensionales y características de la estructura.

Por lo tanto, si se tiene una representación fidedigna de la realidad, los resultados de las simulaciones se pueden aplicar a la realidad para condicionar su diseño y construcción en función de las solicitudes y el uso de cualquier estructura real.

1.2. Objetivos:

Con la realización del presente Trabajo de Fin de Máster se pretenden alcanzar los siguientes objetivos, que servirán como guía durante todo el documento:

- Conseguir un “gemelo digital” de la plataforma peatonal ubicada en el Laboratorio de Estructuras de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid en la Sede Paseo del Cauce.

Es decir, conseguir representar en el software de simulación seleccionado, en este caso “SAP2000”, las propiedades y características de dicha estructura, de manera que responda lo más parecido a la realidad.

- Simular diferentes tránsitos peatonales para comparar los resultados que se obtienen mediante el software de cálculo con los medidos experimentalmente en el laboratorio.
- Realizar diferentes simulaciones, que de manera experimental no resultan posibles o no se han realizado por diferentes motivos, que permitan entender el comportamiento de la estructura y su respuesta real.

Y estar prevenidos ante situaciones no experimentales como flujos peatonales, tránsitos grupales, acciones vandálicas, etc.

2. ANTECEDENTES:

2.1. Antecedentes formativos:

En el desarrollo del grado en Ingeniería Mecánica y el Máster de Ingeniería Industrial se han cursado determinadas asignaturas que han permitido adquirir el conocimiento en el ámbito de estructuras, necesario para llevar a cabo el presente trabajo.

Dentro de todas las asignaturas cursadas se podrían destacar aquellas que están relacionadas de una manera o de otra con el diseño y estudio de estructuras:

- Resistencia de Materiales (2º Curso del grado)
- Elasticidad y resistencia de los materiales I y II (3º Curso del grado)
- Máquinas y mecanismos (3º Curso del grado)
- Diseño de máquinas (3º Curso del grado)
- Estructuras industriales (4º Curso del grado)
- Estructuras de hormigón (4º Curso del grado, asignatura optativa)
- Estructuras y construcciones industriales (2º Curso del máster)

A lo largo de todas estas asignaturas se han adquirido conocimientos en cuanto a materiales de construcción, estudios de flexión, torsión y pandeo, respuesta de estructuras, tensiones y deformaciones que estas presentan ante determinados casos de carga, junto con el estudio de las vibraciones que se producen en las estructuras.

La gran mayoría de los análisis realizados en estas asignaturas están limitados a casos estáticos de carga, sin apenas profundizar en la respuesta de las estructuras ante casos de carga dinámica.

Es decir, tras realizar este Trabajo de Fin de Máster, además de aplicar los conocimientos desarrollados y aprendidos a lo largo de este tiempo, se busca entender y estudiar casos de carga dinámicos.

Al fin y al cabo, un peatón al caminar por una determinada estructura es una masa que debido a la aceleración que lleva, genera una serie de fuerzas dinámicas sobre la estructura, las cuales varían con el tiempo a medida que progresa la marcha.

2.2. Trabajo e investigación desarrollado en el Laboratorio de Estructuras de la EII de la UVa:

El presente proyecto se ha desarrollado con la tutela del departamento de CAITMMCyTE, en el laboratorio de estructuras, en el cual se dispone del equipamiento y las instalaciones necesarias para poder desarrollar su actividad de investigación dentro del ámbito de las estructuras esbeltas, cargas dinámicas y disipación de vibraciones.

Para el desarrollo de este trabajo, se dispone de una plataforma peatonal sita en dicho laboratorio que junto con un software de adquisición de datos y los equipos necesarios, permite realizar ensayos experimentales para estudiar cómo responde la estructura ante determinados casos de carga.

Tras realizar el modelo de dicha plataforma mediante Elementos Finitos y calibrar correctamente la misma, se pueden comparar los resultados obtenidos con los experimentales.

Además, poder realizar nuevos ensayos que de manera experimental no son posibles o no se han realizado por determinados motivos, que permiten entender cómo reacciona la estructura para optimizar su diseño y su utilización.

En definitiva, los ensayos experimentales realizados para casos de carga concretos permiten verificar que el diseño y la simulación que se realiza mediante el software de cálculo son correctos.

Para de esta manera poder aplicar los resultados de las simulaciones en la realidad, sin necesidad de realizarlos de manera experimental, o bien por su imposibilidad o para optimizar el tiempo de trabajo.

3. DESCRIPCIÓN DE LA PLATAFORMA EMPLEADA:

Como se ha explicado anteriormente, la plataforma que va a ser empleada como referencia durante todo el proyecto se encuentra ubicada en la sede de Paseo del Cauce de la EII de la Uva. Está construida en madera y tiene una longitud de 13,5 m, las características constructivas del conjunto de la estructura se detallan a continuación:

- Material y dimensiones:

Se trata de una plataforma construida en madera de abeto laminada, formada por 10 vigas de sección nominal de 100 x 140 mm² y con una longitud total de 13,5 m.

En cada viga hay 13 perforaciones de 12 mm de diámetro equidistantes y centradas (1,1125 m de separación longitudinal y 0,075 m de recubrimiento en cada extremo).

Una completa descripción de la plataforma del laboratorio se puede consultar en la referencia [1]. En la Ilustración 1 se muestra una imagen del conjunto: [1]



Ilustración 1. Numeración vigas plataforma laboratorio

Las características del material (madera de abeto laminado GL-24 h) con la que se encuentran construidas las vigas que componen la plataforma se definen en la tabla 1: [2]

Clases de resistencia	GL 24c	GL 24h	GL 28c	GL 30h
Módulo de elasticidad $E //_{\text{mean}}$	11.000 N/mm ²	11.500 N/mm ²	12.500 N/mm ²	13.600 N/mm ²
$E \perp_{\text{mean}}$	300 N/mm ²	300 N/mm ²	300 N/mm ²	300 N/mm ²
Módulo de empuje G_{mean}	650 N/mm ²	650 N/mm ²	650 N/mm ²	650 N/mm ²
Resistencia a la flexión $\sigma_{0,05}$	24 N/mm ²	24 N/mm ²	28 N/mm ²	30 N/mm ²
Resistencia a la tracción $\sigma_{\perp // 0,05}$	17 N/mm ²	19,2 N/mm ²	19,5 N/mm ²	24 N/mm ²
$\sigma_{\perp \perp 0,05}$	0,5 N/mm ²	0,5 N/mm ²	0,5 N/mm ²	0,5 N/mm ²
Resistencia a la presión $\sigma_{c // 0,05}$	21,5 N/mm ²	24 N/mm ²	24 N/mm ²	30 N/mm ²
$\sigma_{c \perp 0,05}$	2,5 N/mm ²	2,5 N/mm ²	2,5 N/mm ²	2,5 N/mm ²
Selección de las láminas	DIN 4074: T 1 S 7 / S 10 EN 338: C 18 EN 14080:2013: T 9 / T 14	DIN 4074: T 1 S 10 EN 338: C 24 EN 14080:2013: T 14	DIN 4074: T 1 S 10 / S 13 EN 338: C 24 / C 35 EN 14080:2013: T 14 / T 21	EN 14080:2013: T 22
Encolado	según EN 301/302, para todas las clases de empleo según EN 14080:2013			
Producción	según EN 14080:2013, clases de empleo 1 y 2 (lámina hasta 45 mm de espesor), clase de empleo 3 (lámina hasta 35 mm), conforme a la CE según EN 14080:2013			
Calidad de la superficie	calidad vista o industrial según ÖNORM B 2215			
Tolerancias de medidas	según EN 14080:2013 anchura, altura \pm 2 mm, longitud \pm 0,5 %			

Tabla 1. Características de la madera de construcción de la plataforma

- Sujeción de la plataforma:

En los dos extremos de la plataforma se encuentran los dos durmientes que permiten la sujeción y el descanso de la misma sobre el suelo, de dimensiones $100 \times 140 \text{ mm}^2$ de sección nominal, nuevamente contruidos en madera de abeto laminada. Tienen una separación respecto del suelo de 28 cm. Este tipo de apoyo corresponde con un apoyo fijo para dicha estructura, es decir, restringe los desplazamientos, pero no los giros.

Para completar la sujeción de la plataforma, además de los dos apoyos fijos que forman ambos durmientes, esta descansa en su parte central sobre unos muelles de tracción, que generan una rigidez total de 20000 N/m aproximadamente en cada lado (ilustración 2).

En la ilustración 2, se puede observar la anterior configuración que corresponde con el apoyo central de la plataforma (apoyo elástico):



Ilustración 2. Apoyo central plataforma laboratorio

En definitiva, la plataforma que servirá como referencia a lo largo de este proyecto y de la que se buscará obtener un “gemelo digital” sobre el que realizar simulaciones que se correspondan con situaciones hipotéticas de la realidad, consta de dos apoyos fijos en ambos extremos y un apoyo elástico en el centro del vano por cada lado de la plataforma.

4. DESCRIPCIÓN ENSAYOS EXPERIMENTALES DE LA PLATAFORMA:

4.1. Instrumentación:

Para realizar los ensayos experimentales sobre la plataforma del laboratorio, al igual que para la toma y adquisición de datos, es necesario disponer además de la plataforma de referencia, del equipamiento que permita registrar las entradas y salidas de datos en cada ensayo realizado.

- Instrumentación necesaria para las salidas del sistema:

Como salidas de la experimentación se seleccionan los desplazamientos verticales y aceleraciones que sufren determinados puntos de la plataforma, tomando como referencia el centro del vano, es decir, el punto central de la plataforma.

Para medir estos datos es necesario disponer de una serie de instrumentos:

- Acelerómetros:

Se trata de los dispositivos necesarios para medir la amplitud de la aceleración (m/s^2) de las vibraciones que se producen en la viga, permiten medir la aceleración en el eje vertical (eje "z").

La salida real de estos es un voltaje, pero se transforma en aceleración para poder interpretar los resultados.

El modelo empleado es "MEAS 711" de 1000 mV/g y de tipo piezoeléctrico.

Se colocan varios a lo largo de toda la plataforma, aunque para el desarrollo de este trabajo solo es necesario el que se encuentra situado en el centro de la misma.

- Dispositivo láser:

Es empleado para medir el incremento de desplazamiento que sufre la viga. Se coloca en el centro del vano de la viga para obtener la flecha de este punto.

➤ Tarjeta de adquisición de datos:

Se utiliza para trasladar la información proporcionada por los anteriores sensores hasta un ordenador donde poder registrarla y posteriormente procesarla.

Las características de la misma son las siguientes: tiene 16 entradas del tipo D-SUB para poder conectar todos los sensores, una salida tipo USB-C para conectar al PC, la entrada de la alimentación de corriente y una salida para alimentar a los sensores.

La tarjeta de adquisición de datos es la de la ilustración 3, el modelo es: “SIRIUS HD-SGT”.

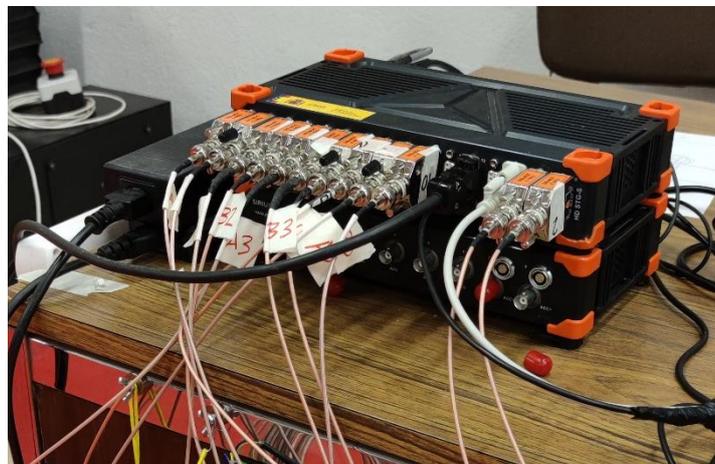


Ilustración 3. Tarjeta adquisición de datos para los ensayos experimentales

➤ Software de adquisición de datos:

Permite registrar y procesar los datos que proporcionan los anteriores sensores, dispone de una interfaz que permite visualizar en tiempo real la información de dichos sensores, realizar determinadas operaciones con ella, como exportar los datos a otros formatos para poder trabajar más adelante sobre ellos.

El software utilizado es “DEWESoft X2 versión SP10”

- Instrumentación necesaria para las entradas al sistema:

Como entradas al sistema se ha seleccionado la fuerza sobre la plataforma, esta puede ser de diferentes formas, desde puntual hasta representar un tránsito de un peatón, en el epígrafe “4.2.3. Ensayos experimentales (comprobación del “gemelo digital” y su calibrado)” se describen los ensayos realizados:

- Shaker:

Se coloca un acelerómetro en la masa móvil del “Shaker” (este instrumento se puede observar en la ilustración 11), esta masa es de 40 kg, junto con el valor medido de la aceleración permiten calcular la fuerza aplicada mediante la ecuación 1:

$$F = m \cdot a$$

Ecuación 1. Segunda Ley de Newton

- Plantillas bluetooth de fuerza:

Se trata de un dispositivo que permite registrar la fuerza resultante que genera un peatón al caminar.

Se debe calzar al pie de una persona mientras camina por la plataforma para determinar la fuerza resultante en cada instante, en función de la persona y de la forma de caminar.

La información espacial del punto de aplicación de cada pisada, no se puede medir. Al ser necesaria para estudiar el tránsito peatonal, se han colocado a lo largo de la plataforma unas pegatinas para marcar los puntos donde pisar durante el ensayo experimental en función del tamaño de la pisada.

Se ha utilizado el modelo “Loadsol” de la empresa “Novel” que se puede observar en la ilustración 4 [3]. Se trata de un sensor capaz de realizar la medición móvil de la reacción normal del suelo en la superficie plantar del pie y permiten obtener información de la cinética del cuerpo que se está midiendo.



Ilustración 4. Plantillas bluetooth de la marca Loadsol

4.2. Descripción previa de los ensayos experimentales necesarios para el calibrado:

4.2.1. Introducción ensayos experimentales:

Una vez se conocen las características y propiedades de la plataforma de referencia y los elementos y sensores que permiten realizar los diferentes tipos de ensayos experimentales, se va a proceder a detallar los mismos.

Dichos ensayos permiten obtener un “gemelo digital” de la plataforma real en el software de cálculo, comparando los resultados que este proporciona con los experimentales medidos.

Después de esto, se podrá considerar que el modelo que se está simulando corresponde con la plataforma real. Cuanta mayor similitud haya entre los resultados obtenidos, mejor estará calibrado, y, por tanto, mayor validez se podrá dar a los resultados de las simulaciones que posteriormente se realicen.

La calibración de la plataforma de referencia tiene vital importancia, puesto que el objetivo fundamental de este proyecto consiste en realizar ensayos que no han sido realizados de manera experimental, para estudiar cómo es la respuesta de la estructura ante una determinada situación de carga.

En definitiva, realizar una correcta comparativa entre los resultados obtenidos experimentalmente y los que proporciona el software de cálculo, determinará la validez y aplicación de los resultados de las simulaciones que se realicen posteriormente.

4.2.2. Ensayos experimentales realizados para calibrar la plataforma digital:

Se han realizado los siguientes ensayos experimentales para poder calibrar el modelo digital (en el epígrafe “5. Calibrado de la pasarela en el software de cálculo “SAP2000” se detallan en profundidad):

- Determinación de la masa total de la plataforma mediante el pesaje de la misma.
- Análisis modal experimental:

Este ensayo consiste de forma experimental en obtener las FRFs (Función de respuesta en frecuencia) en las que la entrada es la fuerza ejercida por el “shaker” y las salidas son las aceleraciones de los distintos acelerómetros instalados a lo largo de la plataforma.

Tras el correspondiente análisis se consigue determinar para cada modo de vibración su frecuencia propia, su forma y su amortiguamiento modal.
- Aplicación de una masa puntual en el centro de la plataforma:

En este ensayo se aplica una masa de 784 kg en el centro de la plataforma, para medir la flecha (desplazamiento vertical) que se produce en el punto central de la misma.

Mediante los tres ensayos anteriores es posible calibrar los valores reales de la plataforma para tener un modelo digital representativo de la realidad.

4.2.3. Ensayos experimentales (comprobación del “gemelo digital” y su calibrado):

Mediante determinadas comparativas con los resultados obtenidos de ensayos experimentales, se comprobará si la calibración realizada es correcta, es decir, si el modelo representa la realidad.

Para ello se realizan los siguientes ensayos experimentales, en el epígrafe “6. Simulaciones de verificación realizadas en el software de cálculo “SAP2000” se detallan en profundidad:

Tránsito peatón real:

Consiste en que peatón real ande sobre la plataforma del laboratorio. Se busca obtener la respuesta de la plataforma ante un tránsito peatonal real.

Es decir, como las fuerzas y la masa del peatón influyen en el desplazamiento y aceleración de los puntos de la estructura.

Para ello, se deben monitorizar tanto las pisadas del peatón como la evolución de los puntos de la plataforma:

- Puntos de la plataforma: en determinados puntos de la misma se encuentran localizados acelerómetros y células láser que permiten medir la aceleración y el desplazamiento vertical respectivamente. Se toma como referencia el punto central de la plataforma.
- Pisadas del peatón en el tiempo: se colocan unas plantillas bluetooth en los pies del peatón, de esta manera se registra el valor de la fuerza que ejerce el peatón en cada pisada con una determinada frecuencia de muestreo como se ha especificado anteriormente.

Es decir, se obtiene una representación temporal de la fuerza que genera cada uno de los pies (función de la fuerza de cada pisada) en los puntos de la plataforma donde afecta cada paso, marcados con las pegatinas.

Es importante también conocer la posición en la que se pisa, por eso espacialmente se tienen identificados los puntos en función de la zancada.

De esta forma se refleja la influencia del peatón andando de manera “realista” sobre la plataforma. No corresponde del todo con unas condiciones teóricas debido a que el peatón no realiza pisadas siempre de la misma longitud, ni en el mismo instante de tiempo ni estas corresponden con fuerzas puntuales. A pesar de esto se consideran hipótesis que afectarán poco a los resultados obtenidos.

Además, la plataforma puede no estar en reposo absoluto cuando se inicia la marcha.

Las simulaciones se han realizado con pisadas de tamaño mediano de longitud 0.75 m (18 pasos) y corto de longitud 0.675 m (20 pasos). Los detalles de estas se especifican en el epígrafe “6. Simulaciones de verificación realizadas en el software de cálculo “SAP2000” cuando se comparan con los resultados proporcionados por el software de cálculo.

Este ensayo se puede realizar a determinados valores de paso por minuto (ppm) de las pisadas, los valores que se estudian son a 90, 115 y 143 ppm.

La razón de seleccionar estas frecuencias, se basa en que 90 ppm es una frecuencia de paso lenta, 115 ppm es un paso normal, y 143 ppm es la frecuencia de paso que produce la resonancia del primer modo de vibración de la plataforma (en el epígrafe “5.3. Ajuste y calibrado del amortiguamiento para las simulaciones” se especifica este valor y en el epígrafe “6. Simulaciones de verificación realizadas en el software de cálculo “SAP2000” se detalla cómo se calcula).

En la ilustración 5 [4] se puede observar la longitud de la pisada general para un tránsito peatonal lento, normal y rápido:

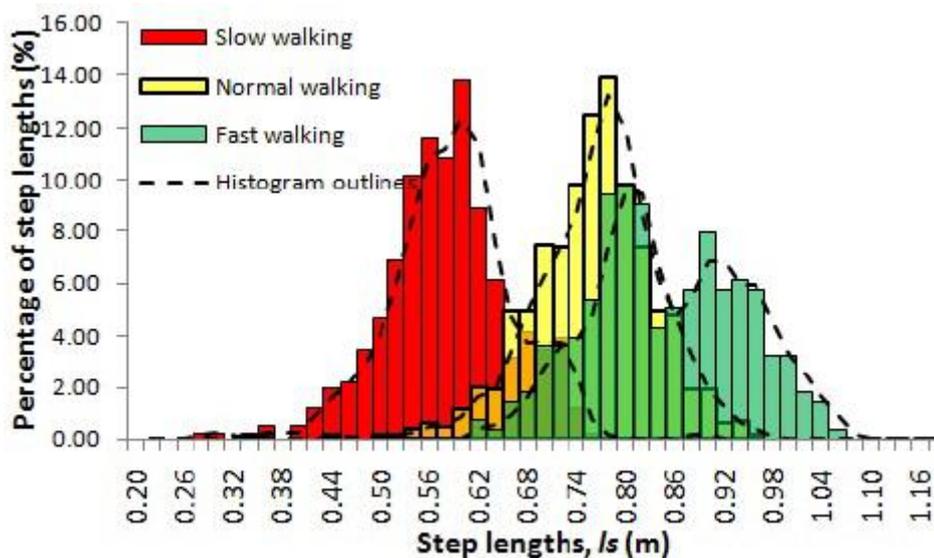


Ilustración 5. Histograma de longitud de pisadas de un tránsito peatonal

Para ello se debe usar un cronómetro que permite mediante una señal acústica ajustar la velocidad de los pasos a las frecuencias de estudio.

En el epígrafe “5.3. Ajuste y calibrado del amortiguamiento para las simulaciones” se especifica el valor de las frecuencias propias para los tres primeros modos de vibración de la plataforma.

En el epígrafe “6. Simulaciones de verificación realizadas en el software de cálculo “SAP2000” se representa el valor del desplazamiento y la aceleración registrados durante los ensayos experimentales realizados en la plataforma del laboratorio.

5. CALIBRADO DE LA PASARELA EN EL SOFTWARE DE CÁLCULO “SAP2000”:

5.1. Software de cálculo empleado:

El software de cálculo empleado en este proyecto es “SAP2000 v21”, se trata de un programa de cálculo de estructuras basado en elementos finitos y empleado a nivel internacional.

Combina una interfaz 3D con el modelado, análisis y dimensionamiento de estructuras. Se trata de un software versátil en cuanto a posibilidades de diseño y en cuanto a combinaciones de casos de carga [6].

Gracias a su gran versatilidad permite realizar ensayos dinámicos, estáticos, envolventes de carga, cargas fijas y móviles, aplicación de normativa, entre otros aspectos.

En definitiva, este software de cálculo permite desarrollar todos los objetivos de este proyecto, con determinadas limitaciones que se irán comentando a lo largo del desarrollo del mismo.

5.2. Ajuste y calibrado de la plataforma real en el software “SAP2000”:

A continuación, se detallará como se ha procedido a realizar el calibrado de la plataforma.[12]

Como se ha comentado anteriormente se deben realizar un conjunto de ensayos experimentales que comparados con los obtenidos mediante el software de cálculo validen el calibrado correcto del modelo.

Una vez hecho esto y verificado por tanto el “gemelo digital”, se pueden realizar diferentes tipos de simulaciones que permiten obtener resultados que representan la realidad.

Para calibrar correctamente la pasarela peatonal del laboratorio, lo que se busca es reproducir con la mayor precisión sus características constructivas.

Algunas pueden conocerse directamente, pero hay otras en las cuales es necesario recurrir a determinados ensayos para poder determinarlas.

5.2.1. Descripción de las características del modelo de la plataforma en “SAP2000”:

Los parámetros que se deben introducir en el software de cálculo SAP2000 son los siguientes:

1. Dimensiones: tiene 13,5 m de longitud (eje “x”) y 1 m de anchura (eje “y”).

Por tanto, se ha diseñado un modelo tipo “Shell” (lámina) de 13,5 m en dirección “x”, 1 m de anchura en el eje “y”, y el eje “z” es el eje vertical.

2. Masa de la plataforma: 855 kg_z está relacionada con sus dimensiones y la densidad del material con la que está construida.

3. Deflexión bajo carga estática:

Consiste en el ensayo de aplicación de una masa puntual de 784 kg en el centro de la plataforma, con este incremento de carga se mide un incremento de flexión de 83,4 mm.

4. Análisis modal experimental (EMA: "experimental modal análisis"):

Este ensayo permite conocer las FRFs y para cada modo de vibración conocer su forma modal, su frecuencia y su amortiguamiento.

Con los datos anteriores (tras el ajuste del modelo) se pueden ajustar las siguientes características del material con los valores indicados en la tabla 2:

E=módulo de Young o de elasticidad	$E_x=E_y=E_z= 1,28 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$
G=módulo de cizalladura	$G= 2,76 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$
rho= densidad lineal	$\rho= 452,38 \text{ (}\gamma = 4437,85\text{)}$

Tabla 2. Valores "SAP2000"

Estos valores se introducen en el software de cálculo de la siguiente forma como se puede observar en la ilustración 6:

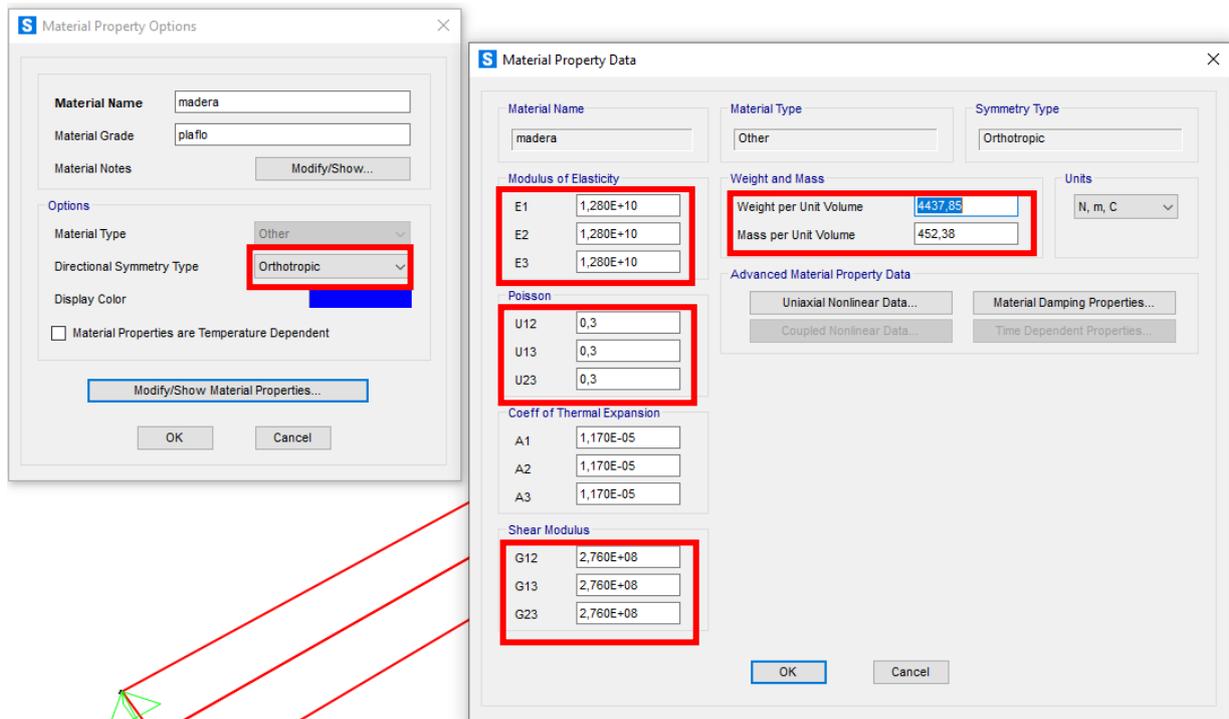


Ilustración 6. Propiedades del material de la plataforma

- Modelo SHELL (lámina, “thick”): de 140 mm de dimensión, se introduce en “SAP2000” de la siguiente manera como se muestra en la ilustración 7:

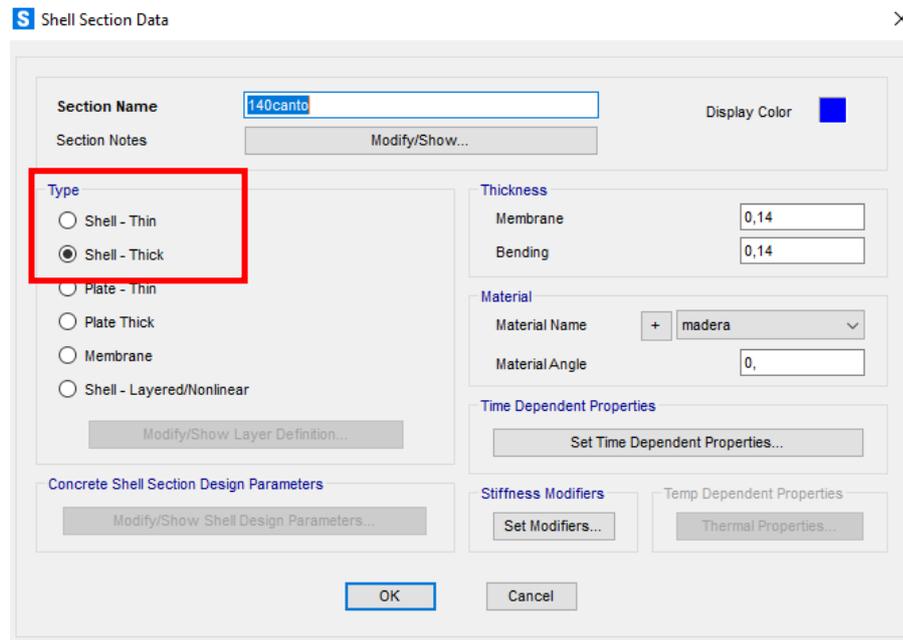


Ilustración 7. Propiedades de la sección de la plataforma

- Tiene 4 apoyos fijos en los dos extremos, estos restringen los desplazamientos en los 3 ejes, pero dejan libres los 3 giros.
- En el centro hay 2 apoyos elásticos de valor 19500 N/m cada uno. Obtenido dicho resultado tras el ajuste del modelo.

El resto de parámetros se dejan los que proporciona por defecto el software de cálculo SAP2000.

5.2.2. Comparación ensayos experimentales y simulación:

En este epígrafe se compararán los valores obtenidos de los ensayos realizados (para el calibrado) experimentalmente con los que proporciona la simulación para asegurar que la calibración del modelo es correcta.

Se han realizado tres ensayos que han permitido determinar las características del modelo:

1. Ensayo estático de carga puntual:

- Correspondencia del ensayo experimental:

Como se ha comentado anteriormente, el ensayo consiste en aplicar una masa de 784 kg en el centro de la plataforma del laboratorio.

Mediante las células láser se mide el desplazamiento vertical obtenido, se debe restar una consigna puesto que el valor inicial (sin ninguna masa en la plataforma) que mide la célula láser es de: 0,14842078 m, debido a su posición, se obtiene: 0,23182078 m, es decir, la flecha tiene un valor de 0,0834 m = 83,4 mm.

- Correspondencia del ensayo mediante SAP2000:

Una vez definido el modelo con las características constructivas anteriormente detalladas, se debe aplicar una masa de 784 kg en el centro de la plataforma.

Por lo tanto, se debe definir un “load pattern” de tipo “other” (no tiene en cuenta la influencia del peso propio) que corresponda a una fuerza de $784 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 7691 \text{ N}$.

Se debe aplicar una carga de valor unidad en el punto central de la plataforma, asociada al patrón de carga (“load pattern”) previamente definido.

Se define un caso de carga (“load case”), como el de la ilustración 8, de tipo “static” (al tratarse de una fuerza puntual estática) relacionado con el anterior patrón de carga para poder realizar la simulación:

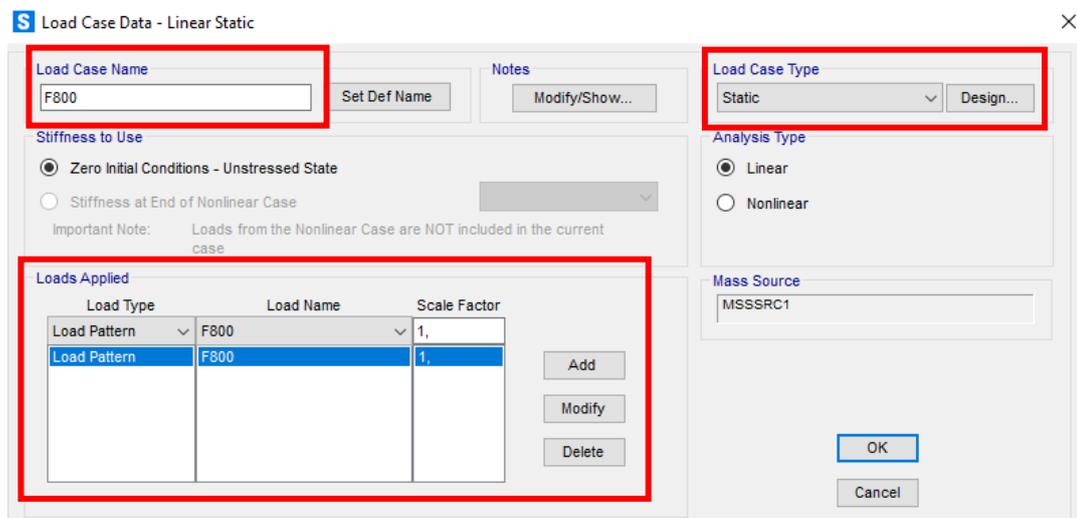


Ilustración 8. “Load case” del ensayo F800

Una vez aplicada la carga en el punto central de la plataforma, se arranca la simulación y se puede obtener el valor de la flecha del punto central, el valor obtenido reflejado en la ilustración 9 es:

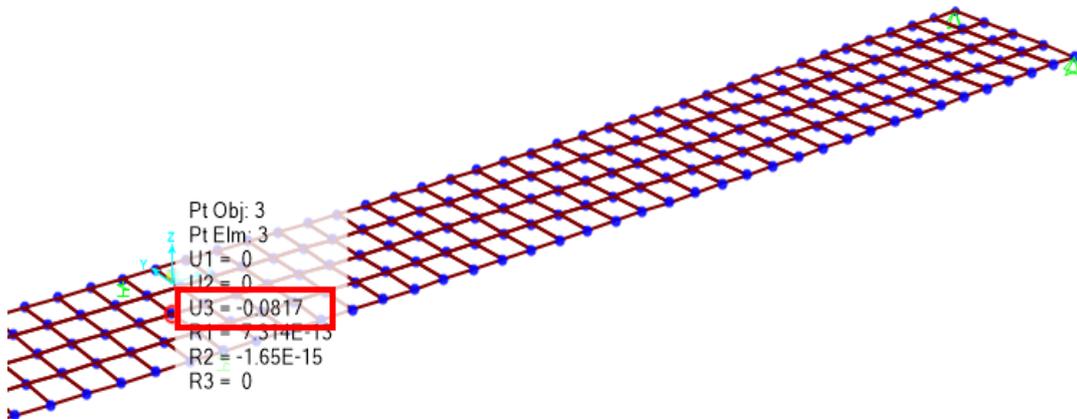


Ilustración 9. Desplazamiento vertical punto central F800

Es decir, el valor del desplazamiento vertical del punto central de la plataforma es de 0,0817 m = 81,7 mm.

El error relativo con respecto al valor objetivo (83,4 mm) es 2,04%, el cual se considera aceptable. [8]

Nótese que todos los valores que se deben calibrar no se pueden ajustar al mismo tiempo.

Además, recalcar la importancia de ajustar los valores de los modos de vibración (frecuencia, amortiguamiento y forma) del modelo digital, es decir, el análisis modal.

2. Formas modales de los tres primeros modos de vibración.

3. Ensayo de vibración de la plataforma (FRFs):

En este ensayo lo que se quiere comparar es la función de respuesta en frecuencia (FRF), esta proporciona el valor de las frecuencias de los modos de vibración de la plataforma.

- Correspondencia del ensayo experimental:

Este ensayo se denomina “EMA” (análisis modal experimental), mediante el uso de la tarjeta de adquisición de datos, los sensores instalados en la plataforma y el programa que realiza el tratamiento de los valores experimentales medidos, se obtiene la representación de las FRFs reales de la plataforma. En la ilustración 10 se muestra una de ellas:

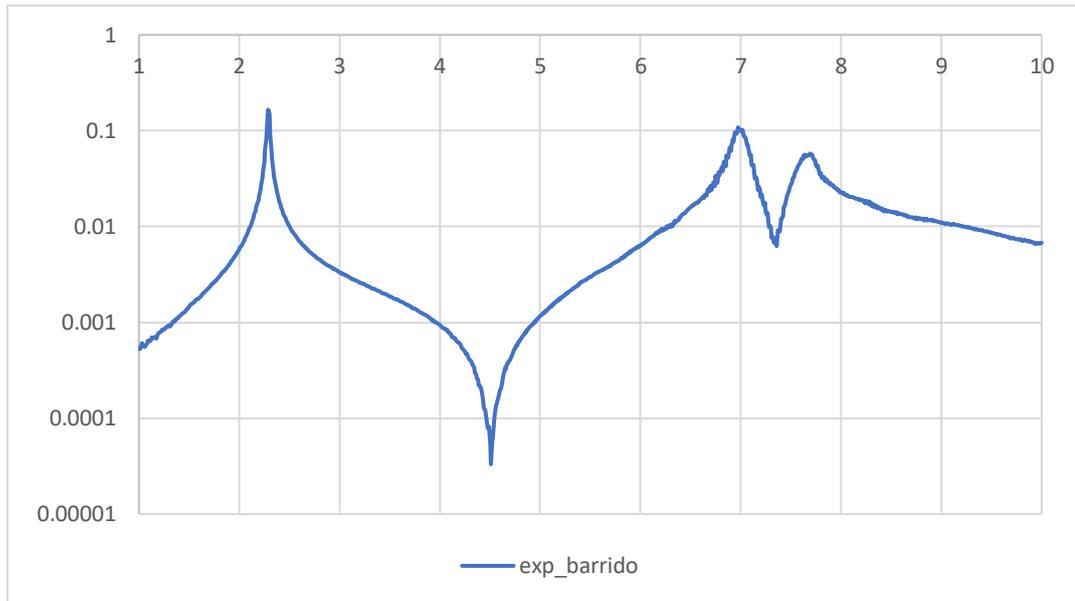


Ilustración 10. FRFs experimental

Para realizar este ensayo, se excita la plataforma mediante un instrumento llamado “shaker” que permite que la plataforma vibre, se puede observar en la ilustración 11. Este instrumento tiene una masa total de 40 kg, en el siguiente apartado se detalla en que punto de la plataforma está aplicada esta masa. [9]



Ilustración 11. Shaker del laboratorio

Con todas ellas, tras el proceso de identificación modal se obtienen los siguientes modos de vibración, con sus correspondientes frecuencias y valores de amortiguamientos:

$$w_1 = 2,3 \text{ Hz}$$

$$w_2 = 7,00 \text{ Hz}$$

$$w_3 = 7,72 \text{ Hz}$$

- Correspondencia del ensayo mediante SAP2000:

Como se ha comentado anteriormente, para mejorar el calibrado del modelo, no solo se debe asegurar que las frecuencias tengan los mismos valores, sino que el valor del amortiguamiento de la plataforma también coincida.

El amortiguamiento es un parámetro decisivo y su valor tiene gran influencia sobre los resultados obtenidos en las simulaciones posteriores. Pero no es necesario modificarlo en este punto para poder verificar la calibración previa del modelo.

Para obtener las FRFs mediante el software de cálculo SAP2000, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Definir un patrón de carga (“load pattern”) que corresponda con este ensayo, de tipo “other”, que no tiene en cuenta el peso propio de la estructura.
2. Aplicar una carga de valor unidad en el punto donde se encuentra el “shaker” en la plataforma real, este se encuentra:

En el punto marcado en la ilustración 12 se aplica una carga puntual de valor unitaria asociada al patrón de carga definido. En la plataforma real, en este punto es donde se apoya el “shaker” y, por tanto, donde afectan los 40 kg de masa del instrumento.

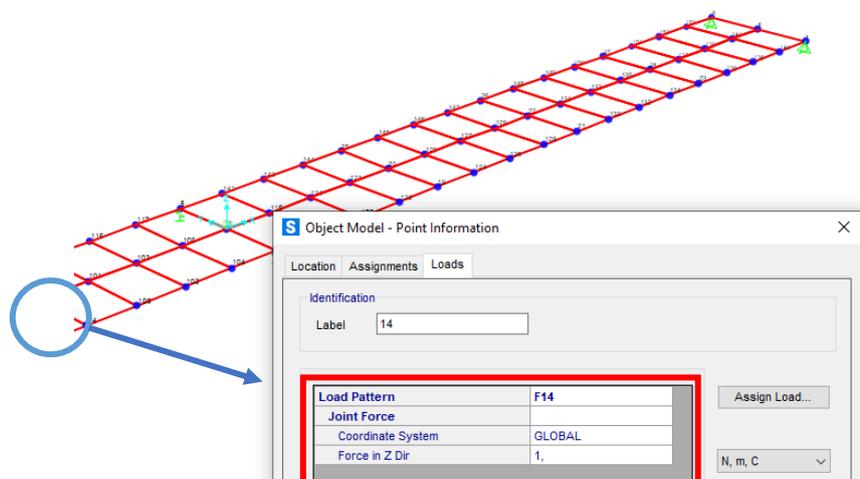


Ilustración 12. Posición punto aplicación F14

3. Definir el caso de carga (“load case”) como el de la ilustración 13 correspondiente al análisis, relacionado con el anterior patrón de carga, este caso de carga es de tipo “STEADY STATE”.

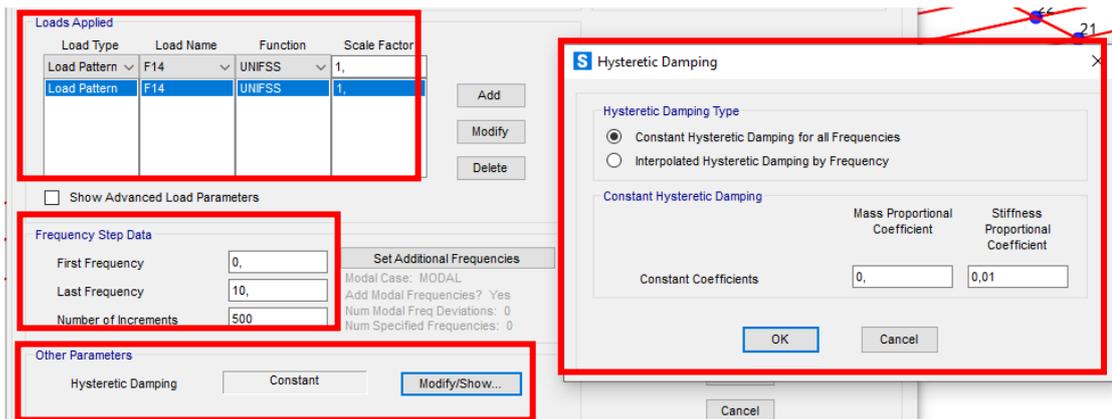


Ilustración 13. Load case F14 y amortiguamientos de la plataforma

Se seleccionan como valor de inicio de frecuencia 0 Hz y como valor final 10 Hz con 500 puntos de estudio, de esta manera se fijan los parámetros de la simulación.

Como se puede observar, el amortiguamiento de la plataforma se deja con valor constante, en el epígrafe “5.3. Ajuste y calibrado del amortiguamiento para las simulaciones” se explicará la influencia de este y como ajustar los valores a los de la plataforma real.

- Una vez se arranca la simulación se debe acceder al menú “Display” de la ilustración 14 y en “Plot/Show Functions”. Representar en valor de magnitud (“magnitude”) las FRFs (“FREQUENCY”), del punto correspondiente (en este caso punto 14 del mallado de la plataforma) como se indica a continuación:

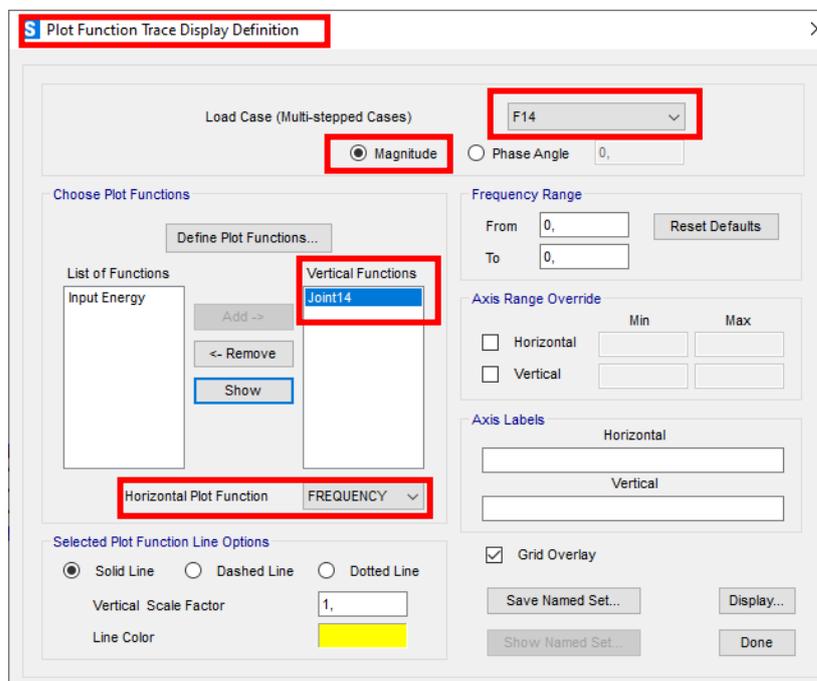


Ilustración 14. Display FRFs en SAP2000

- Finalmente se obtiene el diagrama de las FRFs como el que se muestra en la ilustración 15:

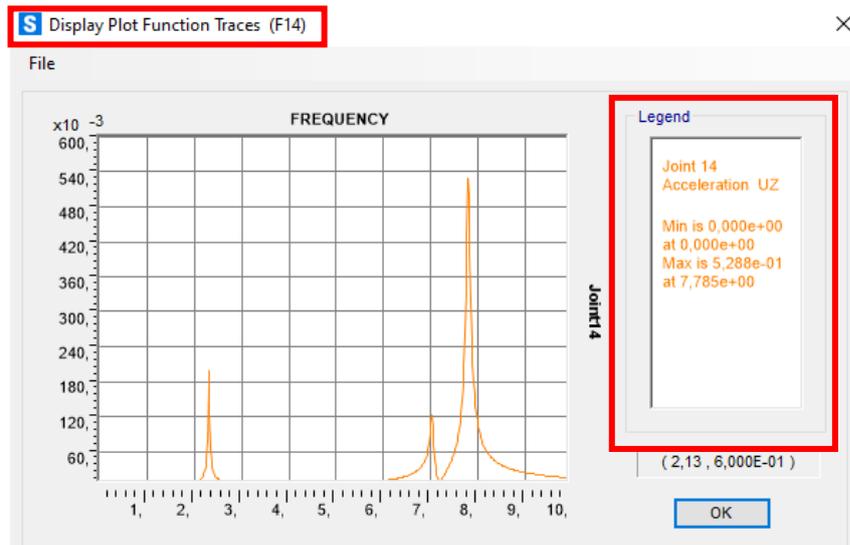


Ilustración 15. FRFs SAP2000 sin eje logarítmico

- Importando el fichero de SAP2000 a formato “.txt” y representándolo en Excel (el eje vertical en escala logarítmica), se obtiene la gráfica de la ilustración 16:

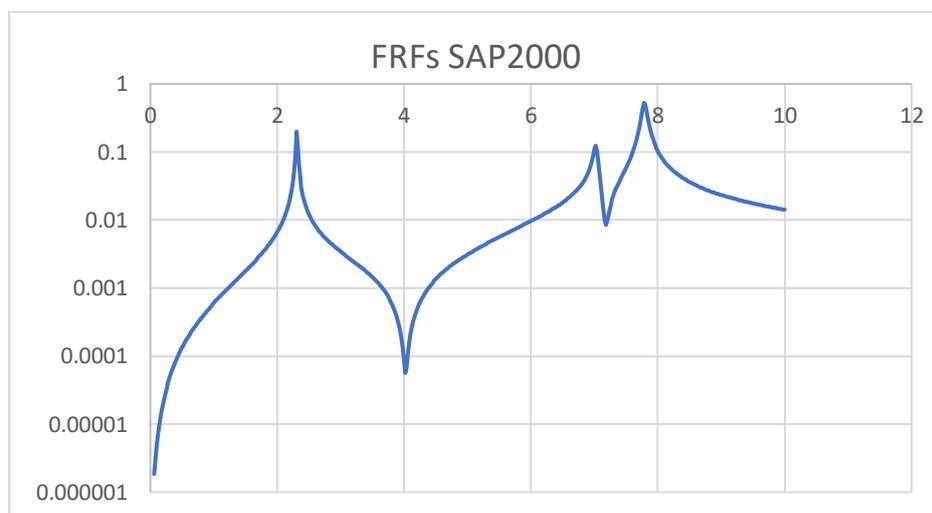


Ilustración 16. FRF SAP2000 importado a Excel con SAP2000

- Es decir, las frecuencias de los tres primeros modos de vibración obtenidas mediante SAP2000 son las siguientes:

$$w_1 = 2,30 \text{ Hz}$$

$$w_2 = 7,00 \text{ Hz}$$

$$w_3 = 7,72 \text{ Hz}$$

Ahora se procede a comparar las gráficas de las FRF registradas experimentalmente con las obtenidas mediante SAP2000 como se puede observar en la ilustración 17:

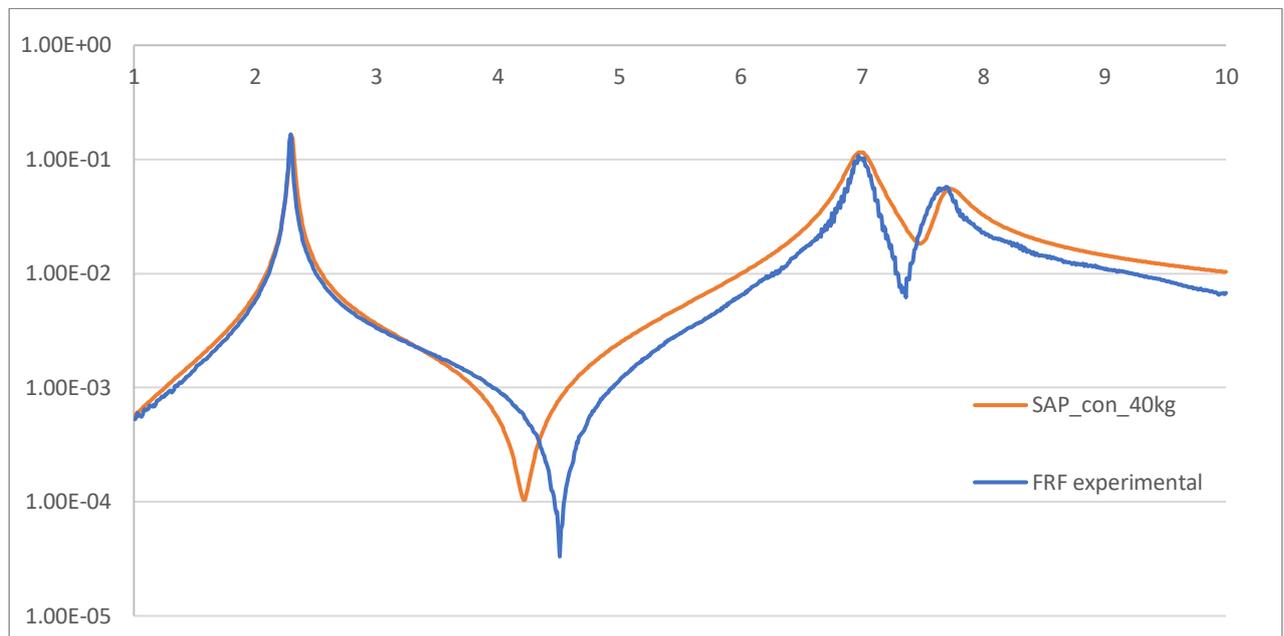


Ilustración 17. Comparativa FRF experimental y SAP2000 con Shaker

Como se puede observar en la ilustración 17 existe una gran concordancia entre los resultados registrados experimentalmente y los obtenidos mediante SAP2000. [7]

Es decir, las frecuencias de los tres primeros modos de vibración de la plataforma son las siguientes:

$$w_1 = 2,30 \text{ Hz}$$

$$w_2 = 7,00 \text{ Hz}$$

$$w_3 = 7,72 \text{ Hz}$$

Una vez realizada esta comparativa, se concluye que el “gemelo digital” de la plataforma real es correcto. Y por tanto se puede proceder a realizar simulaciones sobre el modelo en el software de cálculo SAP2000.

5.3. Ajuste y calibrado del amortiguamiento para las simulaciones:

A pesar de que en el anterior epígrafe se han comparado las FRF registradas experimentalmente y las obtenidas mediante SAP2000 incluyendo sobre la plataforma el “Shaker” de 40 kg, durante el desarrollo de las experimentaciones de los tránsitos peatonales, esta masa no se ha aplicado sobre la plataforma.

Por lo tanto, para poder comparar con los resultados registrados, el modelo digital no debe incluir esta masa, al quitarla, las frecuencias de los modos de vibración de la plataforma suben.

No se han podido registrar experimentalmente, pero si se puede obtener los valores mediante la simulación con SAP2000.

Para ello se realiza el mismo análisis que en el epígrafe anterior, pero quitando el “load pattern” asociado a la masa de 40 kg del “Shaker”.

Las frecuencias de los tres primeros modos de vibración de la plataforma obtenidas mediante “SAP2000” son las siguientes:

$$W_1 = 2,38737 \text{ Hz}$$

$$W_2 = 7,31834 \text{ Hz}$$

$$W_3 = 8,17319 \text{ Hz}$$

El análisis modal del tipo “Steady state” refleja la gráfica de la ilustración 18:

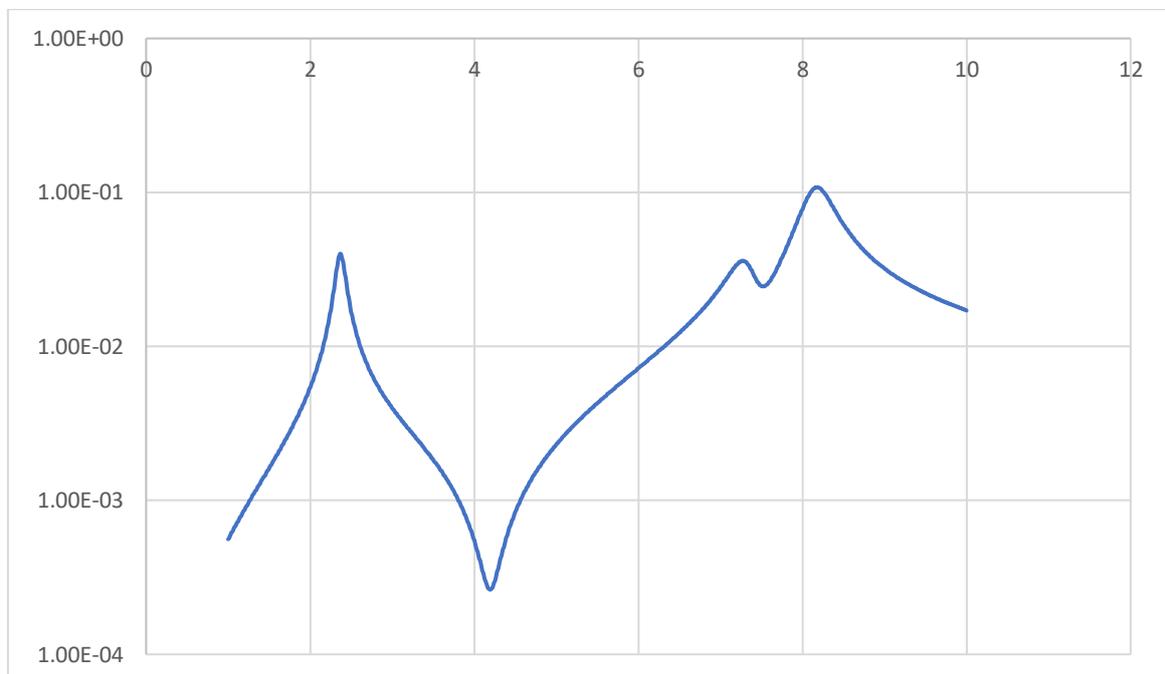


Ilustración 18. FRF SAP2000 sin Shaker sin ajuste de amortiguamientos

5.3.1. Ajuste del amortiguamiento para las FRFs:

El amortiguamiento está relacionado con la curvatura de los tres picos de la gráfica de las FRFs correspondientes a los tres primeros modos de vibración de la estructura. [10]

Para poder obtener esto, se deben ajustar los parámetros dentro de los que permite el software. Se opta por amortiguamiento histórico interpolado por frecuencia para cada modo, donde además se ha dejado a cero el coeficiente de Rayleigh que afecta a la masa.

La ecuación 2 relaciona el amortiguamiento con las frecuencias de cada modo de vibración:

$$\xi_r = \beta + \frac{\gamma}{\omega_r^2}$$

Ecuación 2. Amortiguamientos de Rayleigh

Siendo:

ξ_r = amortiguamiento de cada modo de vibración de la plataforma

β = Coeficiente proporcional de rigidez

γ = Coeficiente proporcional de masa

ω_r = frecuencia de cada modo de vibración de la plataforma (rad/s)

Es decir, mediante los valores de las frecuencias de los dos primeros modos de vibración obtenidos en el análisis modal experimental (EMA) y el valor del amortiguamiento histórico experimental para esos dos modos, se puede plantear un sistema para el cálculo de los valores de los parámetros “ β ” y “ γ ”.

Además, en SAP2000, corresponde con:

β = Coeficiente proporcional de rigidez corresponde con “Stiffness Proportional Coefficient”

γ = Coeficiente proporcional de masa corresponde con “Mass Proportional Coefficient”

Los valores obtenidos del anterior sistema se introducen en el valor de ambos coeficientes en la simulación del ensayo “F14” que permite obtener las FRFs en el software de cálculo SAP2000 de la siguiente forma:

En la ilustración 19, se puede observar el ajuste que se debería realizar al caso de carga “Steady state” para representar correctamente las FRFs en el software de cálculo:

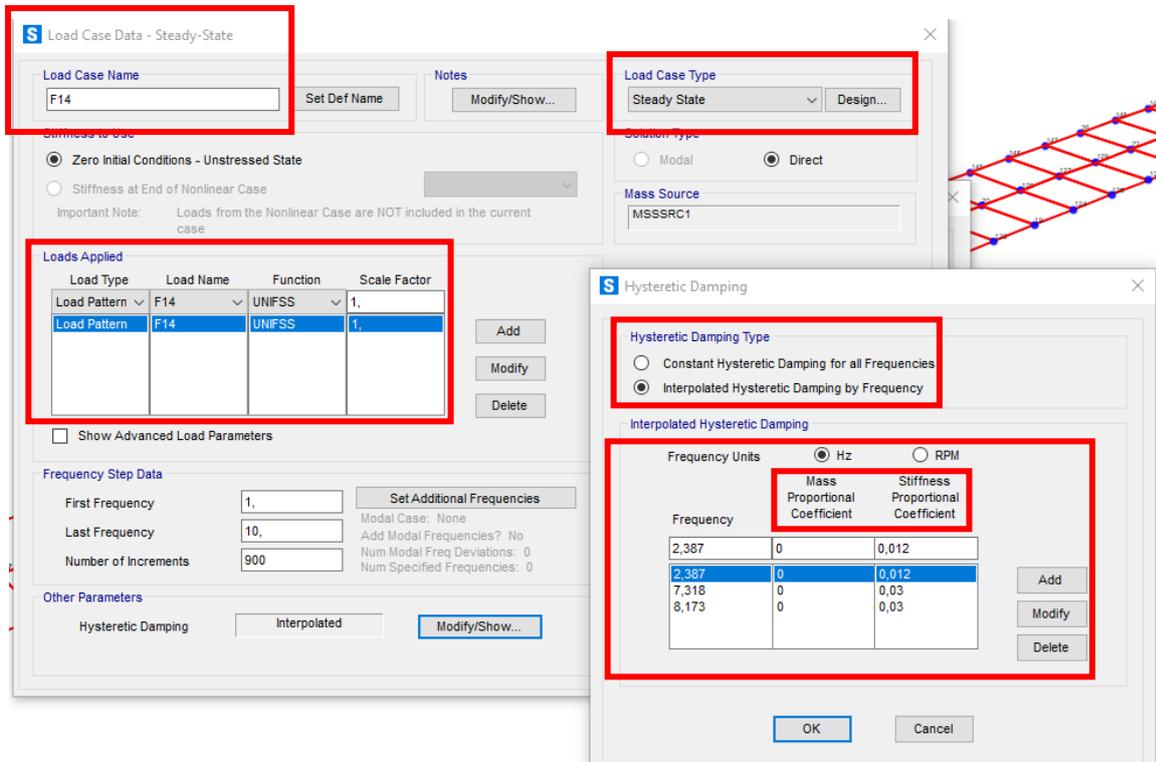


Ilustración 19. “Load case” F14 con los coeficientes experimentales del amortiguamiento

Los valores asociados a cada frecuencia de vibración de la plataforma corresponden con los obtenidos mediante el sistema de ecuaciones anterior.

Por lo tanto, modificando estos dos valores se consigue ajustar el amortiguamiento del modelo de la simulación con el de la plataforma real.

Ahora la gráfica de la FRF ajustado el valor de los amortiguamientos comparada con la de la ilustración 18, en la que no se ajustaban los amortiguamientos es la siguiente:

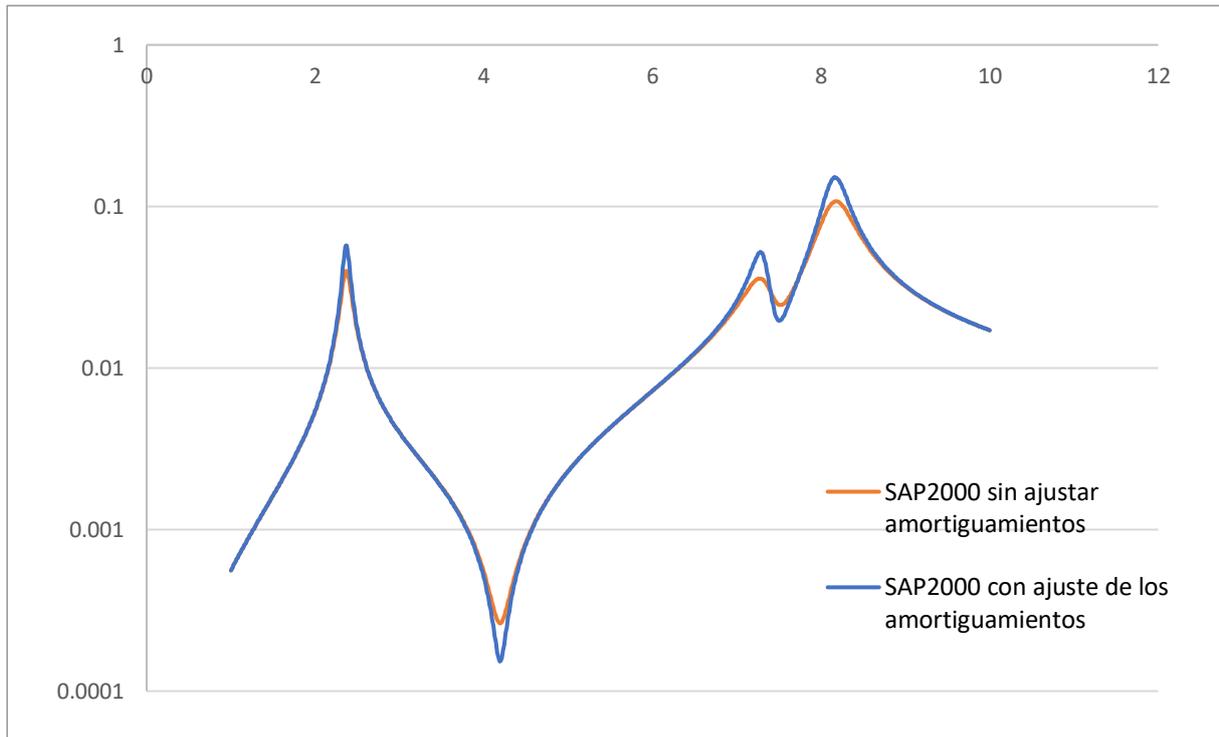


Ilustración 20. Comparativa FRF SAP2000 sin Shaker con y sin ajuste de amortiguamientos

Como se puede observar en la ilustración 20, el valor de las frecuencias es el mismo, solo cambia la curvatura de la gráfica, es decir, los amortiguamientos permiten ajustar mejor los modos de vibración del modelo digital respecto de la estructura real.

No se puede comparar con la curva de la FRF experimental, debido a que los únicos registros existentes son con la masa del “Shaker” aplicada, por lo que el valor de las frecuencias es diferente.

El software SAP2000, utiliza dos maneras diferentes de introducir los valores del amortiguamiento, en función del tipo de simulación.

En este apartado, se han ajustado los valores del amortiguamiento para el caso “Steady state”, es decir, el que permite realizar el análisis modal de la plataforma.

En el siguiente epígrafe (“5.3.2. Ajuste del amortiguamiento para el resto de las simulaciones”), se ajustará el valor del amortiguamiento de nuevo, pero esta vez para el caso de simulación “Time history”, que permite simular tránsitos peatonales sobre la plataforma.

Realmente, se trata del mismo parámetro, pero SAP2000 tiene dos formas diferentes de ajustarlo según el tipo de simulación.

5.3.2. Ajuste del amortiguamiento para el resto de las simulaciones:

El valor del amortiguamiento de la plataforma también influye en gran medida en los resultados de las simulaciones de los tránsitos peatonales y sus simplificaciones, por lo tanto, se debe ajustar su valor.

De manera experimental se obtienen los siguientes valores de frecuencias (ilustración 21) y amortiguamientos viscosos para los tres primeros modos de vibración de la plataforma:

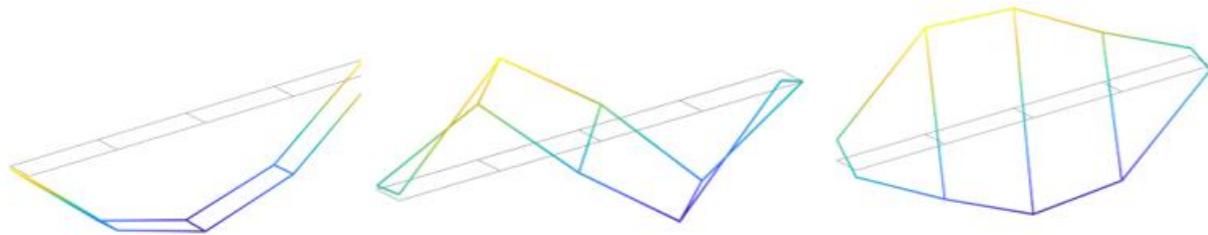


Ilustración 21. Amortiguamientos histéricos experimentales

$$W_1 = 2,38737 \text{ Hz} \rightarrow \xi_1 = 0,36\% = 0,0036$$

$$W_2 = 7,31834 \text{ Hz} \rightarrow \xi_2 = 1,37\% = 0,0137$$

$$W_3 = 8,17319 \text{ Hz} \rightarrow \xi_3 = 0,85\% = 0,0085$$

Los anteriores valores de amortiguamientos histéricos se miden de manera experimental excitando la plataforma para que se produzca vibración en ella.

Para conseguir esto, se debe excitar la plataforma mediante el “Shaker”, de masa 40 kg, por lo tanto, esta masa influye en las frecuencias de vibración de la plataforma.

Tras todo lo anterior, se obtienen los siguientes modos mediante el software de cálculo SAP2000:

- Primer modo (ilustración 22):

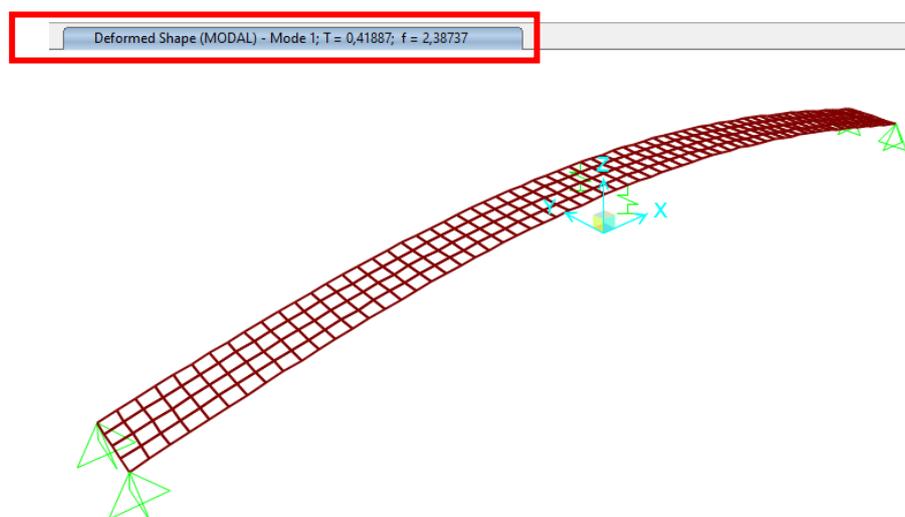


Ilustración 22. Frecuencia del primer modo de vibración de la plataforma en SAP2000

- Segundo modo (ilustración 23):

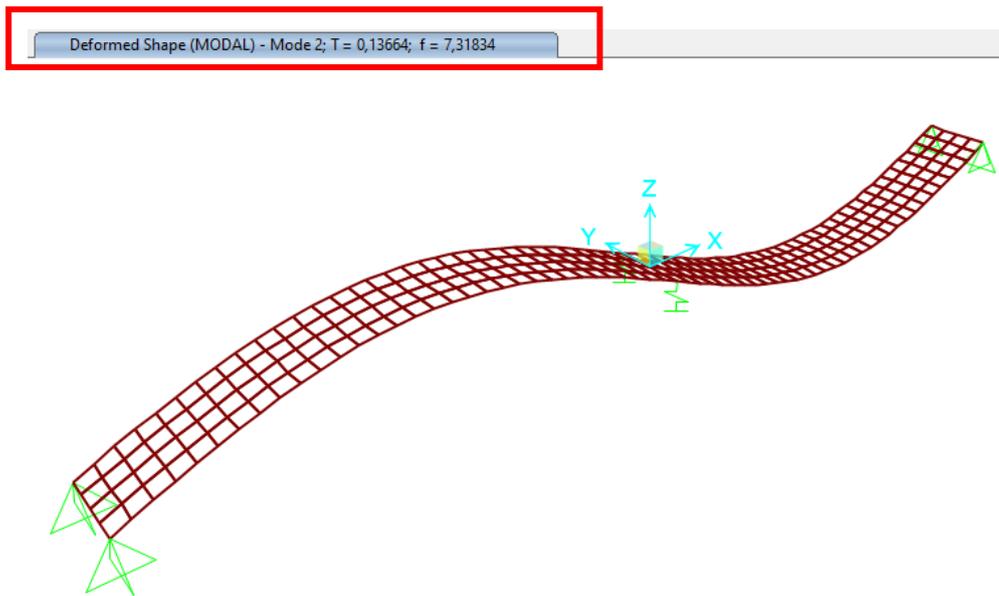


Ilustración 23. Frecuencia del segundo modo de vibración de la plataforma en SAP2000

- Tercer modo (ilustración 24):

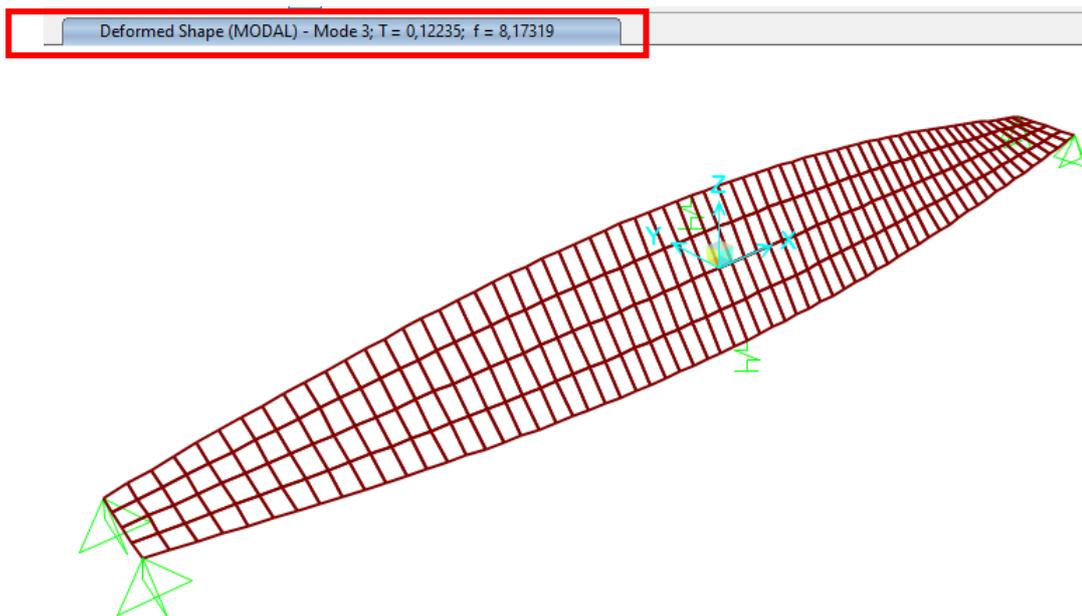


Ilustración 24. Frecuencia del tercer modo de vibración de la plataforma en SAP2000

Estos valores se deberían introducir en todos los casos de carga (“load case”) de las simulaciones que se realizan en los posteriores epígrafes, pero existe una determinada limitación que se explicará posteriormente.

Como se ha comentado anteriormente, “SAP2000” utiliza diferente amortiguamiento para el caso “steady state” que para el caso “time history”. Por eso el ajuste del amortiguamiento es diferente en el estudio del valor de las FRFs y en el desarrollo de las simulaciones de los tránsitos peatonales.

En la ilustración 25 se especifica como se debería introducir el valor del amortiguamiento para cada modo de vibración de la plataforma en el “load case” de tipo “Time history” para la simulación de los tránsitos peatonales y sus simplificaciones:

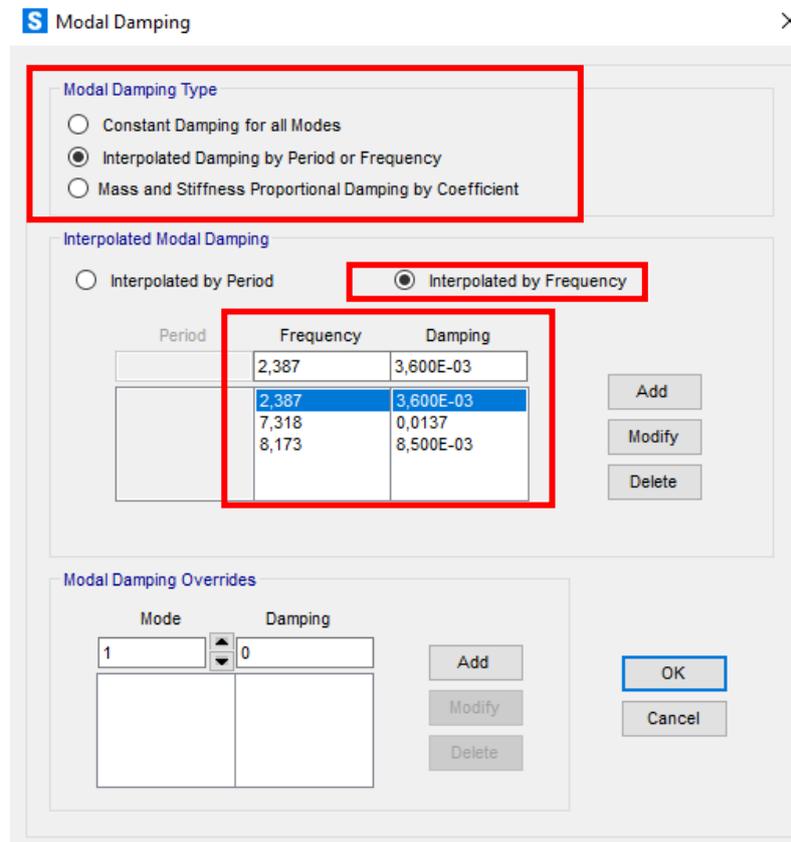


Ilustración 25. Interpolación amortiguamiento real simulaciones sin shaker

Ajuste del amortiguamiento del modelo digital:

El procedimiento anterior, se ajusta con el amortiguamiento de la plataforma sin tránsito peatonal, pero al introducir un peatón, el amortiguamiento cambia, porque ya no es solo el de la plataforma, sino el del conjunto plataforma peatón.

Para poder reflejar esto, el software de cálculo debería dejar ajustar varios amortiguamientos según si hay peatón o no, prácticamente ningún software de cálculo de estructuras permite realizar esta modificación, debido a su gran complejidad. Es decir, debería ajustarse en función de si el peatón está sobre la plataforma o no, un amortiguamiento más alto y más bajo respectivamente.

Por lo tanto, para obtener resultados similares a la realidad, finalmente se decide utilizar un amortiguamiento constante para todos los modos, para los tránsitos de pisadas medianas de valor 0,15 y para las pisadas cortas, de valor 0,12 (este último caso se encuentra en el Anexo "1. Simulaciones de verificación realizadas en el software de cálculo "SAP2000". Caso pisadas cortas a 90 ppm" del presente TFM. [11]

Estos valores son obtenidos tras el ajuste de los correspondientes tránsitos, se introducen en SAP2000 como se indica en la ilustración 26:

Tránsito peatonal de pisadas medianas:

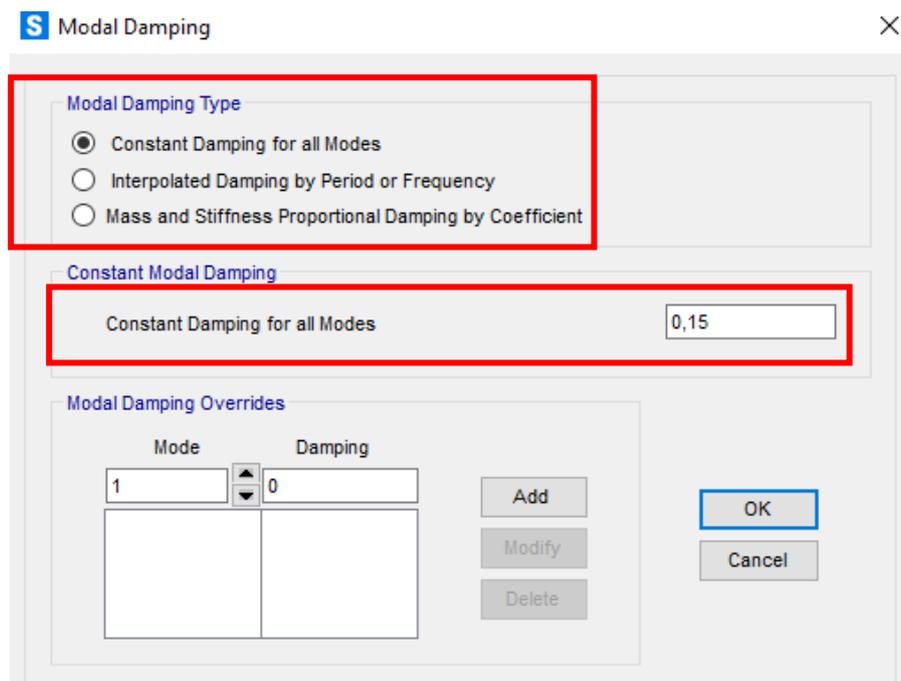


Ilustración 26. Amortiguamiento simulaciones pisadas medianas M

El valor seleccionado es el que permite ajustar mejor los resultados a los medidos experimentalmente, y, por tanto, representar más fielmente la realidad. Se ha seleccionado mediante un proceso iterativo de prueba y error.

6. SIMULACIONES DE VERIFICACIÓN REALIZADAS EN EL SOFTWARE DE CÁLCULO “SAP2000”:

El objetivo de este apartado se divide en dos partes:

- Por un lado, se busca comparar los resultados obtenidos con el ensayo de tránsito peatonal experimental para validar el modelo digital.
- Por otro lado, estudiar cómo influyen en la respuesta de la estructura las distintas simplificaciones de los casos de carga, en este caso de tránsitos peatonales.

En estas simulaciones siempre se estudiará un tránsito peatonal, partiendo de simplificaciones sencillas hasta terminar simulando de manera “realista” el tránsito peatonal experimental sobre la plataforma.

El tránsito peatonal experimental que servirá como referencia para comprobar los resultados de las simulaciones es el desarrollado en el apartado del presente documento “4.2.3. Ensayos experimentales realizados para comprobar que el “gemelo digital” obtenido y su calibrado representan fielmente la realidad”.

Este ensayo como se ha comentado anteriormente, se realiza modificando dos de sus parámetros:

- Longitud de la zancada: puede ser mediana (18 pasos para recorrer la plataforma) o pequeña (20 pasos para recorrer la plataforma) como se ha indicado anteriormente.
- Frecuencia de paso (en ppm = pasos por minuto): puede ser a 90, 115 y 143. Este último coincide con el valor de la resonancia de la pasarela y de manera experimental es imposible andar por la vibración de la misma. Se calcula como la frecuencia del primer modo de vibración de la estructura ($w_1 = 2,38737$ Hz) por 60 para pasarlo de herzios a ppm.

Se toma como referencia el tamaño de pisada mediana a 90 ppm, para este caso se detallarán todas las simulaciones realizadas comparándolas con los valores experimentales.

Para la realización de este tipo de ensayo experimental se tienen dos sistemas independientes entre sí:

- Sistema de adquisición de datos de la plataforma: permite medir desplazamientos y aceleraciones (a 100 S/s (muestras por segundo)) de distintos puntos de la misma, se toma como referencia el punto central.
- Plantillas bluetooth: se calzan en los pies del peatón y permiten medir y almacenar la fuerza que realiza el peatón sobre la plataforma con una frecuencia de 100 muestras por segundo.

Los valores de las plantillas bluetooth solo son necesarios para los últimos casos de simulación donde se detalla el tránsito de manera cada vez más realista del peatón experimental, aunque los valores que registran estas también sirven para escalar los modelos simplificados.

Estos dos sistemas de adquisición de datos no están sincronizados entre sí, por lo que es necesario casar los resultados para analizar cómo influye la fuerza del peatón al andar sobre la respuesta de la plataforma.

Antes de proceder a realizar las simulaciones se debe destacar que a pesar de que el modelo se aproxime a la plataforma real, y los tránsitos se realicen a partir de datos experimentales, no se debe olvidar que el software de cálculo SAP2000 solo permite representar cargas móviles, pero no representa la influencia de masas móviles.

Por lo tanto, no se está considerando la masa del peatón al andar sobre la plataforma, debido a que esta hace que la frecuencia del conjunto disminuya ligeramente a medida que el peatón se acerca al centro de la plataforma. Una cuantificación de este efecto puede verse en [6].

Y un peatón al caminar además de cargar la plataforma con la fuerza que transmite por los pies también genera efectos sobre la estructura al poner su masa en movimiento.

Esto supone una limitación del software de cálculo SAP2000, pero también esta se presenta en la gran mayoría de softwares de cálculo de estructuras (como "CSiBridge").

A pesar de esto los resultados obtenidos se aproximan bastante a la realidad, por lo tanto, se pueden tomar como válidos y representativos de la respuesta de la estructura real.

- Los resultados obtenidos del ensayo experimental para el caso de pisadas medianas a 90 ppm son los siguientes reflejados en la ilustración 27 y 28:

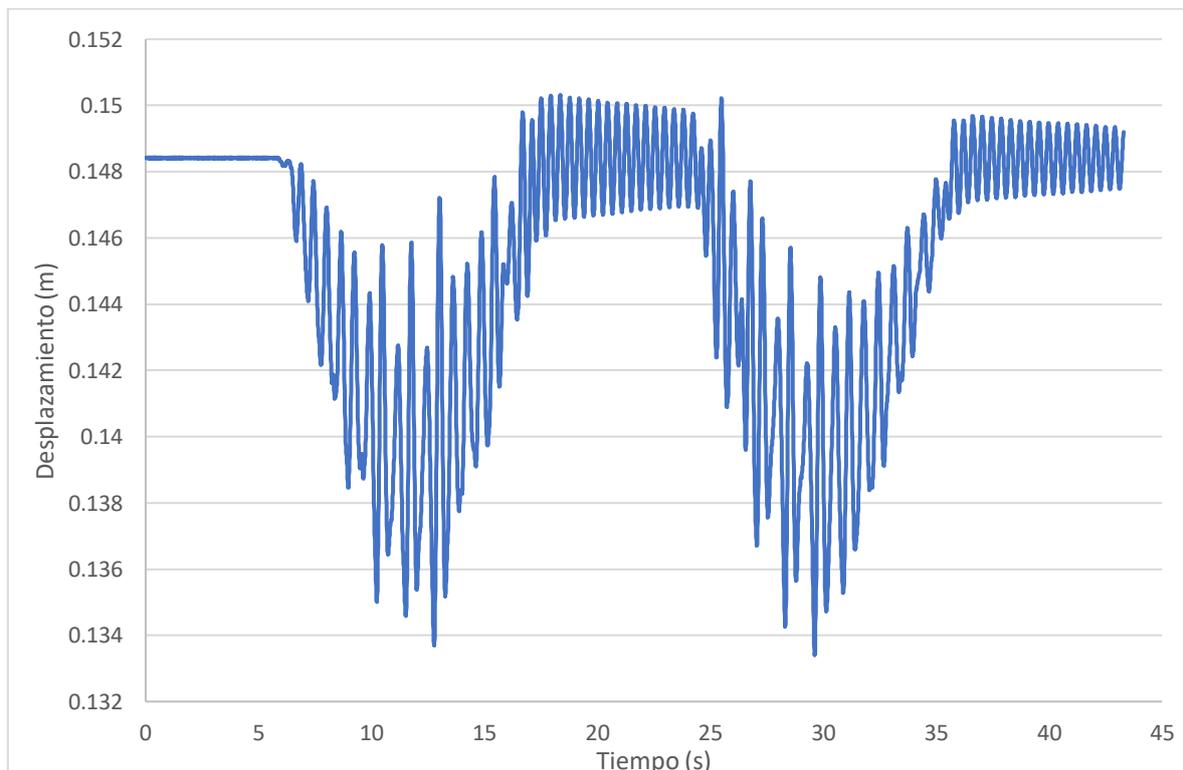


Ilustración 27. Desplazamiento punto central M ida y vuelta sin referenciar

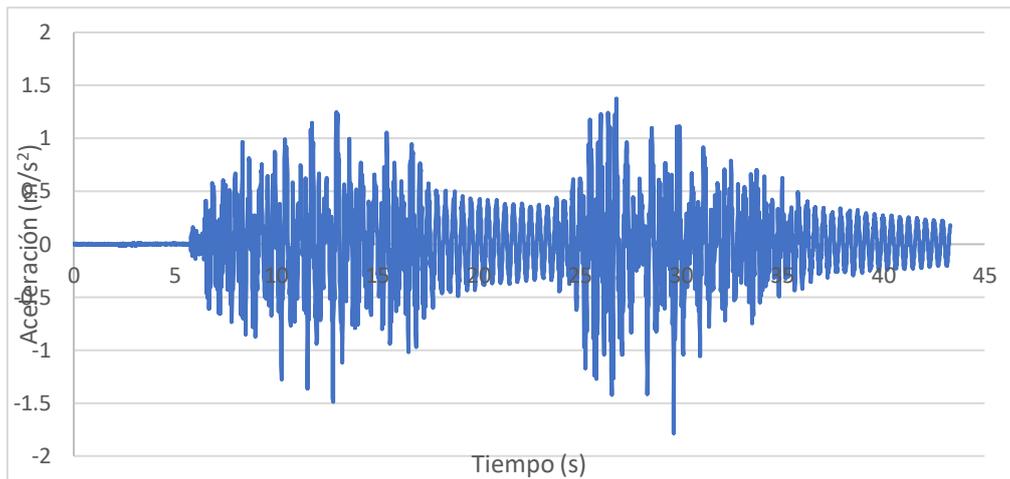


Ilustración 28. Aceleración punto central M ida y vuelta sin referenciar

De las anteriores gráficas se puede observar:

- Ambas representan la ida del tránsito, pero también la vuelta, correspondiendo la zona intermedia entre ambos el momento en el que sale el peatón de la plataforma.
- No se encuentran correctamente ajustadas, es decir, el tránsito peatonal no comienza en el instante de tiempo 0 s. Y además la gráfica de desplazamiento no está ajustada a 0 m, sino a la consigna de la célula láser, es decir, tiene un “offset” de unos 0,148 m que se debe ajustar a 0 m.

Corrigiendo todo esto y simplemente graficando el espacio de tiempo que corresponde con la ida del tránsito, debido a que durante las simulaciones solo se tendrá en cuenta la ida del peatón y el estado en que deja la plataforma cuando este sale de la misma. No se ha considerado necesario incorporar la vuelta.

Se obtienen los siguientes valores para el desplazamiento y la aceleración del punto central de la plataforma (cuando se comparan los valores de los 3 ensayos experimentales se referencia a 0 s el inicio del tiempo de la simulación). Se grafican los valores en las ilustraciones 29 y 30:

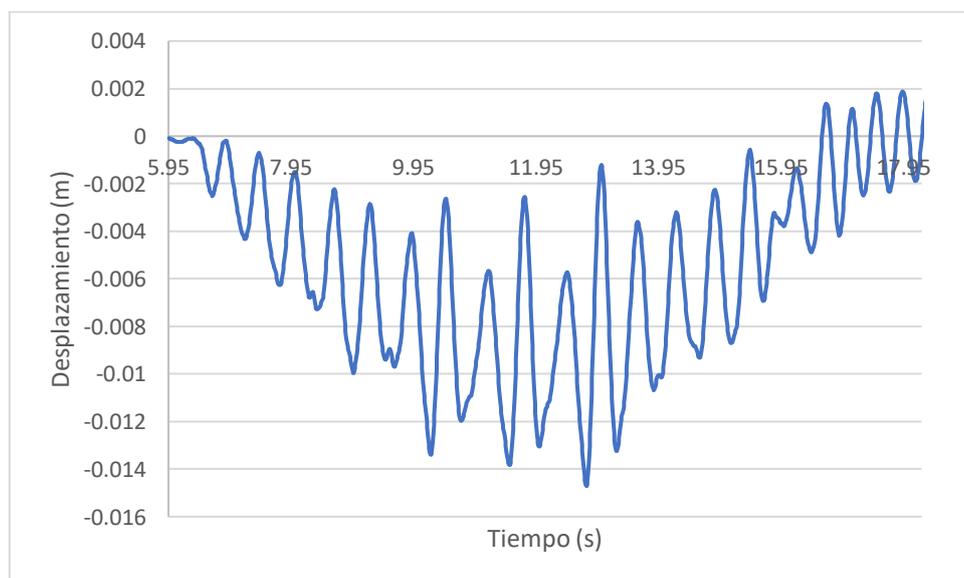


Ilustración 29. Desplazamiento punto central M ida sin referenciar temporalmente

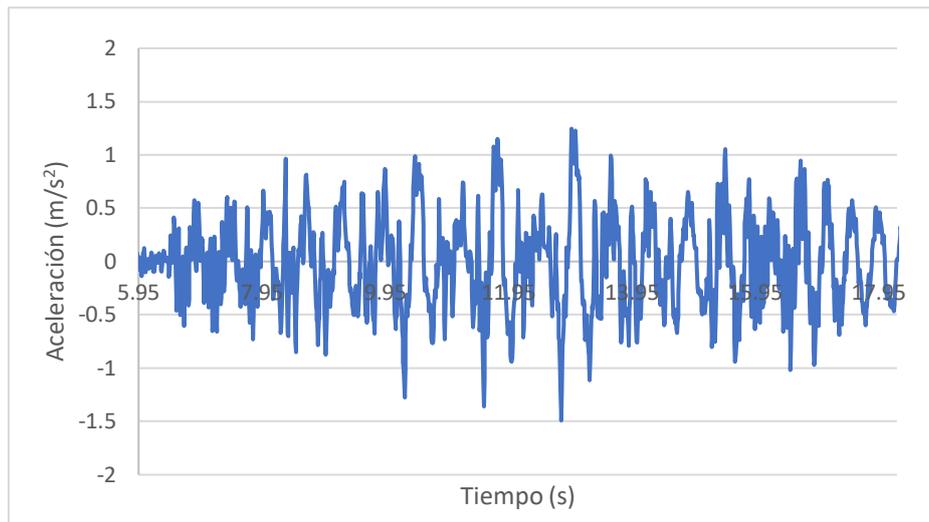


Ilustración 30. Aceleración punto central M ida sin referenciar temporalmente

El valor máximo del desplazamiento del punto central de la plataforma es de 0,01471 m, es decir, 14,71 mm, que servirá como referencia para los resultados de todas las simulaciones realizadas con el mismo peatón, con el mismo tamaño de zancada y la misma frecuencia de paso.

El valor máximo de la aceleración del punto central de la plataforma es de 1,491 m/s² que servirá como referencia para el resultado de todas las simulaciones de nuevo con los mismos parámetros.

Todos los valores de desplazamientos y aceleraciones, tanto para las pisadas medianas como para el caso de las pisadas cortas, se han ajustado para que comiencen en el instante de tiempo 0 s. Para poder superponer las gráficas de valores y ver qué relación guardan entre sí.

Se han realizada para cada tipo de pisada, 3 ensayos experimentales en los que se han recogido los datos de las funciones de fuerza de las pisadas, además del valor del desplazamiento y aceleración del punto central de la plataforma.

Para pisadas medianas T1, T2 y T3 (reflejados en las ilustraciones 31 y 32) y para pisadas cortas T4, T5 y T6, estos últimos se encuentran en el Anexo "1. Simulaciones de verificación realizadas en el software de cálculo "SAP2000". Caso pisadas cortas a 90 ppm", donde además se desarrollan las simulaciones correspondientes a este caso.

En las siguientes gráficas se comparan para comprobar que se han realizado en las mismas condiciones y que los valores medidos experimentalmente son similares.

A pesar de esto, para las simulaciones posteriores, se tomará como referencia, para pisadas medianas el tránsito T1 y para pisadas cortas, el tránsito T4, estas últimas desarrolladas en el Anexo 1. Se han seleccionado estos valores por conveniencia, pero se podían haber utilizado cualquiera de los registrados durante los ensayos experimentales.

Pisadas medianas a 90 ppm:

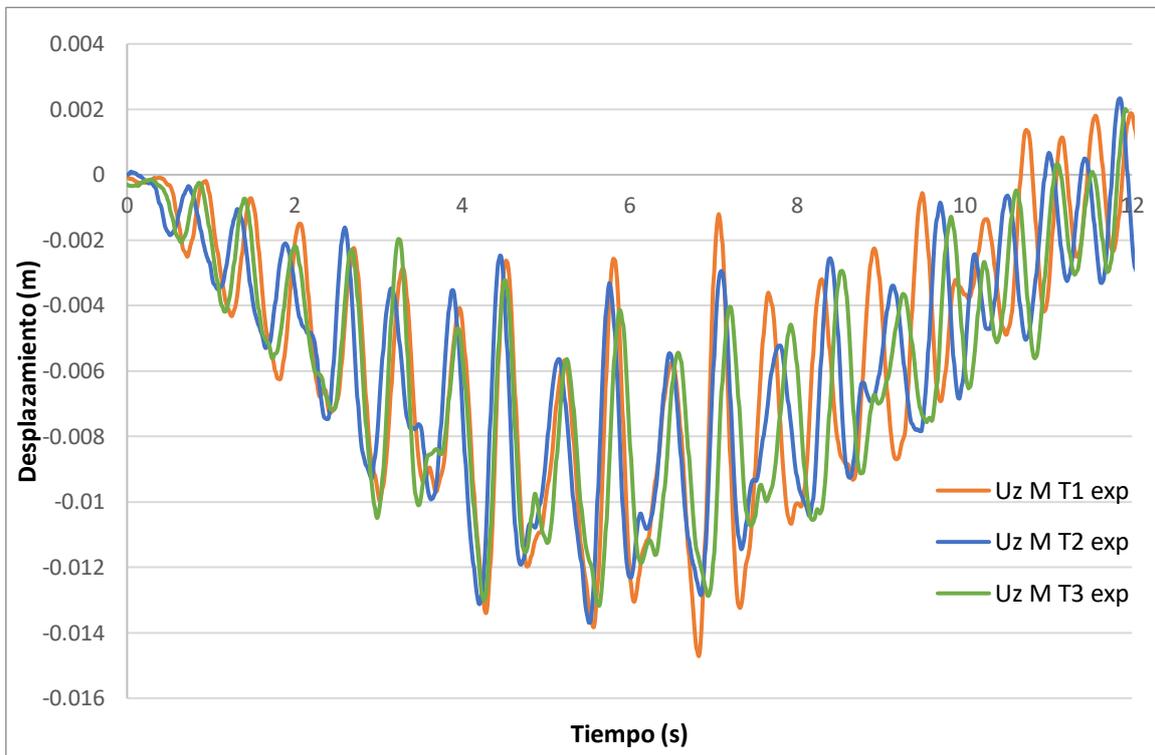


Ilustración 31. Comparativa desplazamiento vertical punto central experimental M T1 T2 T3

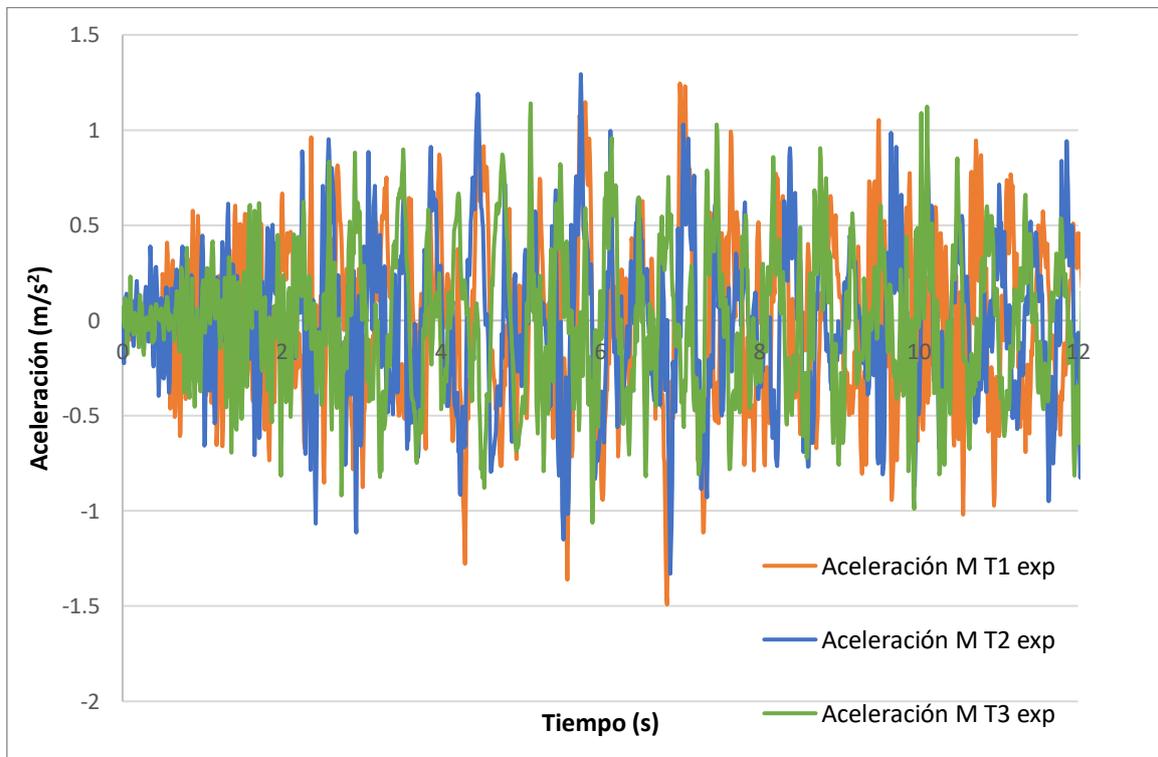


Ilustración 32. Comparativa aceleración vertical punto central experimental M T1 T2 T3

6.1. Modelos S, D, P, R y realista de carga peatonal:

En este apartado se explicarán las simulaciones que se han realizan, en el epígrafe “6.2. Caso pisadas medianas a 90 ppm” se detallará su procedimiento para el caso de pisadas medianas con frecuencia de paso de 90 ppm.

Como se ha comentado anteriormente, estas simulaciones tienen como objetivo representar el tránsito real peatonal con el que se comparan.

Se parte de simulaciones sencillas que simplifican la realidad y se avanza hasta llegar a representar de manera “realista” el tránsito peatonal experimental. De esta manera se puede comprobar hasta qué punto los modelos simplificados se aproximan a la realidad y cuáles de todos ellos la representan más fielmente.

Aunque representar la realidad es imposible debido a la limitación de no poder representar la influencia de la masa móvil del peatón sobre la estructura en el software de cálculo, al igual que el problema del valor del amortiguamiento del conjunto plataforma peatón.

A pesar de esto los resultados tienen gran similitud con la realidad como se comprobará en el epígrafe 6.2., permitiendo verificar el modelo y estudiar la respuesta de la estructura ante diferentes tipos de tránsitos y casos de carga.

Las simulaciones que se han realizado son las siguientes:

- Caso “Shaker” (S):

Consiste en aplicar una determinada función de fuerza en el centro de la plataforma. No se trata de un tránsito peatonal como tal ya que la fuerza no cambia de posición.

- Caso deslizante (D):

Consiste en aplicar un tránsito peatonal pero la función de fuerzas de los pasos es constante y su forma es una simplificación de una pisada de un peatón real.

En este caso se presupone que nunca los dos pies del peatón están a la vez en la plataforma.

- Caso pulsante (P):

Es igual que el caso anterior, pero con solape de los dos pies.

- Caso robot: se han considerado dos modelos (R):

- ❖ 1 tipo de paso: simula mediante una función de fuerza de un paso real un peatón que camina siempre de igual manera, mismo tiempo entre pasos y siempre aplicando la misma fuerza en el paso.

- ❖ 2 tipos de pasos: igual que el caso anterior, pero en vez de con 1 solo tipo de paso, con 2, es decir, diferenciando pie derecho de pie izquierdo. En este caso al ser las pisadas más realistas, aparece un subarmónico en la mitad de las frecuencias de paso.

- Caso tránsito peatonal real (realista):

En este caso se representan las funciones de la fuerza de todos los pasos, es decir, se introducen los valores reales medidos mediante las plantillas bluetooth. Se introducen también los tiempos entre pasos reales, es decir, justo en qué momento se aplica cada paso en cada punto de la plataforma.

A medida que el grado de simplificación se reduce, el caso de carga se aproxima más a la realidad, y por lo tanto se espera que los resultados obtenidos sean cada vez más representativos.

Comparando los resultados de cada una de las anteriores simulaciones con los resultados experimentales del tránsito real realizado en la plataforma del laboratorio. Se irá estudiando y entendiendo la validez del modelo junto con la respuesta de la estructura para cada caso de carga.

6.2. Caso pisadas medianas a 90 ppm:

6.2.1. Caso “Shaker”:

En esta simulación se va a proceder a aplicar una función de fuerza en función del tiempo en el punto central de la plataforma, no se trata de un tránsito como tal, para ello se deben seguir los siguientes pasos.

Como punto de partida del modelo digital, destacar que el amortiguamiento seleccionado en los “load case” para todas las simulaciones del presente epígrafe es constante y de valor 0,15. Se ha seleccionado para que los resultados obtenidos en la última simulación de este epígrafe (6.2.5. Caso tránsito peatonal real) se ajusten a los experimentales.

También destacar que la geometría inicial de la plataforma es la que se muestra en la ilustración 33:

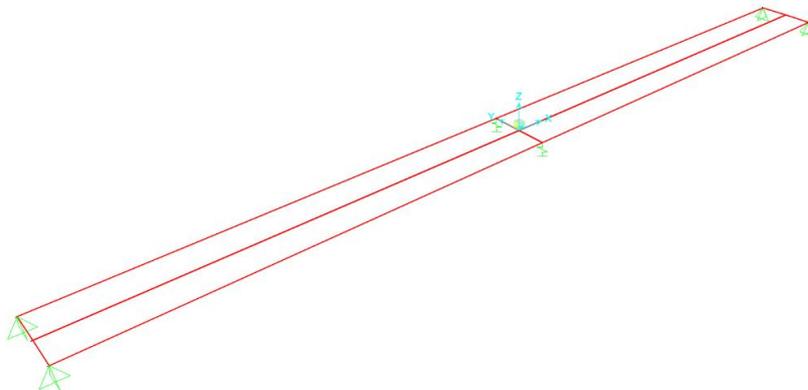


Ilustración 33. Modelo digital SAP2000 inicial de la plataforma

1. El modelo digital de la plataforma se encuentra dividido en dos mitades longitudinalmente.

Se debe aplicar a cada una de las dos áreas de cada mitad de la plataforma un mallado de cálculo de 4x2 como el que se muestra en la ilustración 34, para mejorar los resultados (al tratarse de un método de cálculo mediante elementos finitos):

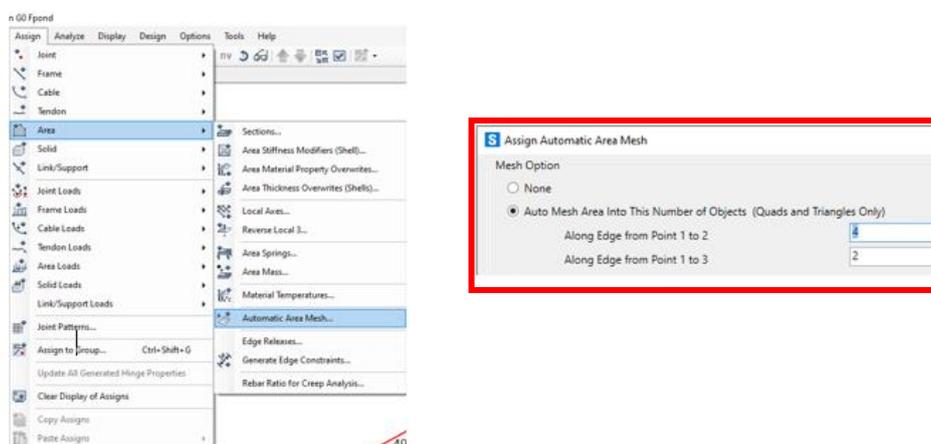


Ilustración 34. “Auto Area Mesh” de la plataforma

2. Se debe aplicar una carga de valor unidad en el punto central de la plataforma asociada a un patrón de carga de tipo “other” y se debe crear la función que define la fuerza aplicada a lo largo del tiempo.

A la hora de definir la función, se debe seleccionar “From File” y se exporta de un fichero “.txt” almacenado en una carpeta del ordenador.

Para el valor de la función del “shaker” tomamos como referencia la guía “SETRA” [5], que simplifica la carga que genera un peatón mediante la ecuación 3:

$$F(t) = g \cdot [M + 0,4 \cdot \sin (2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)] \cdot \sin \left[\frac{\pi \cdot t}{T_{total}} \right]$$

Ecuación 3. Función de fuerza SETRA

Siendo:

- g = gravedad = $9,81 \text{ m/s}^2$
- M = masa del peatón= 90 kg (se selecciona este valor para todos los ensayos)
- t = tiempo, se selecciona para este valor el periodo de muestreo = 0,01 Hz (igual para todos los ensayos)
- f = frecuencia= al ser 90 ppm son 1,5 Hz
- T_{total} = tiempo que se tarda en recorrer la plataforma (ensayo pisadas M a 90 ppm= 12 segundos, seleccionado del tránsito experimental T1 M).

Este valor se calcula como se indica en la ecuación 4:

$$T_{recorrer\ plataforma} = \frac{60}{ppm \cdot n_{pasos}} = \frac{60}{90 \cdot 18} = 12 \text{ s}$$

Ecuación 4. Cálculo tiempo que se tarda en recorrer la plataforma

Con n_{pasos} = número de pasos necesarios para recorrer la plataforma.

Se trata de una fuerza modulada por el modo 1 (senoidal) para tener en cuenta que la fuerza no afecta de igual manera en los extremos que en el centro de la estructura.

Se obtiene la función de la fuerza “Shaker” y se importa al software (“Define”- “Function” - “Time History”) como en la ilustración 35:

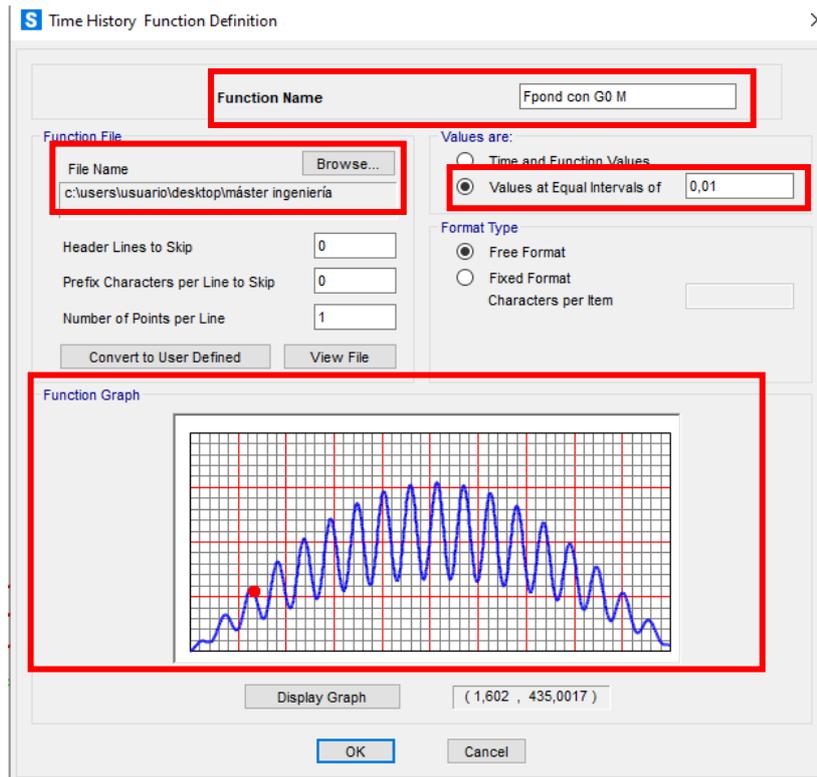


Ilustración 35. Función Fuerza Pondera caso Shaker M

Es importante destacar que el fichero “.txt” importado a SAP2000 solo contiene los valores de la fuerza, por eso hay que indicar cada cuanto se evalúa la función de la fuerza, en este caso, al igual que para el resto de las simulaciones es de 0,01 Hz.

3. Se debe crear un “load pattern” de tipo “other”.
4. Se debe crear un “load case” como el de la ilustración 36 asociado al anterior patrón de carga y a la función de la fuerza, de tipo “TIME HISTORY”, que representa la respuesta en función del tiempo:

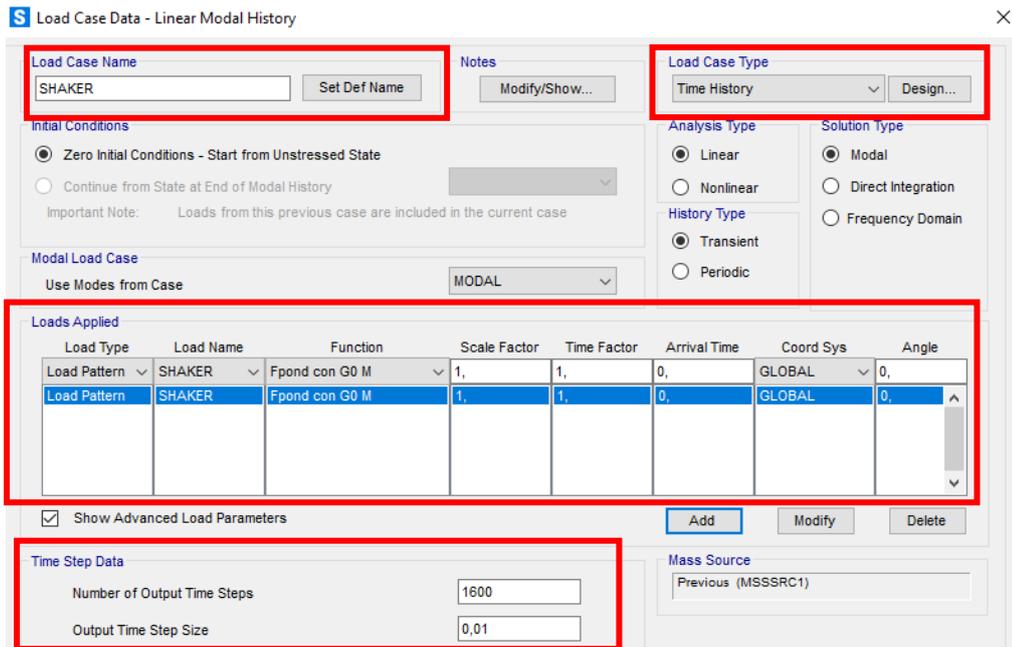


Ilustración 36. Load case Shaker M

En el apartado “Time step data”, se selecciona como frecuencia 0,01 Hz y 1600 pasos, este último valor es debido a que todos los ensayos duran un máximo de 15 segundos, por lo tanto $15/0,01=1500$, con 1600 se grafica todo el ensayo completo siempre (se representa algo más, la respuesta libre, cuando el peatón ya ha salido de la plataforma).

El amortiguamiento que se debe introducir en el “load case” es el que se ha indicado en el calibrado del modelo, en este caso constante de valor 0,15 (para todas las simulaciones de pisadas medianas) como se ha comentado anteriormente.

5. Se realiza la simulación y se representa el desplazamiento y la aceleración del punto central:

Para obtener estas gráficas se sigue el mismo procedimiento que anteriormente, teniendo en cuenta: que el valor del desplazamiento (“U”) y la aceleración (“Accel”) se representan en el eje vertical “z” seleccionando el tipo de gráfico “Joint Disps/Forces”, se selecciona lo indicado en la ilustración 37:

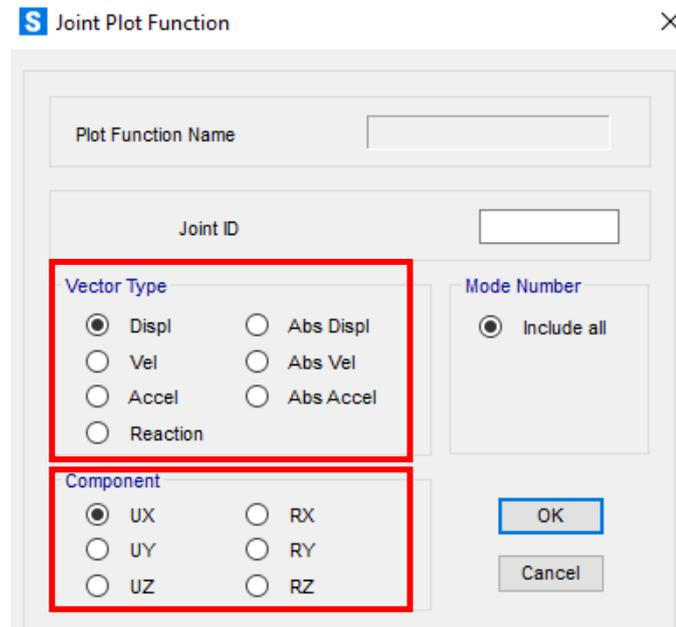


Ilustración 37. "Joint Plot Function"

6. Finalmente exportando los valores a Excel y graficándolos, se obtienen las gráficas de las ilustraciones 38 y 39:

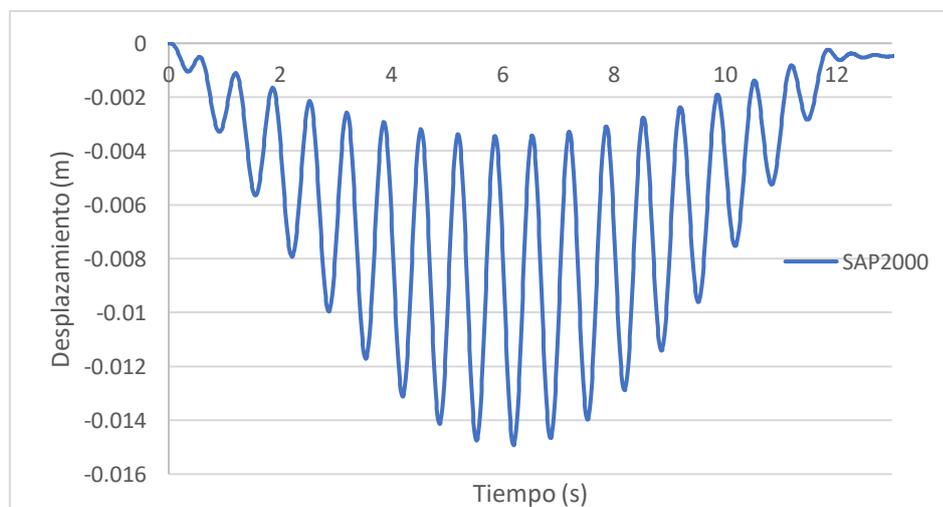


Ilustración 38. Desplazamiento punto central caso Shaker M

Valor máximo desplazamiento = 0.01493 m= 14.93 mm.

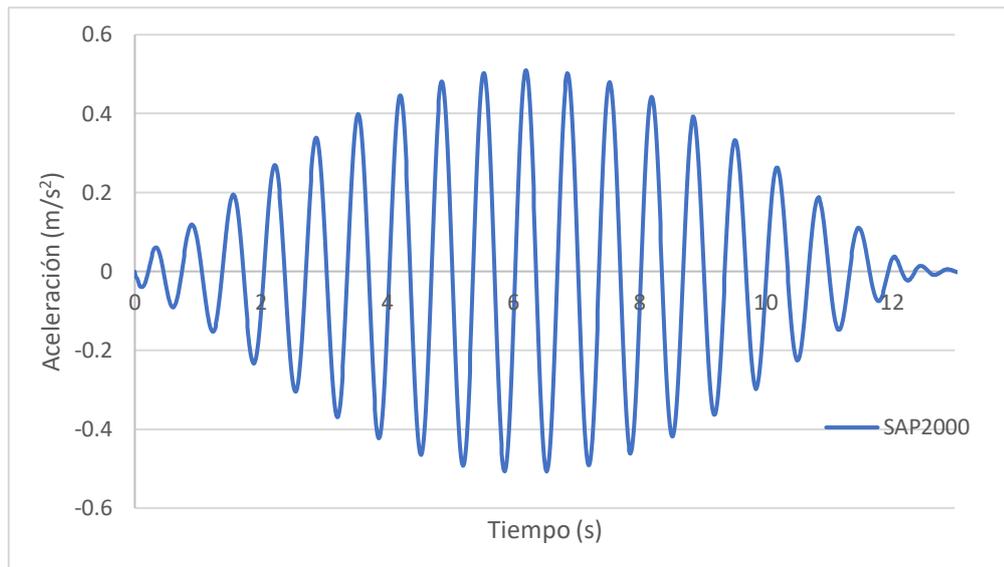


Ilustración 39. Aceleración punto central caso Shaker M

Valor máximo aceleración = 0.51009 m/s²

7. Comparándolos con los valores del tránsito real "T1", se obtienen las gráficas de las ilustraciones 40 y 41:

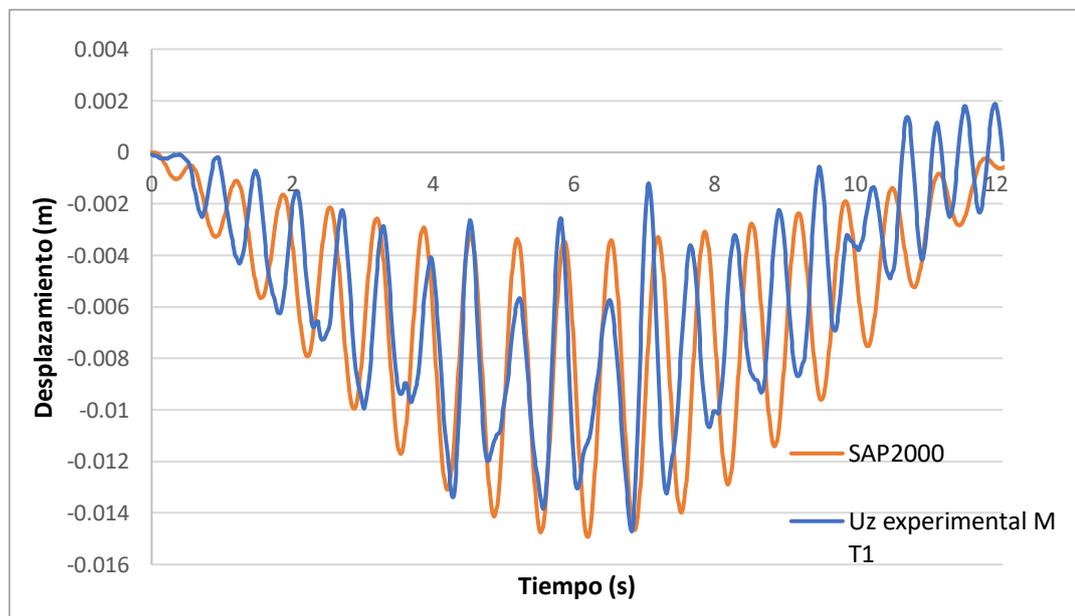


Ilustración 40. Comparativa desplazamiento punto central caso Shaker M

El criterio seleccionado para comparar los resultados, es fijarse en el valor máximo, otro criterio razonable sería comparar las envolventes de esfuerzos mínimos y máximos. En este caso se aprecia que la envolvente de máximos supera a la experimental, y la de mínimos se queda por debajo.

Para poder ajustar cualquiera de los criterios al experimental, es necesario ponderar la fuerza de entrada del modelo.

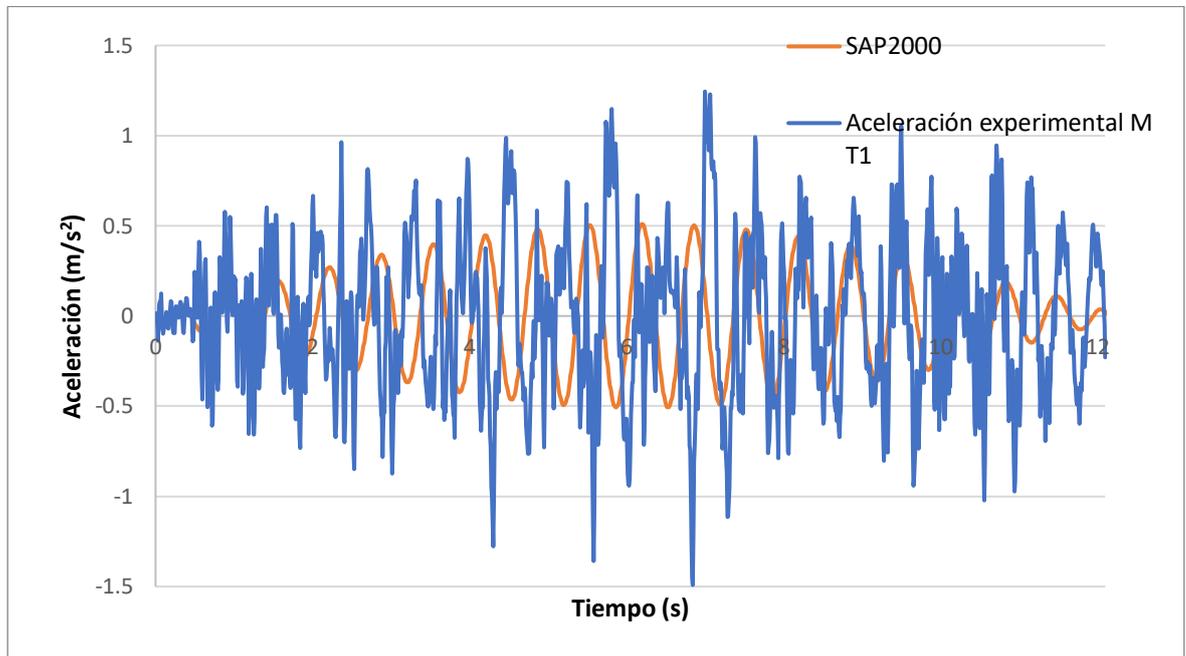


Ilustración 41. Comparativa aceleración punto central caso Shaker M

Como se puede observar, a pesar de no estar simulando un tránsito como tal, existe cierto grado de similitud en los resultados obtenidos, tanto para el valor del desplazamiento como el de la aceleración.

A la vista de los resultados, se está sobrecargando la plataforma, es decir, se está cargando más de lo que se debe. El valor del máximo desplazamiento experimental es de 14,71 mm mientras que el modelo refleja un valor máximo de 14,93 mm.

Al ser lineal, se debe multiplicar la función de fuerza del “Shaker” por el factor de escala que relaciona el valor del desplazamiento máximo experimental (14,71 mm → T1 M) con el valor máximo de cada simulación, en este caso de 14,93 mm:

$$F = F_{\text{shaker}} \cdot 14.71/14.93$$

Se obtienen los siguientes resultados de las gráficas 42 y 43 siguiendo el mismo procedimiento anterior:

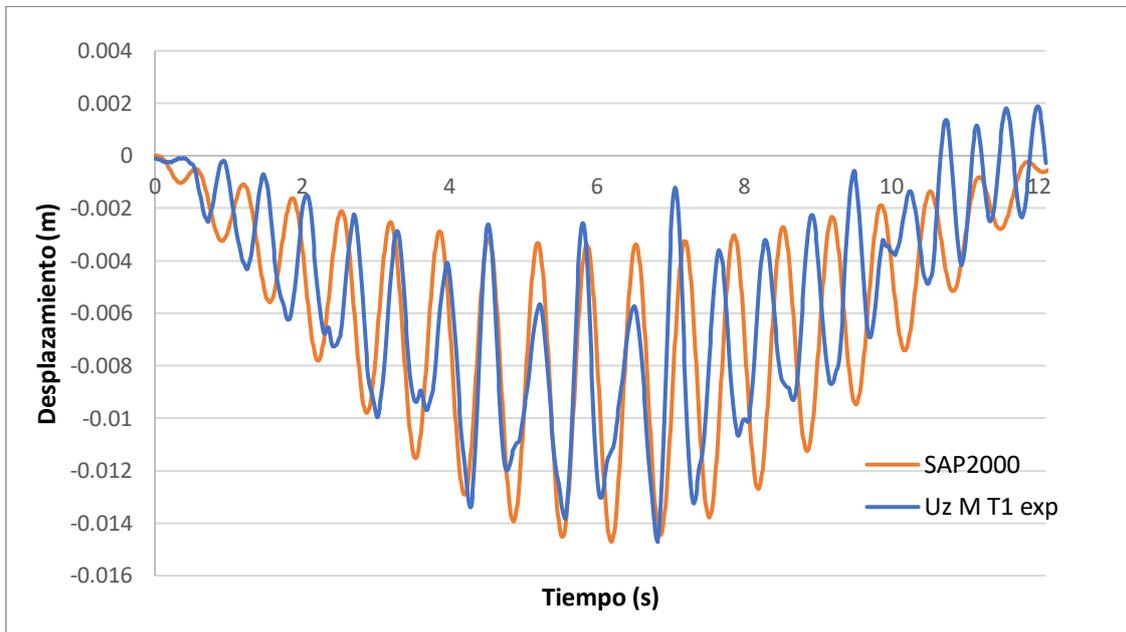


Ilustración 42. Comparativa desplazamiento punto central caso Shaker M ponderado

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0,01471 m =14,71 mm

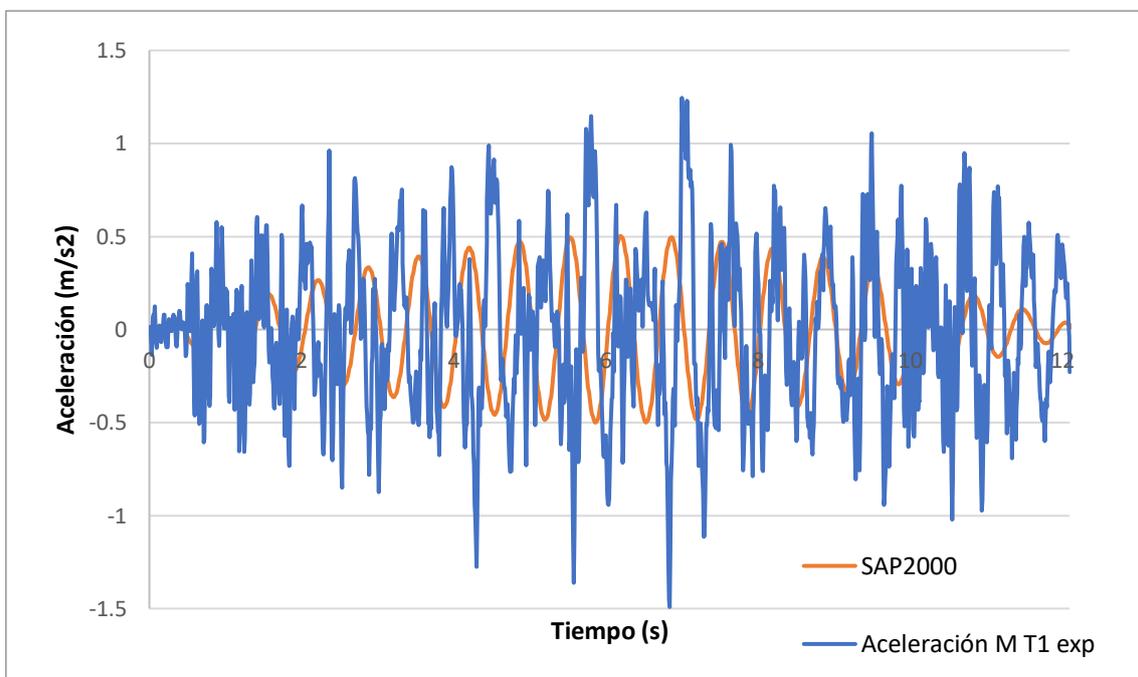


Ilustración 43. Comparativa aceleración punto central caso Shaker M ponderado

Valor máximo aceleración SAP2000 = 0,50258 m/s²

6.2.2. Caso deslizante:

En esta simulación se va a representar un tránsito peatonal simplificado. Tiene clasificación de tránsito ya que simula que las fuerzas van cambiando de posición por la plataforma, pero se simplificada puesto que ni la forma de andar ni las fuerzas de los pies son reales.

Cada pisada supone un escalón de subida, una meseta y el escalón de bajada. Aunque a primera vista podría parecer una carga constante, el hecho de que vaya cambiando de posición supone una alternancia similar a la de caminar, por este motivo se propone.

El modo de proceder para realizar la simulación es el siguiente:

1. Se debe realizar un mallado de la plataforma para poder posicionar los puntos donde se aplica cada paso, en este caso al ser pisadas medianas, son 18 pasos, cada mitad de la plataforma se debe dividir en 9 partes (con un mallado de cálculo de 4x2) como se muestra en la ilustración 44:

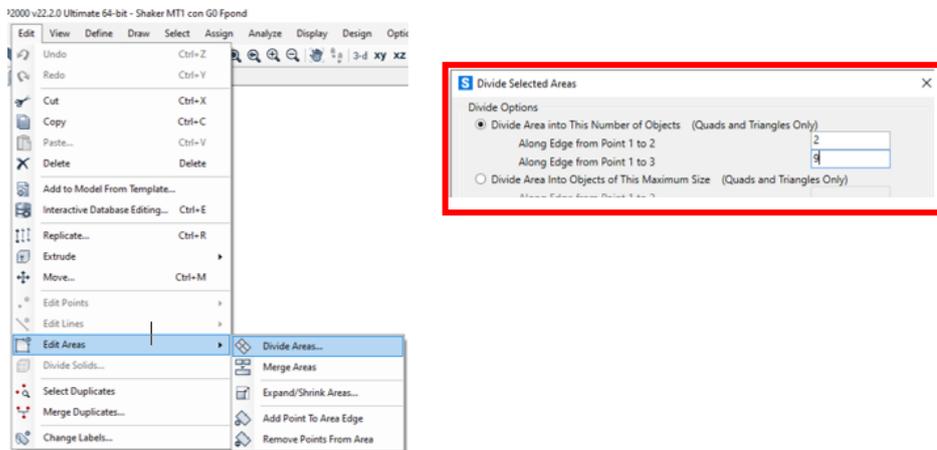


Ilustración 44. Divide Areas de la plataforma

2. Se deben definir 18 patrones de carga como se muestra en la ilustración 45, de tipo “live”, (que no tiene en cuenta la influencia del peso propio), 9 para los pasos del pie derecho y 9 para los pasos del pie izquierdo (aunque realmente no es necesario diferenciar entre pie derecho e izquierdo):

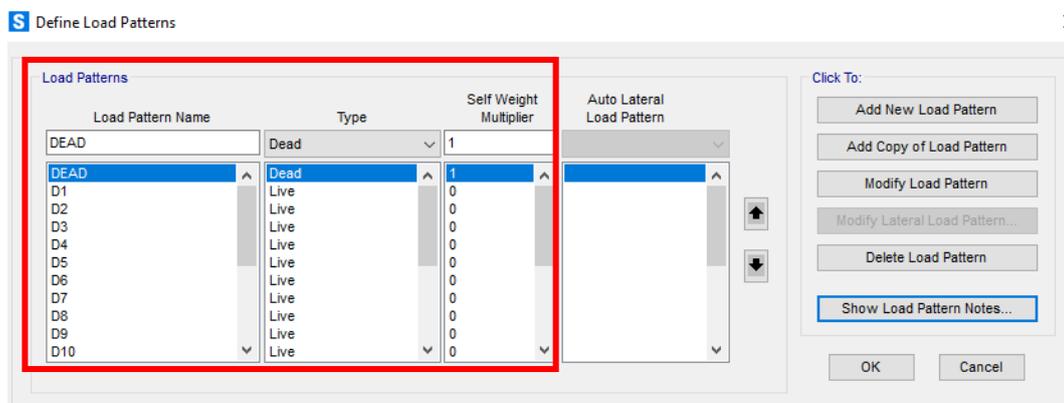


Ilustración 45. Definir “Load Patterns” del tránsito

3. Se debe definir la función del paso del tránsito:

A la hora de definir la función se debe seleccionar tipo “user” y especificar los puntos que la definen, es decir, los valores de la fuerza en función del tiempo.

Por lo tanto, la fuerza de cada pie va a ser siempre la misma para todas las pisadas, y corresponde con una determinada función temporal.

En este caso el valor de la fuerza máxima es de 1000 N y la duración del paso es de 0,75 s. Estos valores se han seleccionado porque son similares a los valores que ofrece la función de un paso real en el tránsito peatonal mediano como se verá más adelante.

La verdadera forma de la función de la fuerza de un pie de un tránsito peatonal tiene forma de “M” ya que las personas al caminar apoyamos antes el talón, después el pie completo repartiendo la carga y finalmente la puntera. La diferencia se muestra en la ilustración 46 Este caso se analizará más adelante.

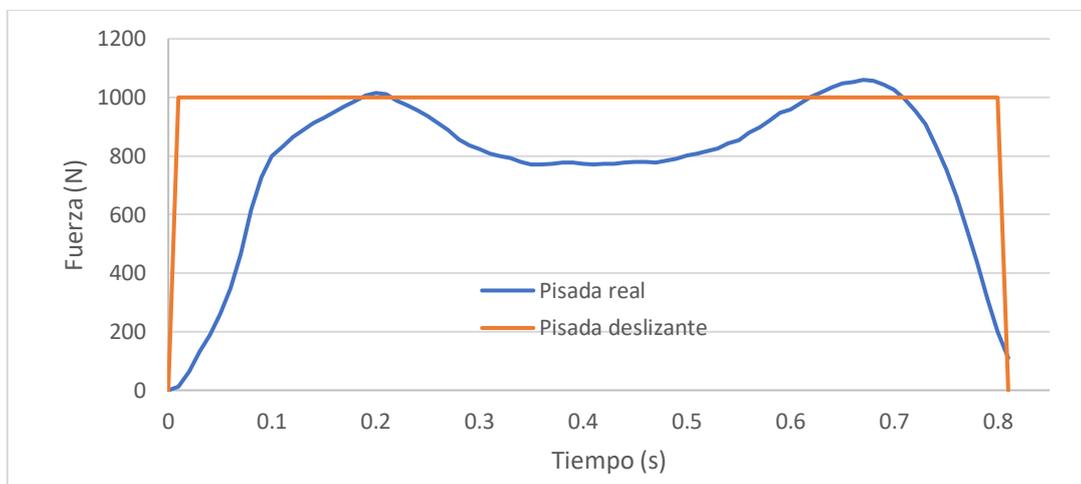


Ilustración 46. Pisada real vs Pisada deslizante

Además, la forma de andar no es real, se está suponiendo que nunca están ambos pies en el suelo, es decir, nunca se superponen las cargas. Y además cada paso tiene la misma duración.

En definitiva, se trata de un tránsito que simplifica claramente la realidad, la función de fuerza que se debe introducir en SAP2000 es la que se representa en la ilustración 47:

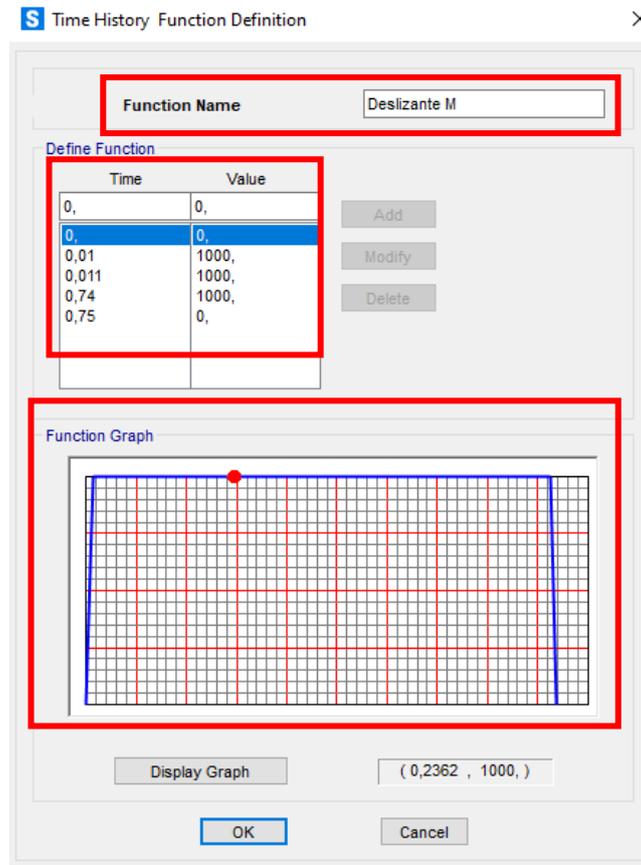


Ilustración 47. Función fuerza caso Deslizante M

- Se debe aplicar una fuerza de valor unidad asociada a cada patrón de carga de cada paso, es decir, aplicar cada patrón de carga de cada paso al punto correspondiente de la plataforma donde se aplicará ese paso al simular el tránsito. Se detalla en la ilustración 48:

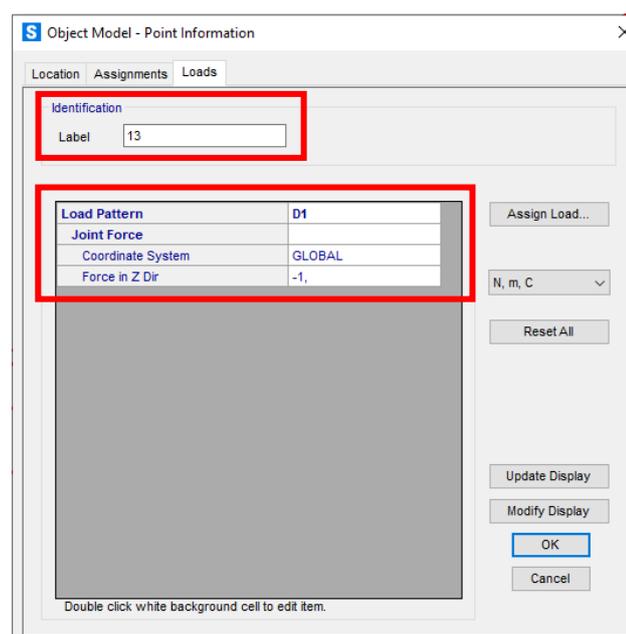


Ilustración 48. Punto aplicación de la carga unidad caso Deslizante M

Se presupone que el peatón al andar mueve primero el pie derecho, y después el izquierdo, de manera secuencial, y que el peatón camina por la parte central de la plataforma.

Se ha seleccionado el extremo izquierdo de la plataforma como el punto donde se aplica el primer paso derecho y el extremo derecho de la plataforma como punto donde se aplica el paso derecho número 19. De esta manera la plataforma se recorre en 18 pasos medianos.

5. Se debe crear el caso de carga (“load case”) como el de la ilustración 49 del tipo “TIME HISTORY”, e ir introduciendo cada patrón de carga de cada paso con la función de fuerza del paso:

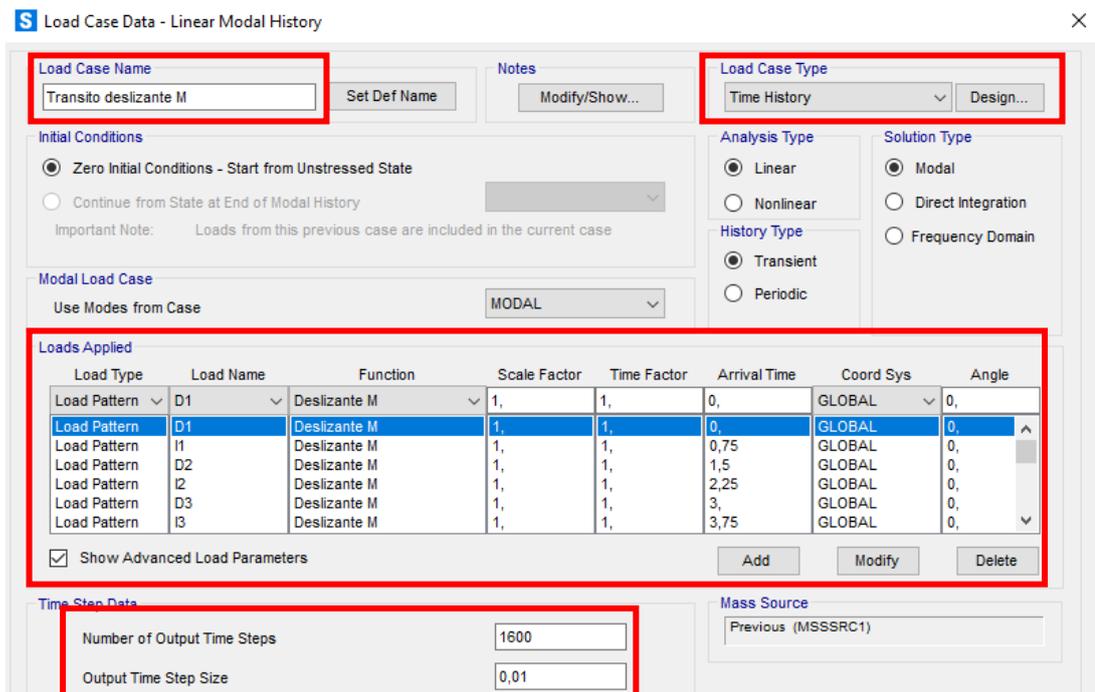


Ilustración 49. Load case caso Deslizante M

Para los valores de “arrival time” se ha seleccionado: 0,75 s, este valor representa el tiempo en el que comienza cada paso respecto de la referencia (en este caso 0 s).

Como se ha comentado antes, como no hay solape de fuerzas, es decir, nunca están ambos pies en el suelo al mismo tiempo, se hace coincidir el valor del “arrival time” de cada paso respecto al anterior, con el valor de la duración del paso (función de fuerza del paso), en este caso: 0,75 s.

Destacar que como para todas las simulaciones el valor del amortiguamiento (“Constant”) está ajustado al de la plataforma real como se especifica en el epígrafe: “ 5.3.2. Ajuste del amortiguamiento para el resto de las simulaciones”.

Aunque en la ilustración del “load case” solo se ven un número de pasos, se deben ir alternando pie derecho y pie izquierdo, desde el primero hasta el último, es decir, para el caso de pisadas medianas son 18 pasos, siendo el último I9.

Para el caso de pisadas cortas que se estudia en el Anexo “1. Simulaciones de verificación en “SAP2000”. Caso pisadas cortas a 90 ppm” el último es I10, al ser 20 pasos.

A pesar de esto, en verdad se define siempre un paso más, es decir, aunque la plataforma se recorre en 18 y 20 pasos, en pisadas medianas y cortas respectivamente. Al empezar pisando en el extremo izquierdo de la plataforma, el último paso se aplica en el extremo derecho, es el paso número 19 y 21, que corresponde con D10 y D11 respectivamente para pisadas medianas y cortas.

Este procedimiento se realiza en todas las simulaciones de tránsitos desarrolladas.

6. Se representa el valor del desplazamiento y aceleración en función del tiempo del punto central, y se exportan los valores a Excel para representarlos, comparándolos con los resultados experimentales se obtienen las gráficas de las ilustraciones 50 y 51:

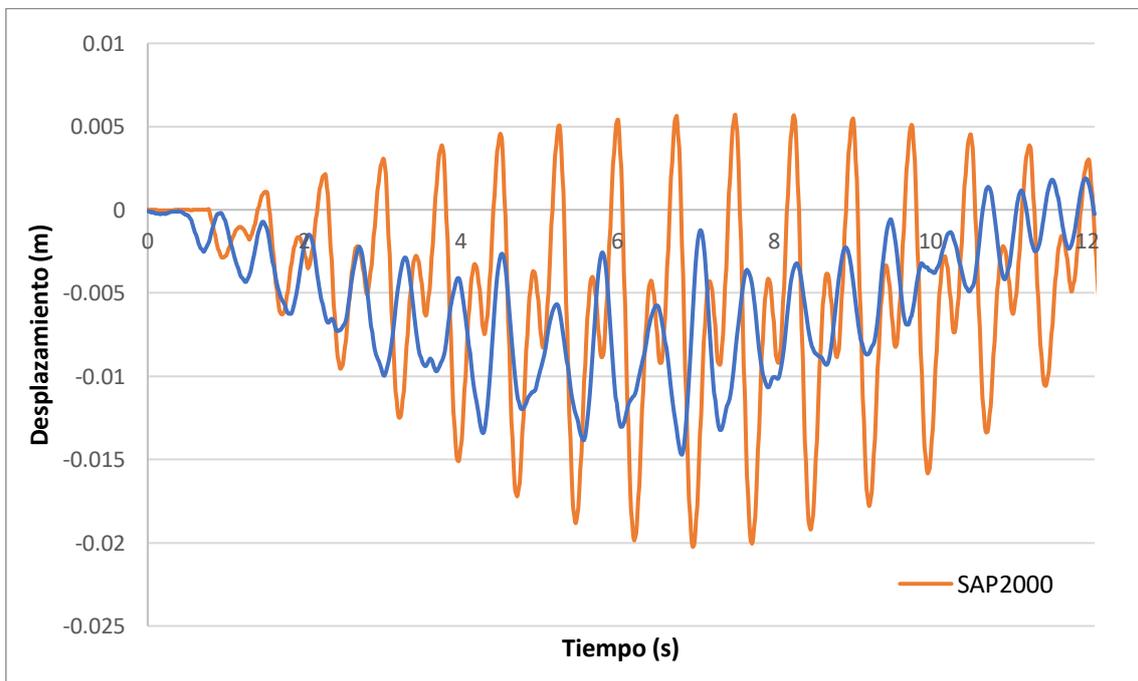


Ilustración 50. Comparativa desplazamiento punto central caso Deslizante M

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.02026 m = 20.26 mm

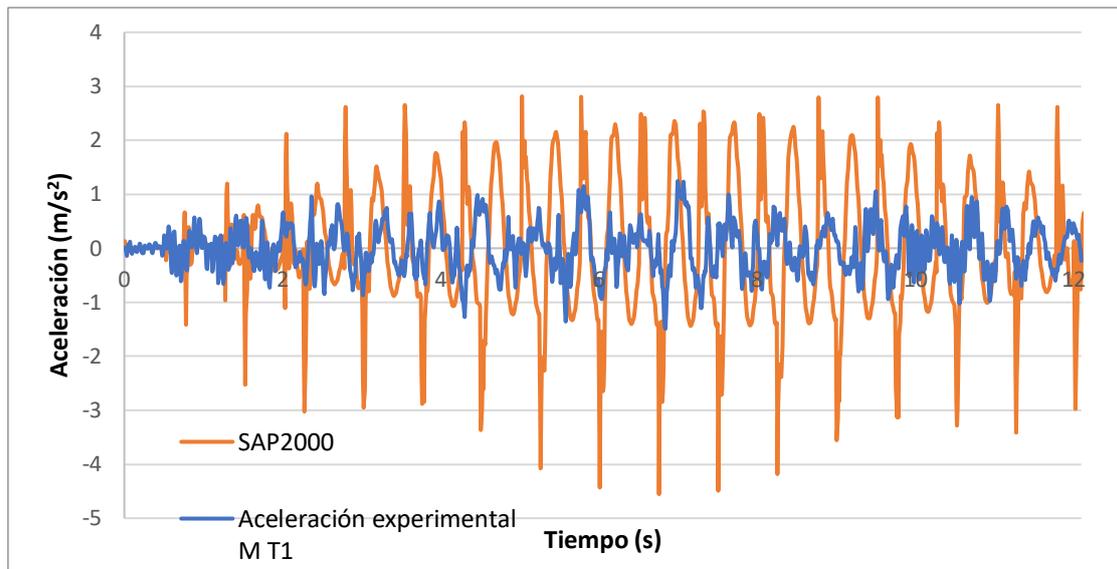


Ilustración 51. Comparativa aceleración punto central caso Deslizante M

Valor máximo aceleración SAP2000 = 4.55423 m/s²

A la vista de los resultados, se está sobrecargando la plataforma, es decir, se está cargando más de lo que se debe.

Se ha seleccionado como valor medio de la fuerza de cada pisada 1000 N. Para reducir este, se hace proporcionalmente más pequeño a partir de la relación entre los desplazamientos máximos registrados en el ensayo experimental y el de la simulación deslizante, el valor de la fuerza es de:

$$F = 1000 \text{ N} \cdot 14.71/20.26 = 726.06 \text{ N}$$

Se obtienen los siguientes resultados siguiendo el mismo procedimiento anterior, graficados en las ilustraciones 52 y 53:

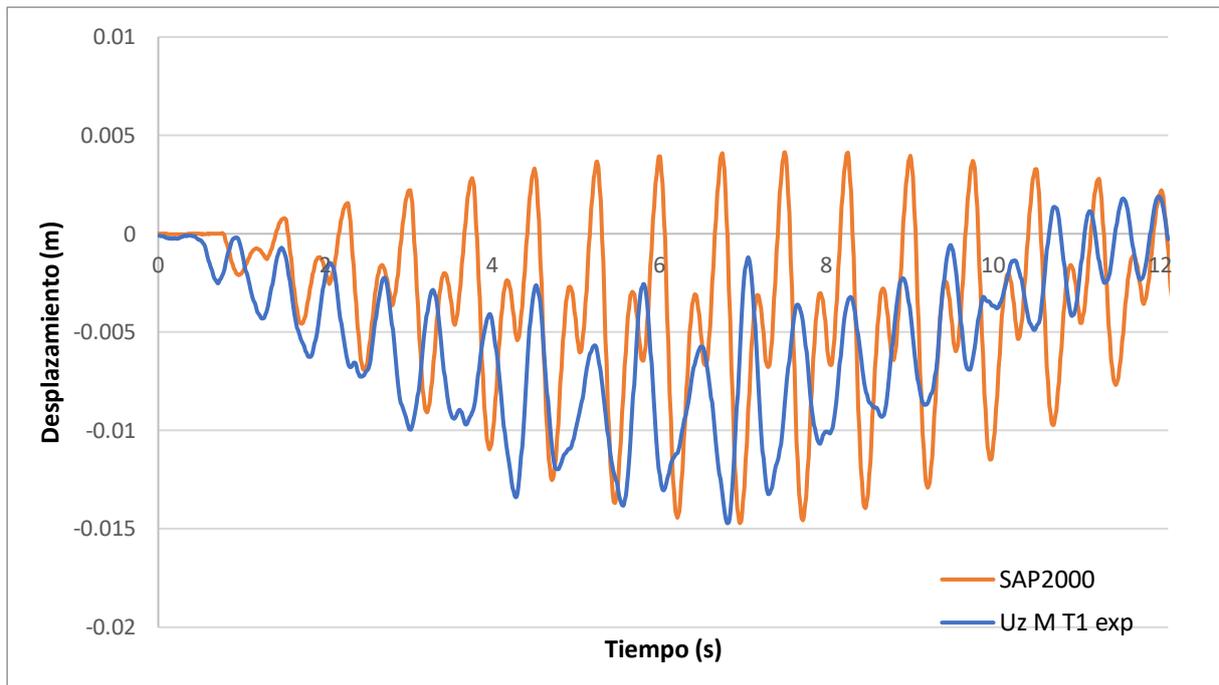


Ilustración 52. Comparativa desplazamiento punto central caso Deslizante M ponderado

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.01471 m = 14.71 mm

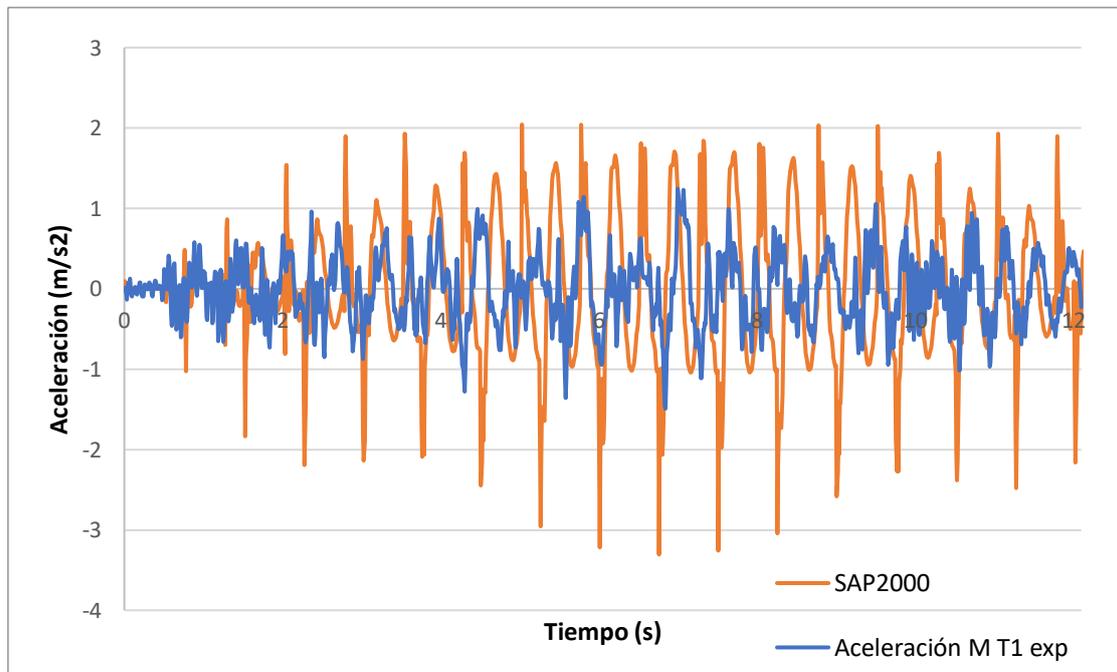


Ilustración 53. Comparativa aceleración punto central caso Deslizante M ponderado

Valor máximo aceleración SAP2000 = 3.30665 m/s²

6.2.3. Caso pulsante:

Se trata de un caso muy similar a la simulación anterior, con la única salvedad de que ahora si se presupone que se apoyan ambos pies en el suelo al mismo tiempo. Es decir, antes de que la carga de cada paso haya dejado de aplicar fuerza sobre la plataforma, el siguiente paso ya estará efectuando carga en la siguiente posición espacial.

Esto se puede hacer de dos formas en SAP2000:

- Modificando el valor de los “arrival time” haciendo que no coincida el valor de este con la duración de la función del paso como sí lo hacía en el caso anterior.
- Seleccionando un valor diferente de 1 para el parámetro “Time factor” que multiplica por ese valor la duración del paso. Si el valor del “arrival time” coincide con la duración del paso, pero el valor del “time factor” no es 1, no coincide la duración del paso con la duración de la función del paso y se produce solape entre los pies.

En este caso se ha seleccionado la primera opción, con un solape de 0,15 segundos.

El procedimiento de simulación es el mismo que para el caso anterior.

Solo cambian los valores del “arrival time” en el “load case” como en la ilustración 54:

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor	Time Factor	Arrival Time	Coord Sys	Angle
Load Pattern	D1	Deslizante M	1,	1,	0,	GLOBAL	0,
Load Pattern	I1	Deslizante M	1,	1,	0,6	GLOBAL	0,
Load Pattern	D2	Deslizante M	1,	1,	1,2	GLOBAL	0,
Load Pattern	I2	Deslizante M	1,	1,	1,8	GLOBAL	0,
Load Pattern	D3	Deslizante M	1,	1,	2,4	GLOBAL	0,
Load Pattern	I3	Deslizante M	1,	1,	2,95	GLOBAL	0,

Time Step Data

Number of Output Time Steps: 1600
Output Time Step Size: 0,01

Ilustración 54. Load case caso pulsante M

Finalmente se obtienen los valores del desplazamiento y aceleración en función del tiempo del punto central (se exportan los valores a Excel para representarlos).

Se comparan con los resultados reales del tránsito peatonal experimental y se grafican en las ilustraciones 55 y 56:

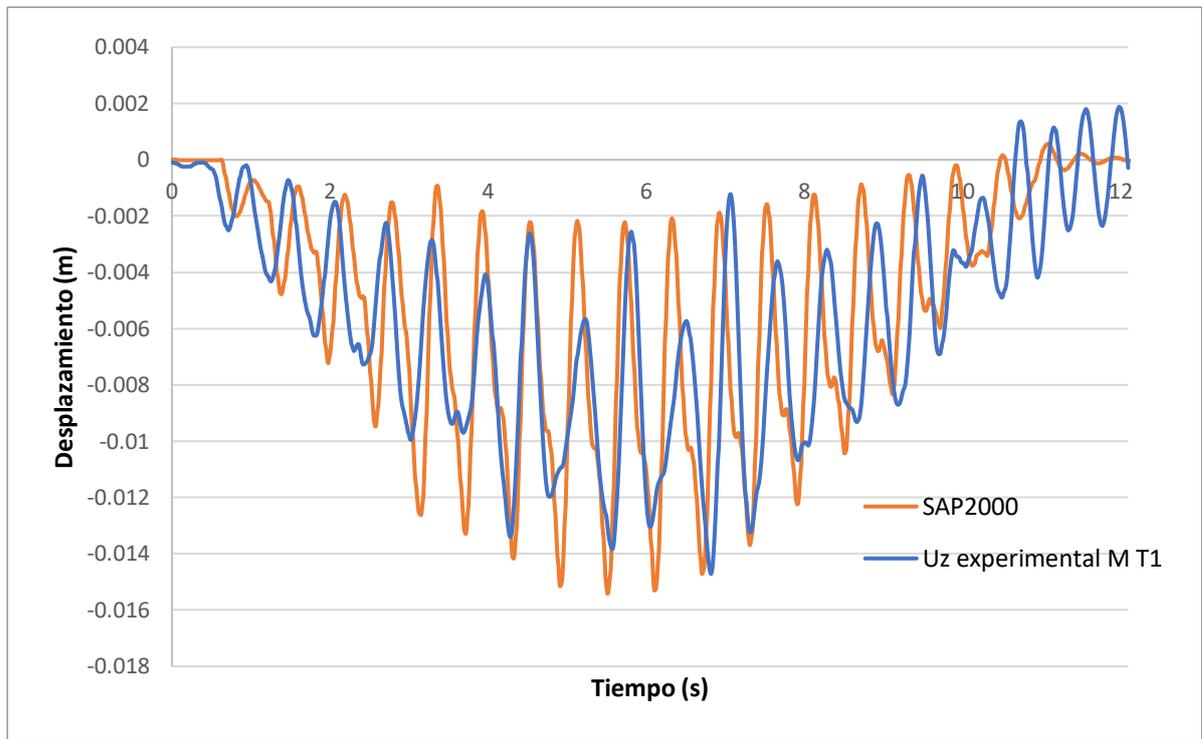


Ilustración 55. Comparativa desplazamiento punto central caso Pulsante M

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.01542 m = 15.42 mm

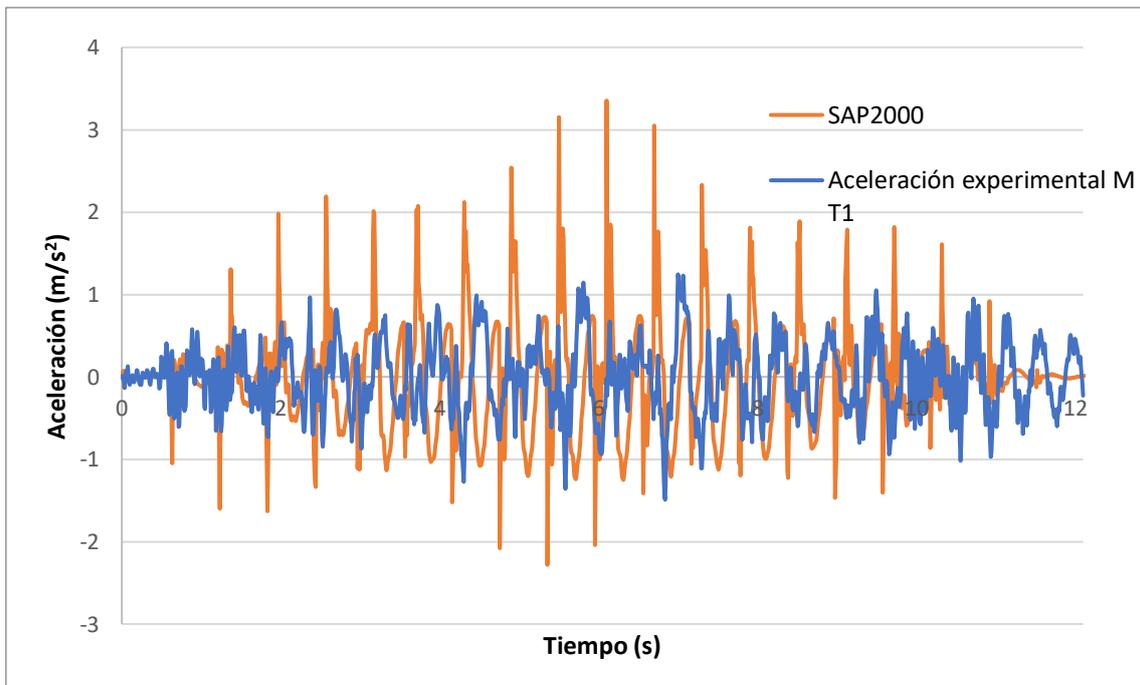


Ilustración 56. Comparativa aceleración punto central caso Pulsante M

Valor máximo aceleración SAP2000 = 3.3542 m/s²

Al igual que en el caso deslizante, se ha seleccionado como valor medio de la fuerza de cada pisada 1000 N. Para reducir este, se hace proporcionalmente más pequeño a partir de la relación entre los desplazamientos máximos registrados en el ensayo experimental y el de la simulación pulsante, el valor de la fuerza ponderada para ajustar el máximo valor del desplazamiento es de:

$$F = 1000 \text{ N} \cdot 14.71/15.42 = 953.955 \text{ N}$$

Se obtienen los siguientes resultados siguiendo el mismo procedimiento anterior y se grafican en las ilustraciones 57 y 58:

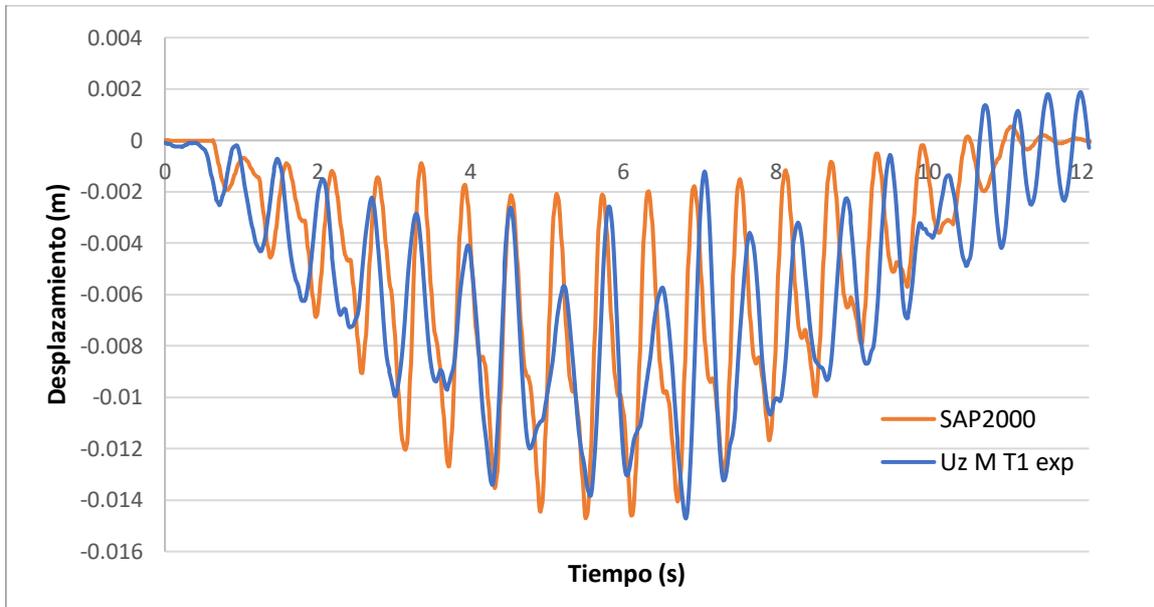


Ilustración 57. Comparativa desplazamiento punto central caso Pulsante M ponderado

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.01471 m = 14.71 mm

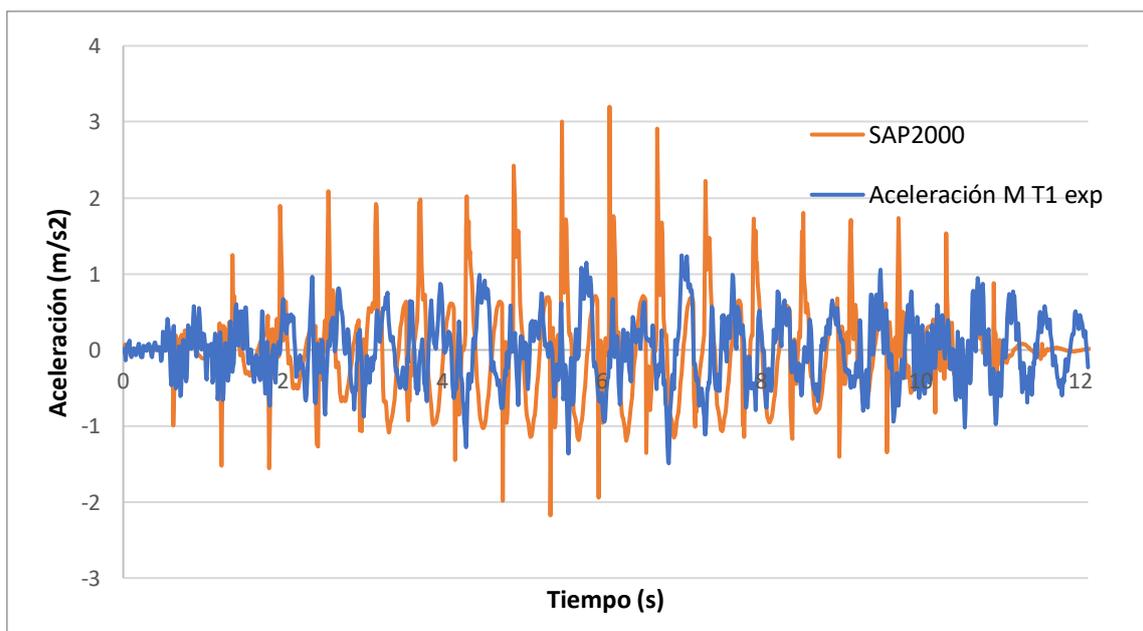


Ilustración 58. Comparativa aceleración punto central caso Pulsante M ponderado

Valor máximo aceleración SAP2000 = 3.19971 m/s²

6.2.4. Caso robot:

En este caso se simula un tránsito peatonal que podría realizar un robot. Es decir, un tránsito en el que la duración de cada paso es igual, además de que repite siempre la misma función de fuerza del paso.

Se selecciona como función de carga del paso una función real, obtenida mediante las plantillas bluetooth, que se detallará en el epígrafe “6.2.5. Caso tránsito peatonal real”.

Como tiempo entre los pasos se ha seleccionado un valor real del ensayo experimental, pero en este caso no se tiene solapamiento de pies.

Por lo tanto, el valor del “arrival time” coincide con el valor de la duración de la función de fuerza del paso y es siempre constante. De esta manera se presupone que en ningún momento están ambos pies en la plataforma.

Como se ha comentado anteriormente este caso a su vez está dividido en dos, la única diferencia es que el robot de 2 pasos diferencia pie derecho de pie izquierdo, y, por tanto, se ha seleccionado otra función de fuerza para el otro pie.

6.4.2.1. Caso robot 1 paso:

El procedimiento que se debe seguir es el mismo que el especificado en el epígrafe “6.2.2. Caso deslizante”, con dos diferencias principales:

1. A la hora de definir la función, en vez de seleccionar tipo “user” y especificar los puntos que la definen, se selecciona “From File” y se exporta de un fichero “.txt” que más adelante se especificará de donde se han obtenido los valores de las fuerzas de los pasos reales.

Se define la función del paso del robot para los dos pies (paso D6 tránsito real peatonal experimental, se ha seleccionado este ya que es el más similar a la forma de “M” teórica de un paso peatonal): En la ilustración 59 se muestran los posibles 9 pasos derechos registrados durante la experimentación del tránsito peatonal T1 M:

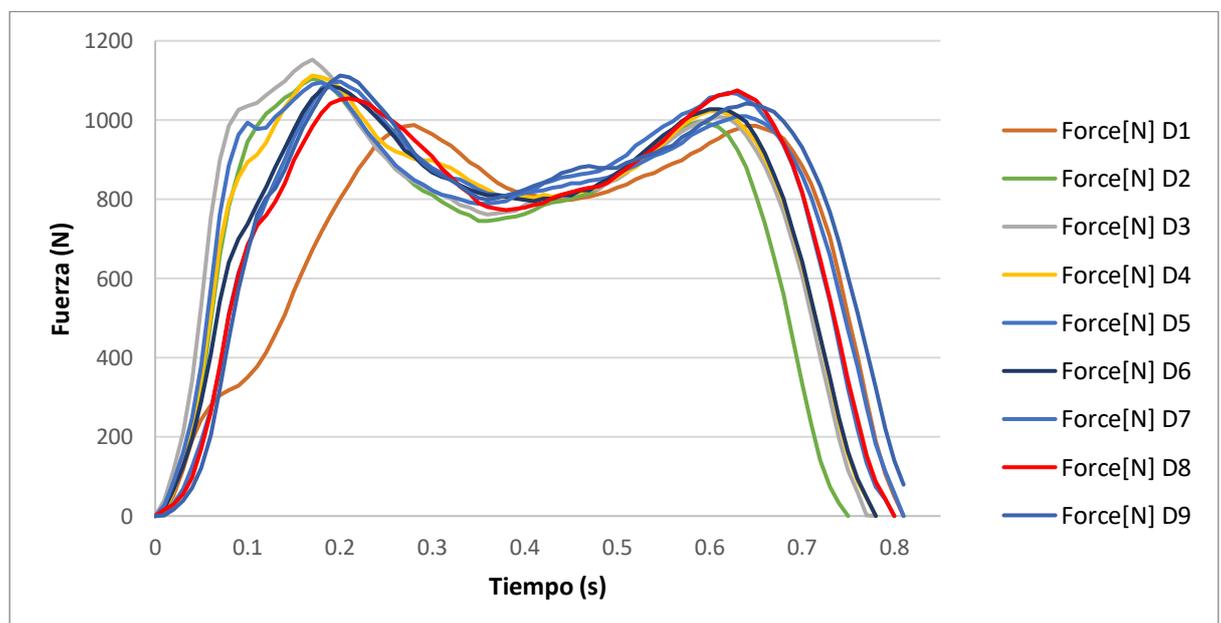


Ilustración 59. Fuerza de las pisadas M a 90 ppm T1

En la ilustración 60 se muestra la función de fuerza de la pisada finalmente seleccionada:

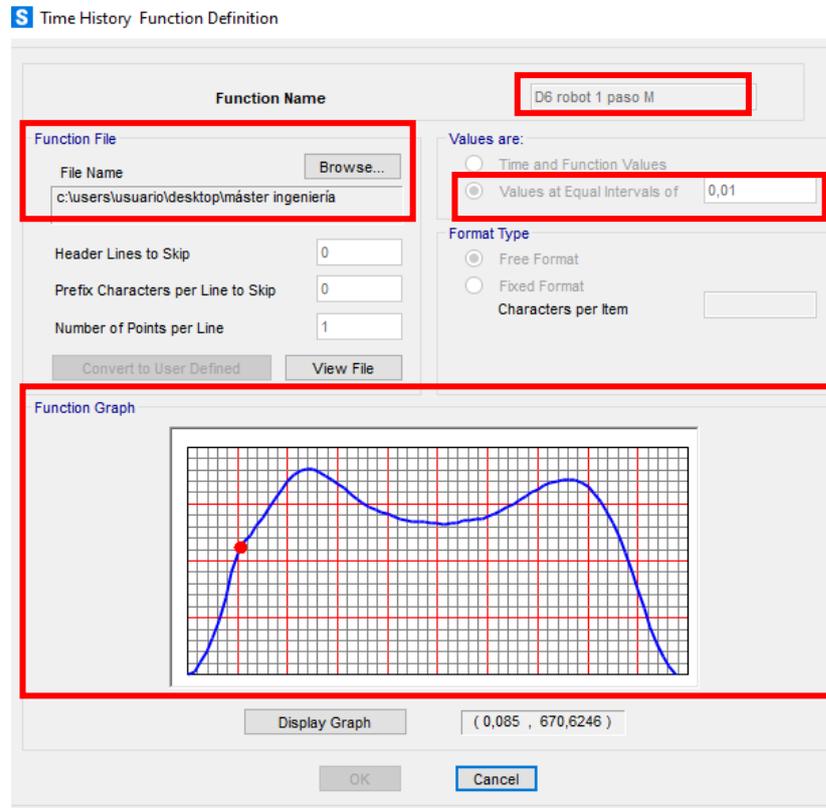


Ilustración 60. Función fuerza Paso D6 caso Robot 1 paso M

Se ha seleccionado como referencia el paso D6 (paso real del tránsito peatonal experimental T1) del fichero Excel de tránsito real peatonal experimental de pisadas medianas a 90 ppm.

El motivo es porque se trata de un paso con una duración que está en la media y tiene forma aproximada de “M” comparado con el resto de pasos del tránsito experimental con pisadas medianas a 90 ppm.

2. El valor del “arrival time” ya no es 0,75 s, sino de 0,68 s, medidos experimentalmente para este paso.

El “load case” es igual que para el caso anterior, simplemente con la función “D6” y con este valor de “arrival time” intercalando de nuevo pie derecho e izquierdo (aunque con la misma función D6 para ambos).

Se representan los valores del desplazamiento y la aceleración del punto central exportando los valores a Excel nuevamente, se comparan con los obtenidos del tránsito peatonal real T1, y se grafican en las ilustraciones 61 y 62:

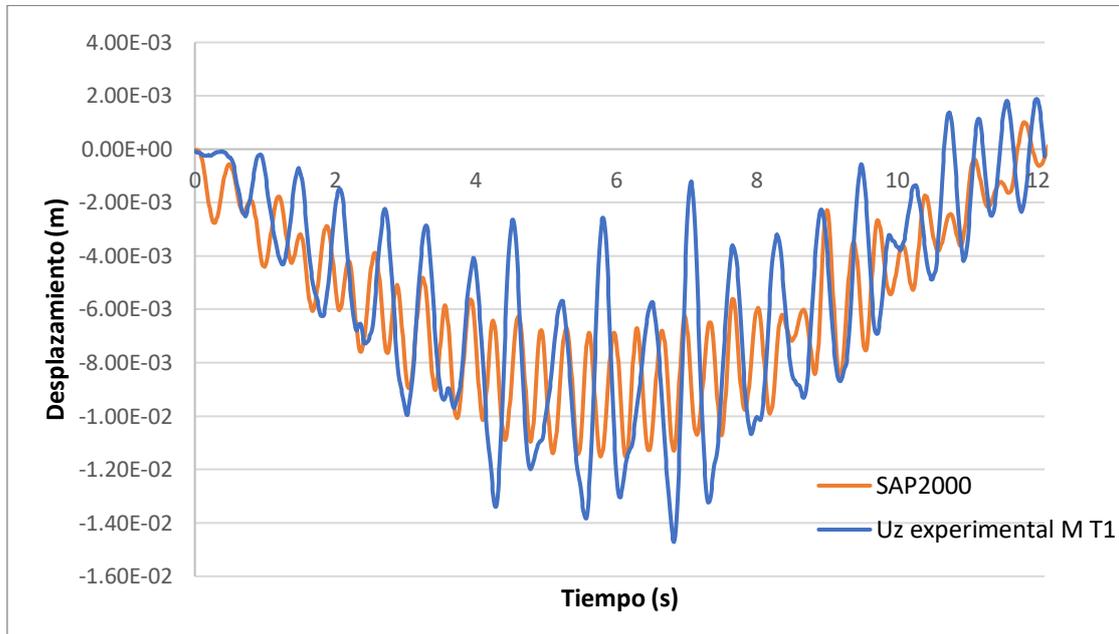


Ilustración 61. Comparativa desplazamiento punto central caso Robot 1 paso D6 M

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.01155 m = 11.55 mm

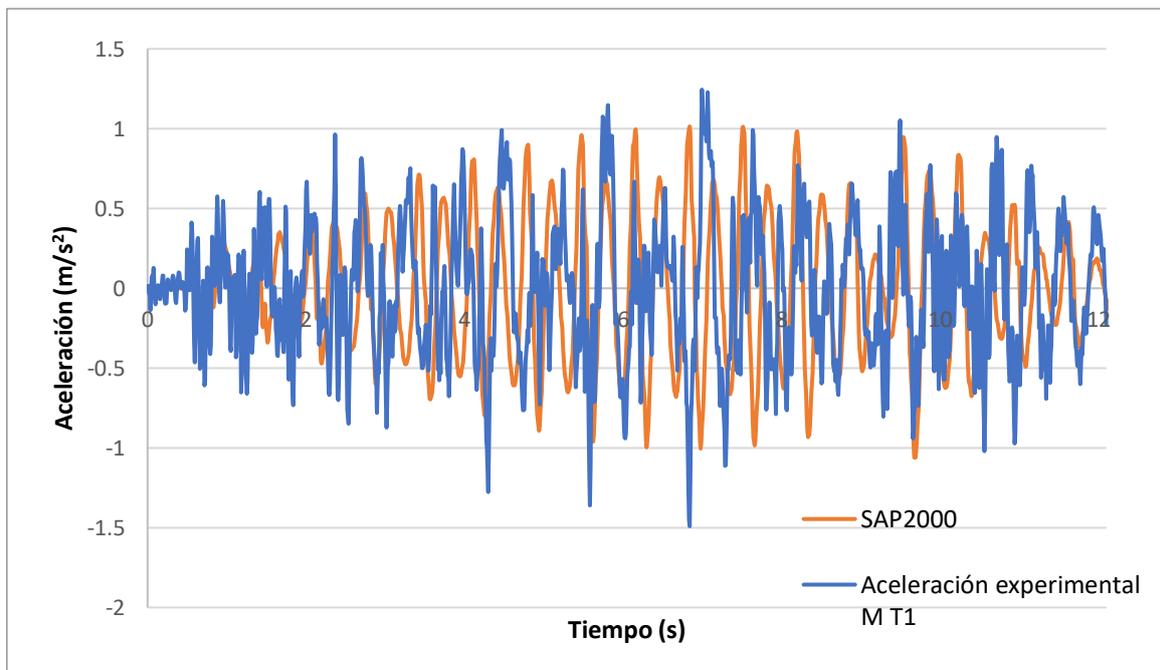


Ilustración 62. Comparativa aceleración punto central caso Robot 1 paso D6 M

Valor máximo aceleración SAP2000 = 1.06143 m/s²

En este caso la respuesta está subestimada, es decir, es menor el resultado obtenido de la simulación que el registrado de manera experimental. Se debe a que el paso "D6" es un paso de valor de fuerza intermedio, es decir, hay pasos con mayor fuerza durante el ensayo experimental.

Para ajustar los resultados se pondera de la misma forma que anteriormente:

$$F = D6 \cdot 14,71/11,55 \rightarrow \text{es decir, se aumenta el valor de la función de fuerzas de la pisada}$$

Se obtienen los siguientes resultados siguiendo el mismo procedimiento anterior y se grafican en las ilustraciones 63 y 64:

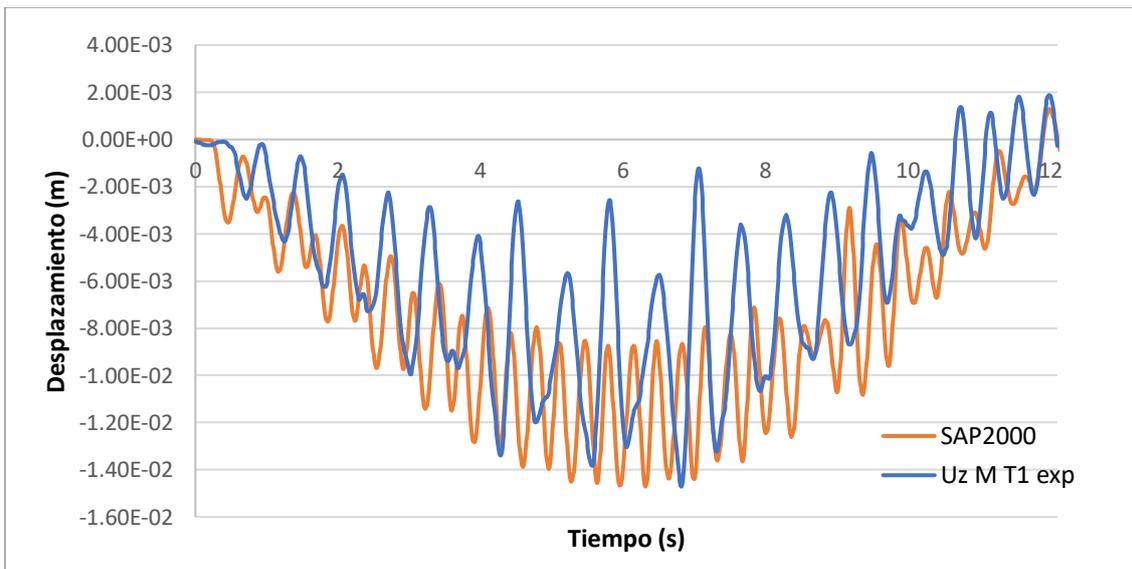


Ilustración 63. Comparativa desplazamiento punto central caso Robot 1 paso D6 M ponderado

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.01471 m = 14.71 mm

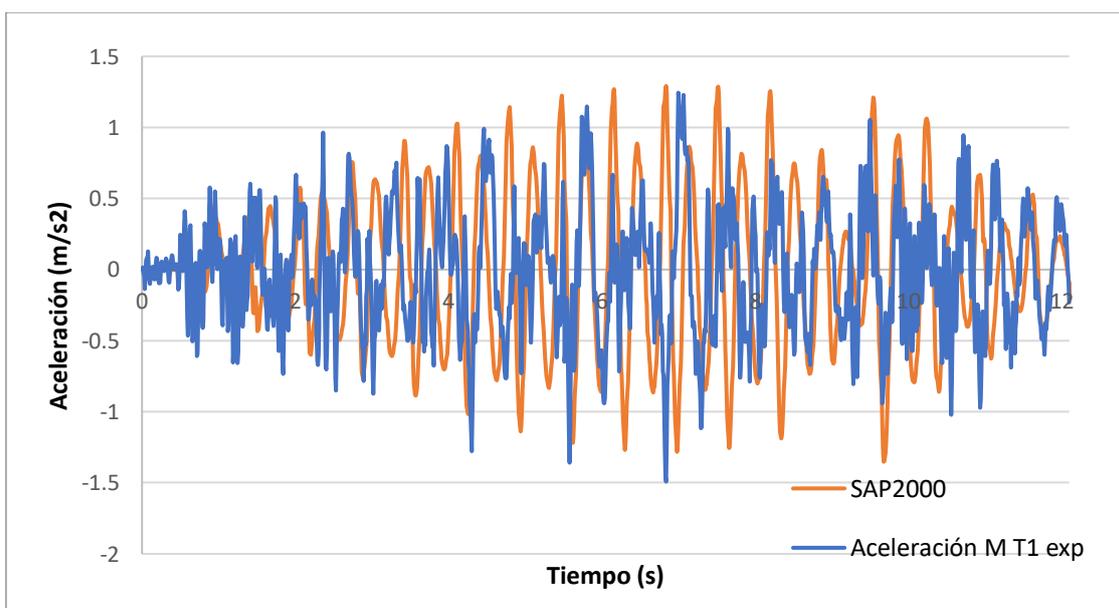


Ilustración 64. Comparativa aceleración punto central caso Robot 1 paso D6 M ponderado

Valor máximo aceleración SAP2000 = 1.35184 m/s^2

6.4.2.2. Caso robot 2 pasos:

Este caso es igual que el anterior, la única diferencia se encuentra que ahora al definir el caso de carga, se debe asociar a los patrones de carga de los pies derechos la función del paso derecho (“D6”), y a los izquierdos, la del paso izquierdo (“I6”).

La forma de importar la función es igual, pero en este caso se deben importar dos (pie derecho y pie izquierdo), es decir, además de paso D6 se importa el paso I6 como en la ilustración 65:

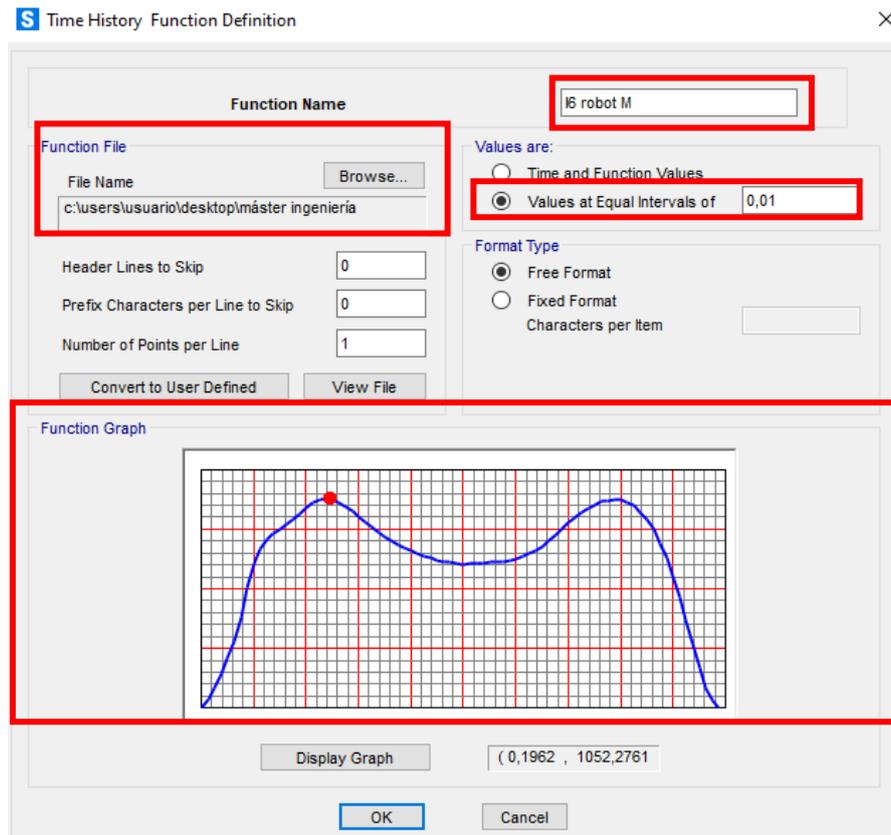


Ilustración 65. Función fuerza paso I6 caso Robot 2 pasos M

Se representan los valores del desplazamiento y la aceleración del punto central exportando los valores a Excel de nuevo, se comparan con los obtenidos del tránsito peatonal real T1 y se grafican en las ilustraciones 66 y 67:

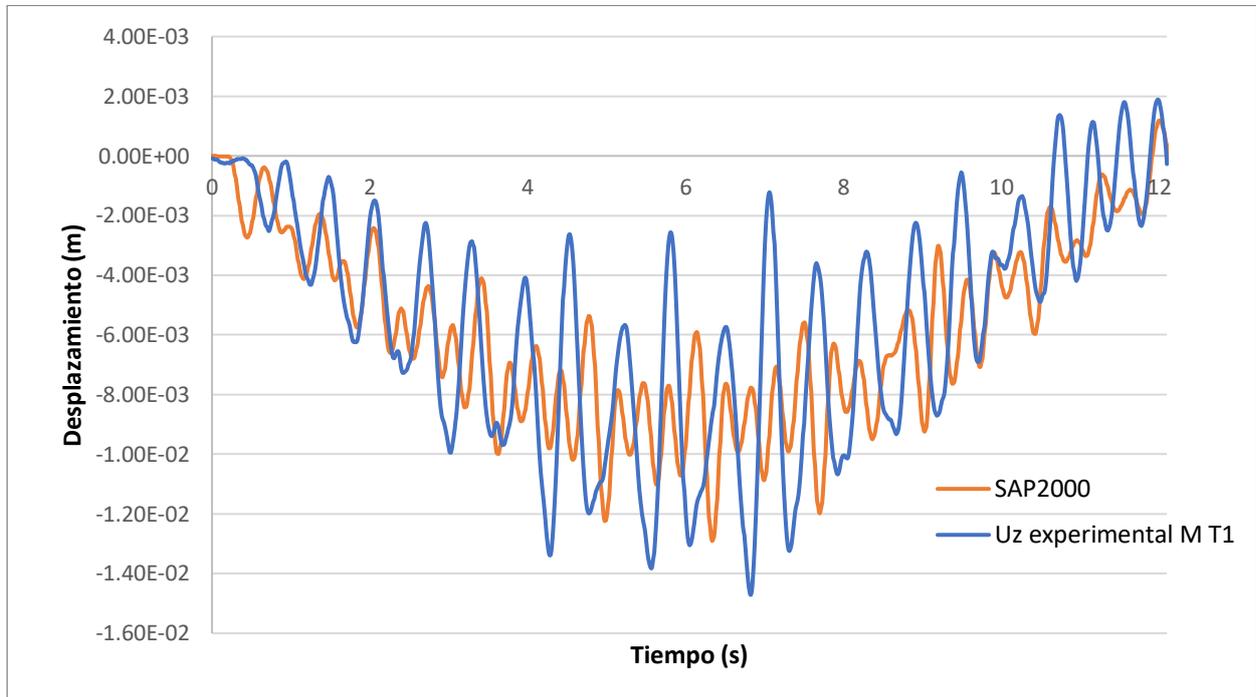


Ilustración 66. Comparativa desplazamiento punto central caso Robot 2 pasos D6 I6 M

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.01291 m = 12.91 mm

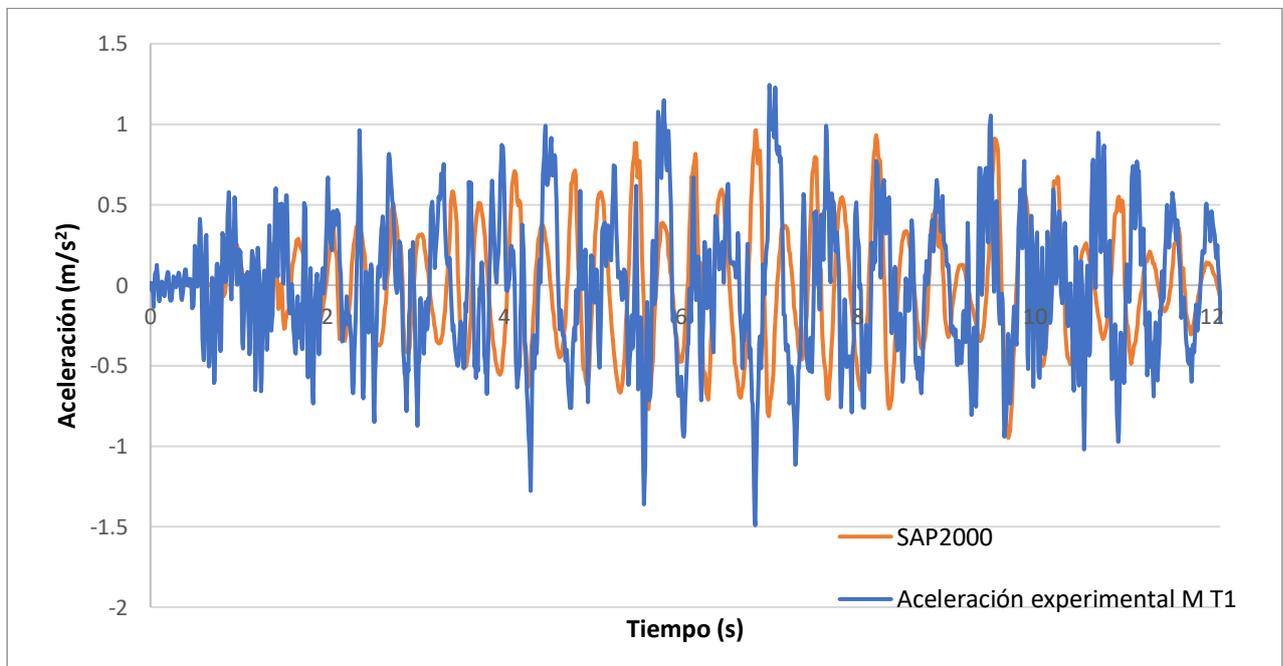


Ilustración 67. Comparativa aceleración punto central caso Robot 2 pasos D6 I6 M

Valor máximo aceleración SAP2000 = 0.96271 m/s²

De nuevo en este caso la respuesta está subestimada. Se debe a que los pasos “D6” y “I6” son pasos de valor de fuerza intermedio, es decir, hay pasos con mayor fuerza durante el ensayo experimental.

Para ajustar los resultados se pondera de la misma forma que anteriormente:

$$F = D6 \cdot 14.71/12.91$$

$$F = I6 \cdot 14.71/12.91$$

Se obtienen los siguientes resultados siguiendo el mismo procedimiento anterior y se grafican en las ilustraciones 68 y 69:

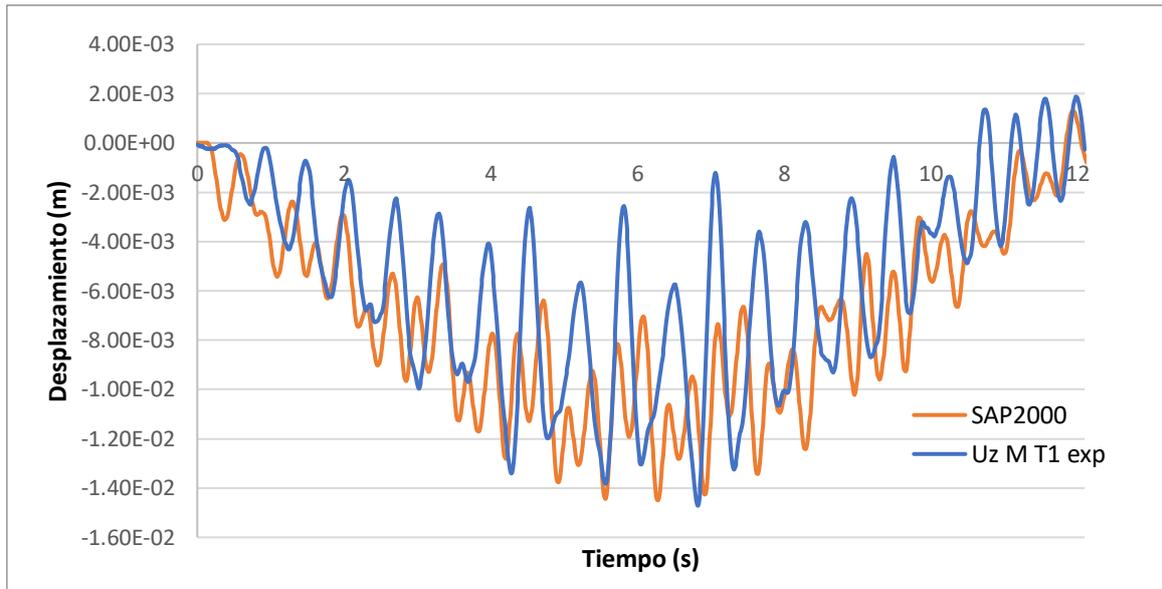


Ilustración 68. Comparativa desplazamiento punto central caso Robot 2 pasos D6 I6 M ponderado

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.0145 m = 14.5 mm

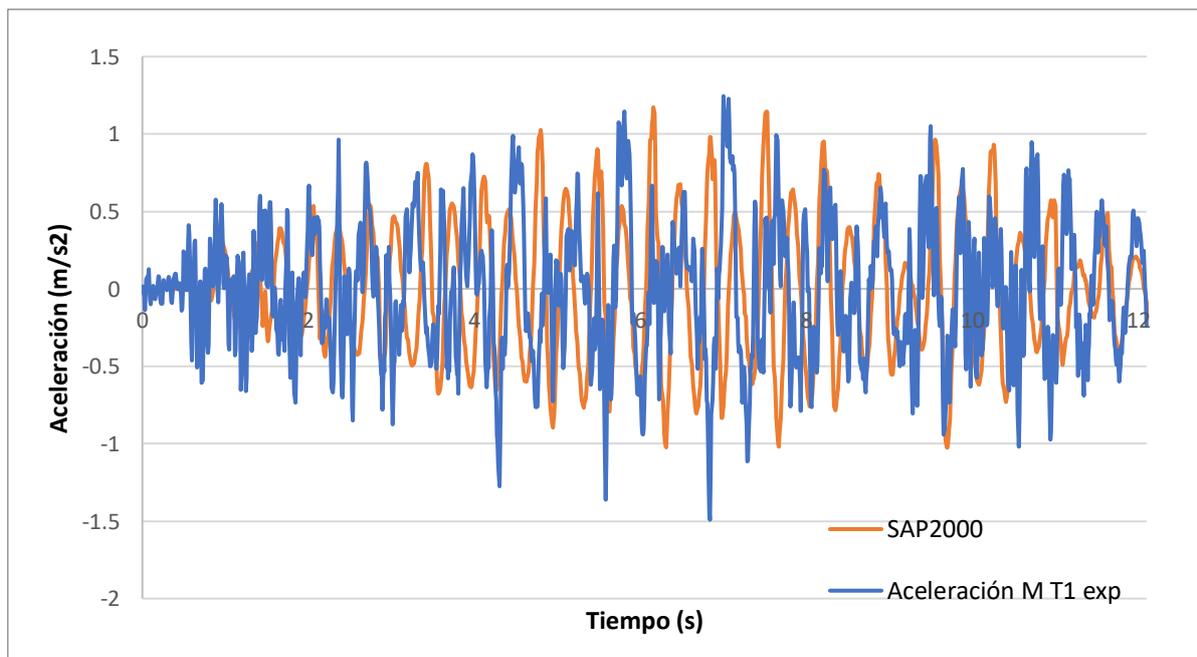


Ilustración 69. Comparativa aceleración punto central caso Robot 2 pasos D6 I6 M ponderado

Valor máximo aceleración SAP2000 = 1.17263 m/s²

6.2.5. Caso tránsito peatonal real:

En este caso se va a simular el mismo caso de tránsito peatonal experimental con el que se están comparando todas las simulaciones, para poder ver como se aproximan los resultados a los reales.

El procedimiento para realizar las simulaciones en el software de cálculo SAP2000 es el mismo que el que se ha ido desarrollando anteriormente. Pero ahora, todas las funciones de los pasos, son diferentes entre sí, además de que corresponden con los valores reales medidos con las plantillas bluetooth usadas durante la simulación real.

Además, la duración de cada paso, y el momento en el que comienza cada paso respecto de la referencia (“arrival time”) coinciden en valor con la experimentación real.

En definitiva, se está simulando de una manera real con determinadas limitaciones el tránsito experimental. En este caso el tránsito peatonal experimental con pisadas medianas efectuadas a 90 ppm, para el caso T1.

Los resultados no van a ser exactamente iguales que en la realidad, entre otras cosas, porque el software de cálculo SAP2000 como se ha comentado anteriormente, no permite representar la influencia de masas móviles.

Y al andar un peatón, al poner en movimiento su masa, genera inercia, y esta afecta sobre la respuesta de la estructura. Además del problema del ajuste del amortiguamiento del conjunto plataforma peatón comentado también anteriormente.

Se registran los valores de las pisadas del peatón durante la experimentación T1 M en la ilustración 70:

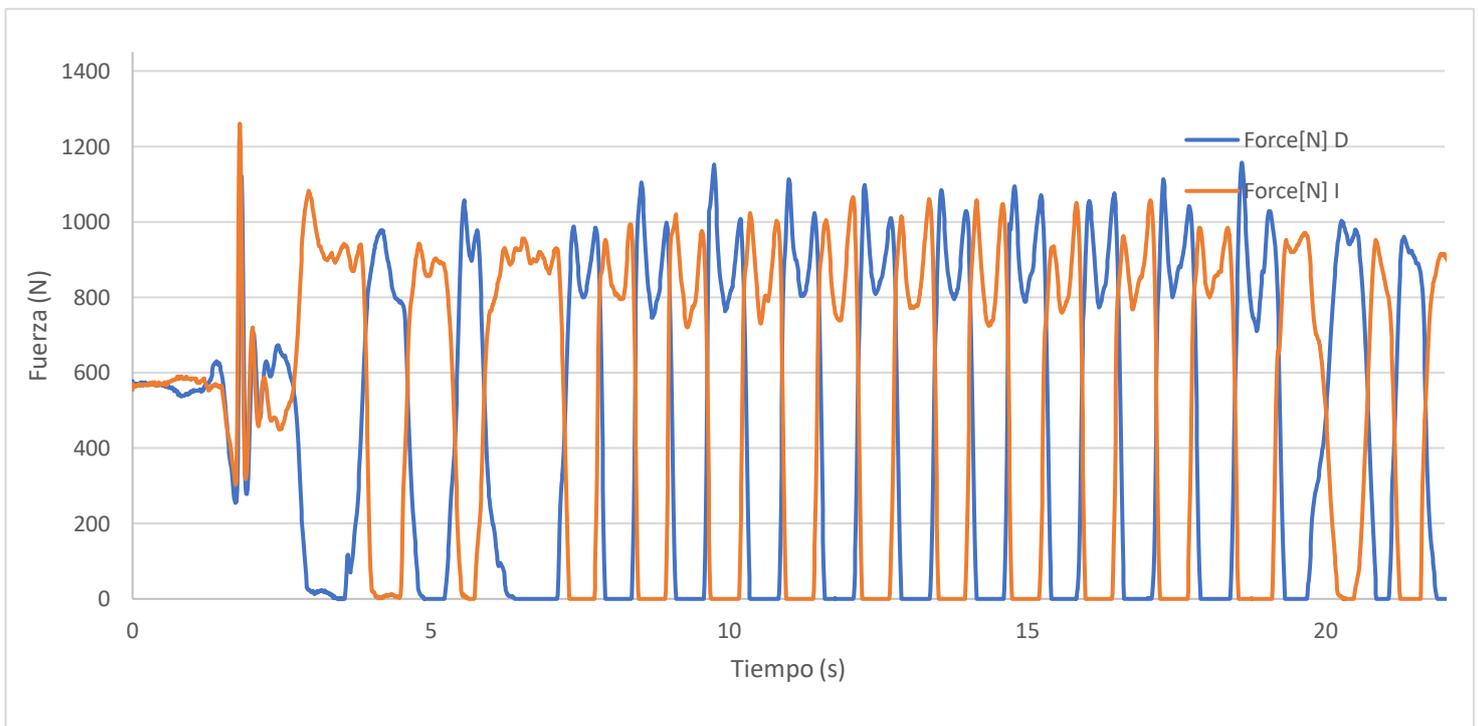


Ilustración 70. Fuerza Pisadas experimentales M 90 ppm T1 sin referenciar

Se deben exportar los valores en “.txt”, en este caso a Excel para poder graficarlos. Aunque posteriormente se deben volver a exportar a “.txt” separando cada pisada para poder importarlos a SAP2000.

En la ilustración 70 se observa que, al principio las pisadas son irregulares y no coinciden con un tránsito peatonal, esto es debido a que durante la experimentación antes de comenzar el tránsito no se está andando como tal sobre la plataforma.

Por lo tanto, se deben seleccionar los valores de las pisadas del tránsito que se representan en la ilustración 71, que son las que se deben exportar a SAP2000 para definir las funciones de cada paso:

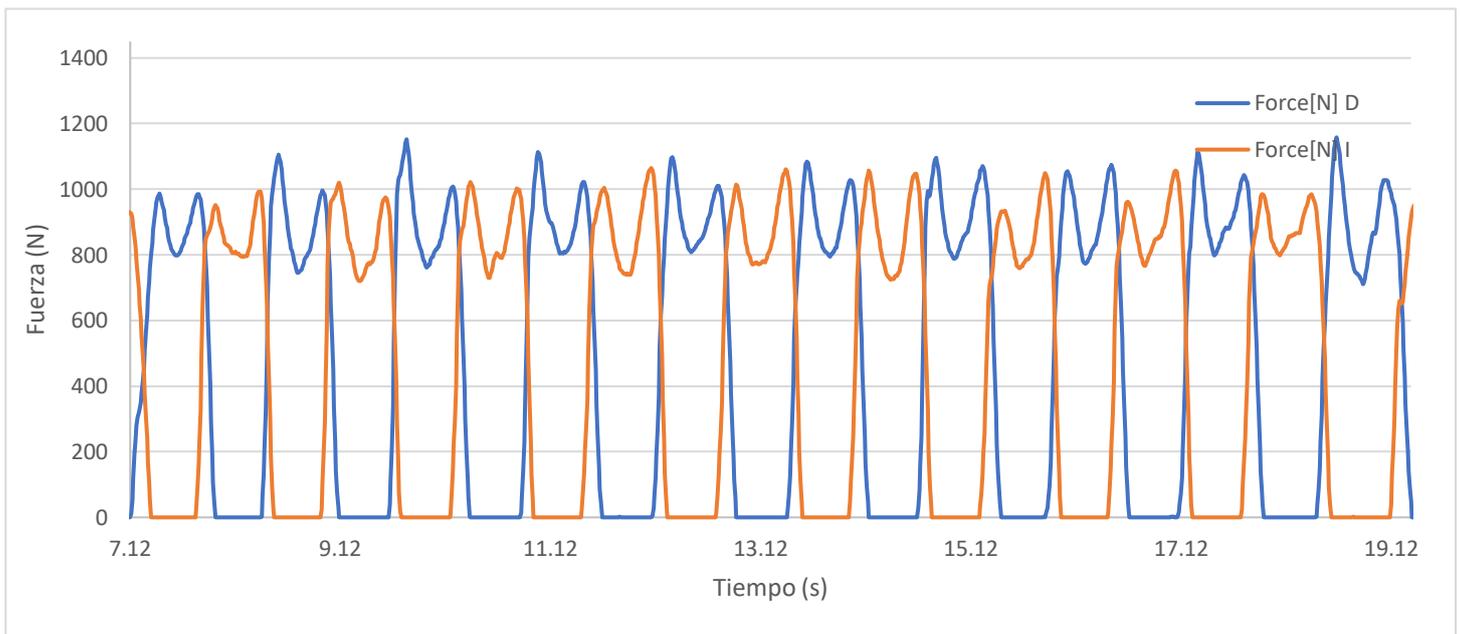


Ilustración 71. Fuerza Pisadas experimentales M 90 ppm T1 referenciada a la ida

Es decir, el tránsito real comienza en 7.12 s (valor de referencia del “arrival time”) y termina después de 18 pasos, en el segundo 19,32, es decir, el tránsito dura 12.20 s.

Para el cálculo de los valores de los “arrival time” de cada pisada, se aplica el mismo procedimiento que antes, los valores se muestran en la tabla 3, teniendo en cuenta que el primer paso (D1) empieza en 7.12 s, y es por tanto la referencia:

Pasos	Tiempo inicio pisada (s)	Arrival time (s)
D1	7.12	0
D2	8.36	1.24
D3	9.58	2.46
D4	10.83	3.71
D5	12.08	4.96
D6	13.37	6.25
D7	14.61	7.49
D8	15.83	8.71
D9	17.08	9.96
I1	7.74	0.62

12	8.93	1.81
13	10.16	3.04
14	11.41	4.29
15	12.69	5.57
16	13.96	6.84
17	15.20	8.08
18	16.45	9.33
19	17.69	10.57

Tabla 3. Cálculo "arrival time" pisadas M 90 ppm

Una vez hecho esto, se debe aislar cada pisada en un fichero Excel distinto y convertirlo a un fichero ".txt" que puede leer SAP2000 como se ha comentado anteriormente.

Para conocer los valores de cada "arrival time" de cada paso, se debe previamente entender que este valor coincide con el tiempo que pasa desde la referencia hasta que la función de fuerza de este paso deja de ser nula, es decir, se inicia el paso.

En definitiva, en qué momento comienza cada paso respecto de la referencia. En este caso la referencia está en 7,12 s como se ha comentado anteriormente, que es cuando comienza el tránsito a través de la plataforma en el ensayo experimental.

Una vez hecho todo esto, el procedimiento es igual que para los casos anteriores, es decir, se deben crear los patrones de carga, importar las funciones, seleccionar los puntos donde se aplica cada paso y crear el caso de carga como el de la ilustración 72:

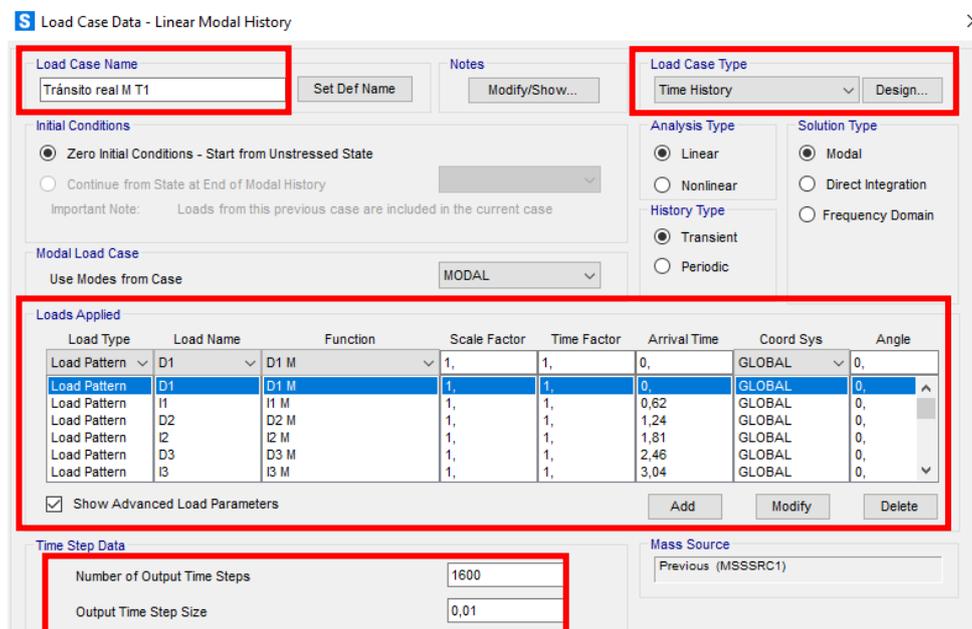
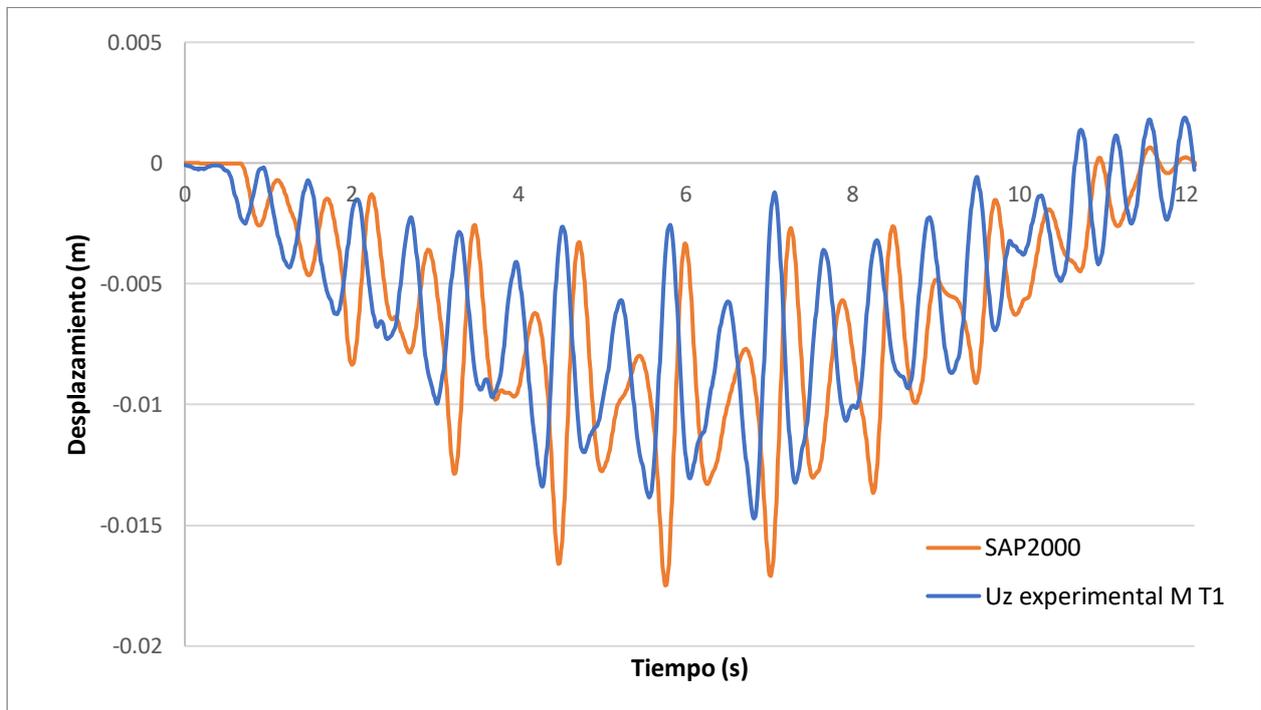
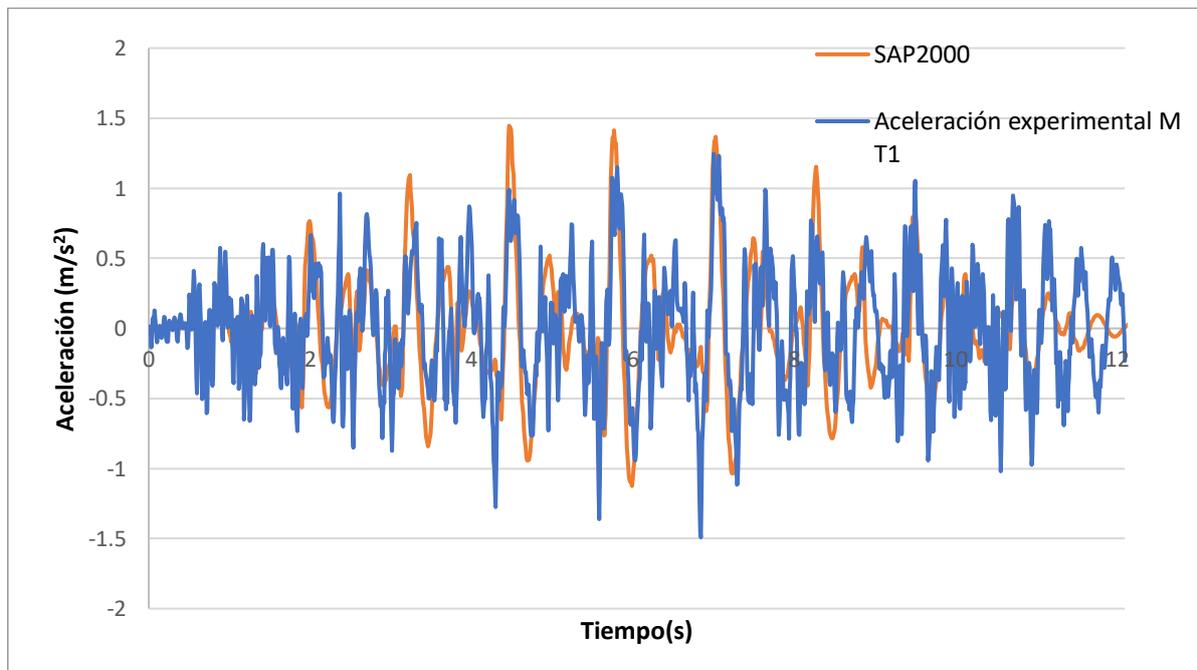


Ilustración 72. "Load case" del tránsito peatonal real M 90 ppm

Se ejecuta el modelo y se representan los valores del desplazamiento y la aceleración del punto central exportando los valores a Excel, se comparan con los obtenidos del tránsito peatonal real T1 y se grafican en las ilustraciones 73 y 74:



Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0,01749 m = 17,49 mm



Valor máximo aceleración SAP2000 = 1,44657 m/s²

Para estudiar y poder observar la influencia de cada pisada en el valor real del desplazamiento se deben “casar” en el tiempo los valores obtenidos experimentalmente por un lado de la tarjeta de adquisición de datos que proporciona el valor del desplazamiento y la aceleración del punto central, con los valores de las plantillas bluetooth que registran la fuerza de cada paso, todo ello representado en la ilustración 75:

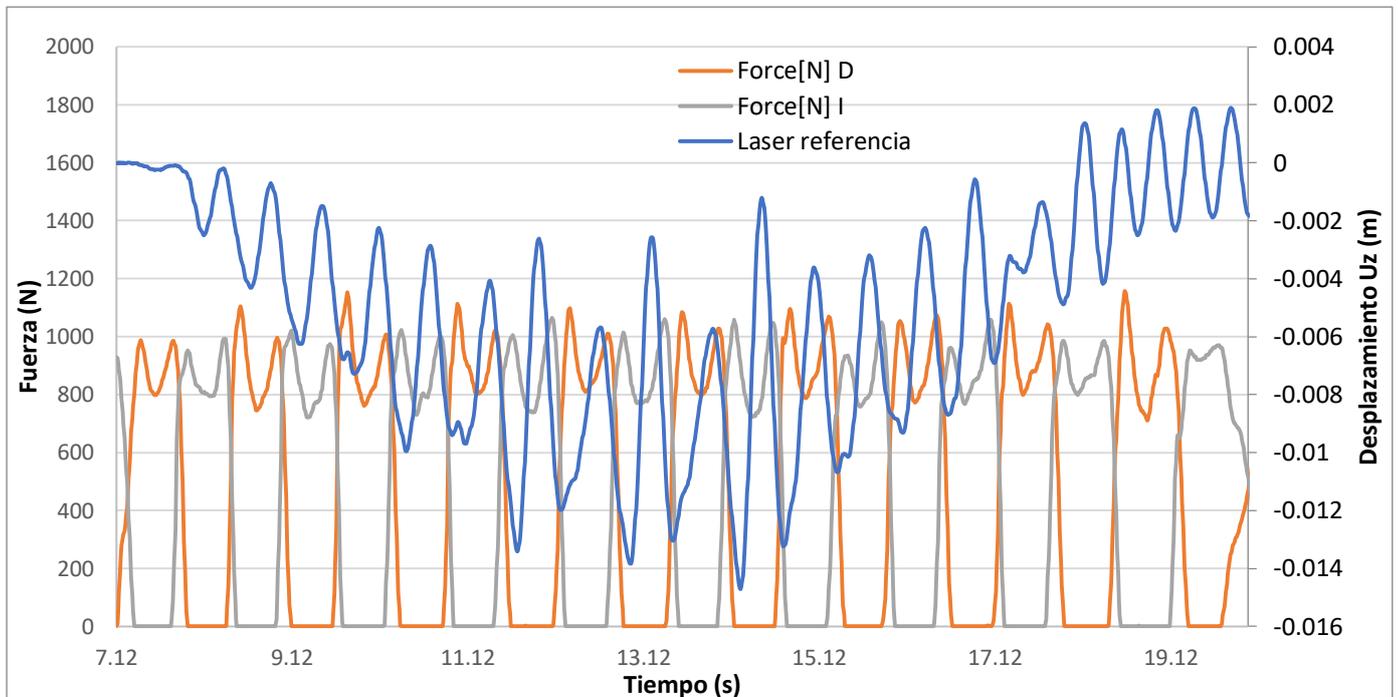


Ilustración 75. Fuerza de las pisadas casadas con desplazamiento experimental tránsito M 90 T1

Se puede observar que al iniciarse el tránsito comienza a desplazarse verticalmente el punto central, haciéndose máximo cuando actúan los pasos centrales, comienza en 7,12 s y termina la ida en el segundo 19,32, el tránsito dura 12,20 s después de 18 pasos.

Cuando el peatón abandona la plataforma, esta se queda vibrando como se puede observar en la gráfica de la ilustración 75 en el segundo 12,20.

Conclusiones:

Una vez realizadas todas las simulaciones anteriores cabe destacar:

Aunque se han ajustado y ponderado con los factores de escala (relación entre desplazamientos máximos) los valores del desplazamiento del punto central de la plataforma, los valores de la aceleración máximos no coinciden. A pesar de esto, se encuentran dentro de un margen de valores aceptables.

Para los desplazamientos:

- Caso “shaker”: se ha ponderado por la fórmula de SETRA con el factor de escala: 14,71/16
- Caso deslizante: la fuerza que ajusta el valor del desplazamiento es 1000 N multiplicado por el factor de escala: 14,71/20,26
- Caso pulsante: se solapan 0,15 s y el factor de escala es de: 14,71/15,42
- Caso robot: el factor de escala para el caso 1 paso D6 es de 14,71/11,55 y para el caso 2 pasos D6 I6 es de 14,71/12,91.
- Caso tránsito real: en este caso no tiene sentido ponderarlo por su factor de escala, para ajustar el valor del desplazamiento al experimental, se debe modificar el valor del amortiguamiento del conjunto plataforma peatón seleccionado.

Se procede a seleccionar un valor para el amortiguamiento para el conjunto plataforma peatón de 0,56, mediante un proceso iterativo de ensayo y error, en vez de 0,15 como se había seleccionado anteriormente.

Al cambiar este valor también cambiarían los resultados obtenidos en las anteriores simulaciones que simplifican el tránsito peatonal.

Se obtienen los siguientes resultados y se grafican en las ilustraciones 76 y 77:

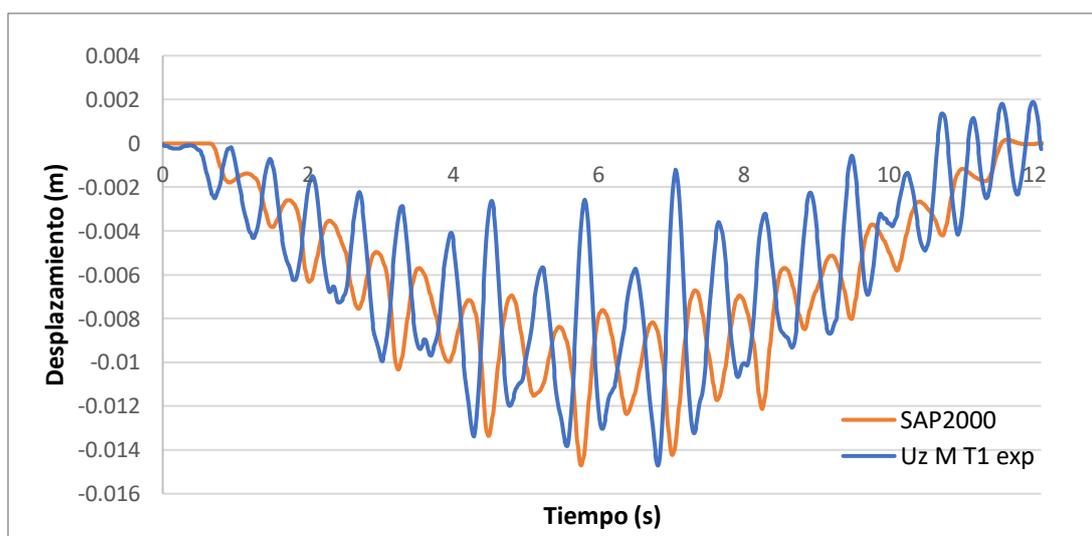


Ilustración 76. Comparativa desplazamiento punto central caso Tránsito peatonal real M vs T1 M ponderado

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0,0147 m =14,7 mm

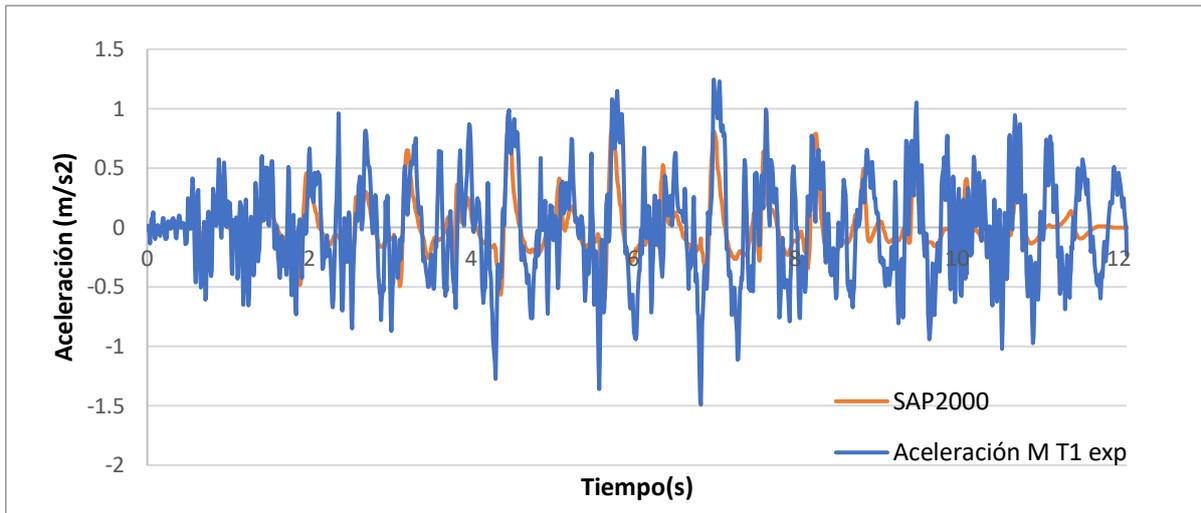


Ilustración 77. Comparativa aceleración punto central caso Tránsito peatonal real M vs T1 M ponderado

Valor máximo aceleración SAP2000 = 0,85424 m/s²

Como se puede observar el valor del desplazamiento es mucho más similar a la realidad y el valor de la aceleración sigue dentro de un rango de valores aceptables.

La envolvente de mínimos del desplazamiento proporcionado por SAP2000 es más baja que la real, esto es a causa de seleccionar un amortiguamiento para el conjunto plataforma peatón demasiado grande para casar el valor del desplazamiento máximo del punto central de la plataforma.

Se puede concluir que el calibrado del modelo para el caso de pisadas medianas a 90 ppm es correcto.

Para el desarrollo del siguiente epígrafe “7. Simulaciones de aplicación posteriores al calibrado del modelo digital de la plataforma” se deja el valor de amortiguamiento del conjunto plataforma peatón de 0,15, debido a que a pesar de que el valor de 0,56 ajusta el valor del máximo desplazamiento del punto central de la plataforma, la forma de la envolvente de este, se ajusta mejor con el valor de 0,15.

7. SIMULACIONES DE APLICACIÓN POSTERIORES AL CALIBRADO DEL MODELO DIGITAL DE LA PLATAFORMA:

Como se ha comentado anteriormente, el objetivo principal del presente TFM se trata de poder obtener un “gemelo digital” de la plataforma del laboratorio.

Para conseguir esto, se han desarrollado todas las anteriores simulaciones, que, gracias a poder realizar comparativas de los resultados obtenidos con los registrados en las experimentaciones reales, se ha podido determinar que el modelo responde como lo hace la estructura real. Es decir, se han podido ajustar los modelos de carga simplificados.

Por lo tanto, la respuesta que proporciona el modelo se asemeja con la respuesta real, se puede concluir que el modelo digital es una representación de la estructura real.

Se pueden realizar diferentes simulaciones digitales, y las respuestas obtenidas, se aproximarán a las que se registrarían en ensayos reales con las mismas situaciones de carga.

Además de poder realizar simulaciones reales también se pueden realizar simulaciones técnicamente imposibles de manera experimental, que si se llevaran a cabo destruirían la estructura o comprometerían su utilidad, tales como fenómenos naturales, acciones vandálicas, etc.

En definitiva, el poder definir modelos digitales de cualquier estructura es algo imprescindible, pero, además, si se pueden validar mediante registros de ensayos experimentales, permite verificar los resultados obtenidos. En este epígrafe se llevarán a cabo un conjunto de simulaciones, que permiten entender y estudiar la respuesta de la estructura ante diferentes situaciones de carga, no experimentadas. Pero sin la necesidad de realizar dichos ensayos de manera experimental debido a lo comentado anteriormente. [14]

Las simulaciones que se han realizado en el modelo digital anteriormente calibrado son las siguientes:

- Tránsito real M pero con el peatón con el doble de peso.
- Tránsito real M pero con el peatón con la mitad de peso.
- Tránsito real M pero el peatón caminado justo sobre el extremo lateral de la plataforma.
- Tránsitos simplificados laterales (pisadas medianas).
- Tránsito peatonal de dos peatones.
- Flujos peatonales.

Adicionalmente en el Anexo “2. Simulaciones de aplicación posteriores al calibrado del modelo digital de la plataforma. Caso pisadas cortas.” se incluyen las siguientes simulaciones:

- Tránsito real C pero con el peatón con el doble de peso.
- Tránsito real C pero con el peatón con la mitad de peso.
- Tránsito real C pero el peatón caminado justo sobre el extremo lateral de la plataforma.
- Tránsitos simplificados laterales (pisadas cortas).

A continuación, se detallará cómo se ha realizado cada simulación, las hipótesis de partida y los resultados que se han obtenido. Las características del modelo empleado son las mismas que para las simulaciones anteriores, pero se modificará lo que corresponde en cada caso de carga. El tránsito de referencia siempre es el T1 para pisadas medianas y el T4 para cortas.

7.1. Tránsito real M pero con el peatón con el doble de peso:

En este caso lo que varía es la amplitud de la función de fuerza de las pisadas del peatón. Al duplicar su peso, se deben duplicar los valores de la función de fuerzas de las pisadas, debido a que actúa el doble de masa, es decir, un supuesto peatón de 180 kg (el peatón de los registros experimentales tiene una masa de 90 kg).

Para ello, solo se debe modificar de la simulación el valor del “scale factor” en el “load case”, en este caso el valor es de 2.

Se representan los valores del desplazamiento y la aceleración del punto central y se grafican en las ilustraciones 78 y 79:

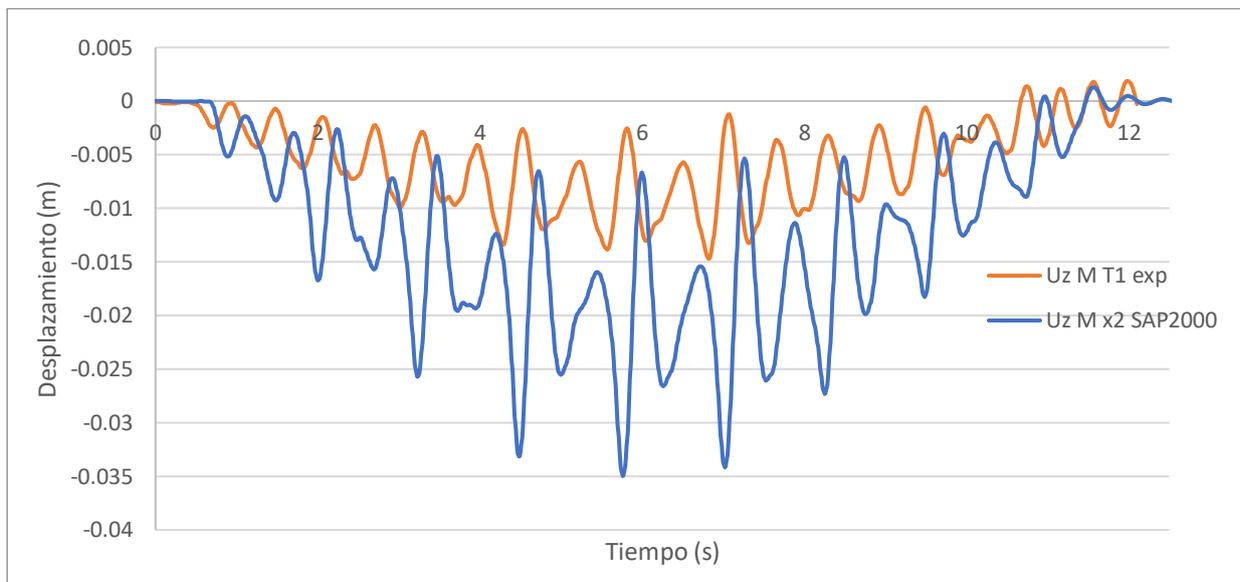


Ilustración 78. Desplazamiento punto central caso Tránsito real peatonal M T1 x 2 vs T1 M

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.03497 m = 34.97 mm → es el doble de valor, es decir, es lineal.

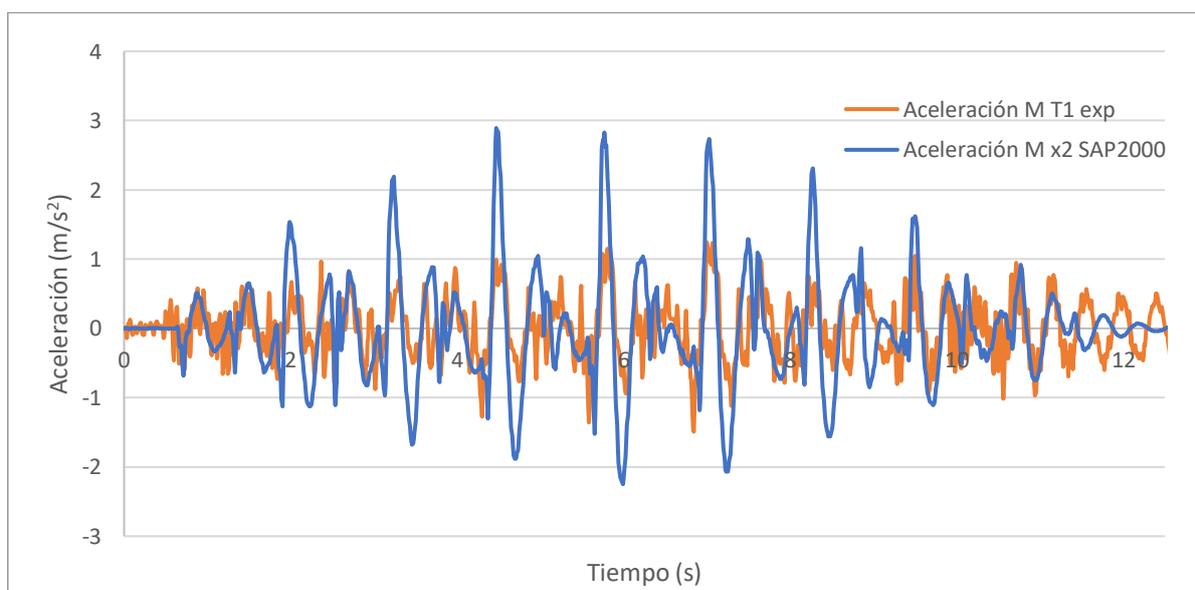


Ilustración 79. Aceleración punto central caso Tránsito real peatonal M T1 x 2 vs T1 M

Valor máximo aceleración SAP2000 = 2.89315 m/s²

7.2. Tránsito real M pero con el peatón con la mitad de peso:

De nuevo, en este caso lo que varía es la fuerza de las pisadas del peatón. Al dividir su peso a la mitad, se deben dividir a la mitad también los valores de la función de las fuerzas de las pisadas, al actuar la mitad de masa, es decir, un supuesto peatón de 45 kg.

Para ello, solo se debe modificar de la simulación el valor del “scale factor” en el “load case”, en este caso de valor 0,5, debido a que las funciones de las pisadas registradas son de un peatón de 90 kg.

Se representan los valores del desplazamiento y la aceleración del punto central y se grafican en las ilustraciones 80 y 81:

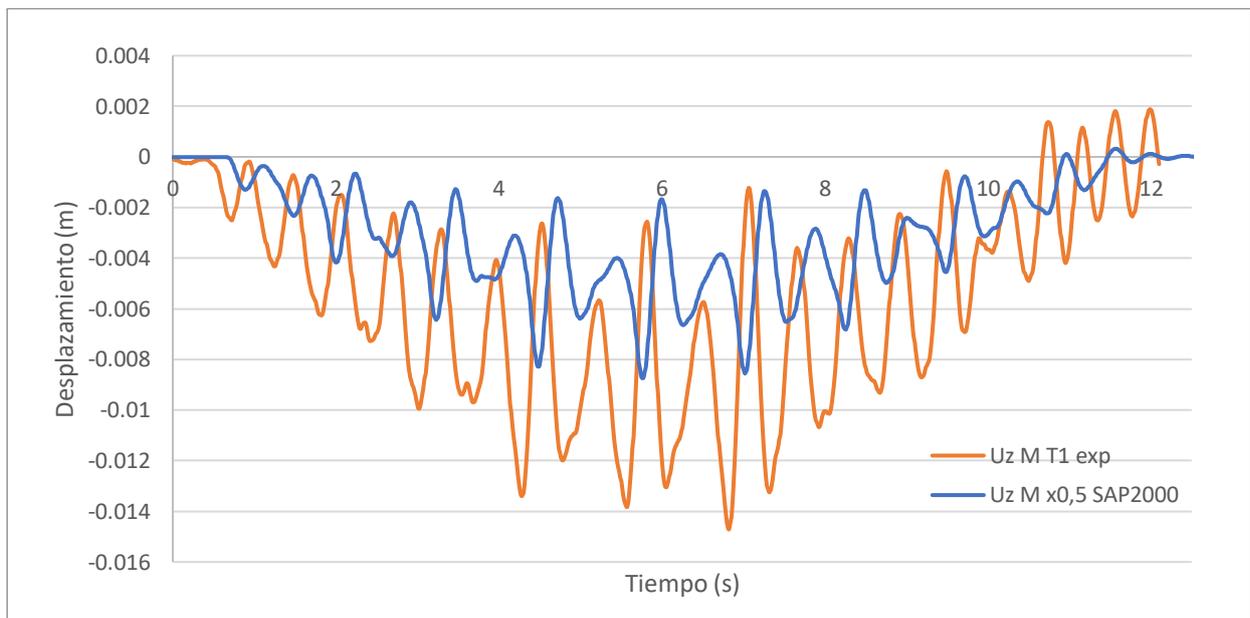


Ilustración 80. Desplazamiento punto central caso Tránsito real peatonal M T1 x 0,5 vs T1 M

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.00874 m = 8.74 mm → es la mitad de valor, es decir, es lineal.

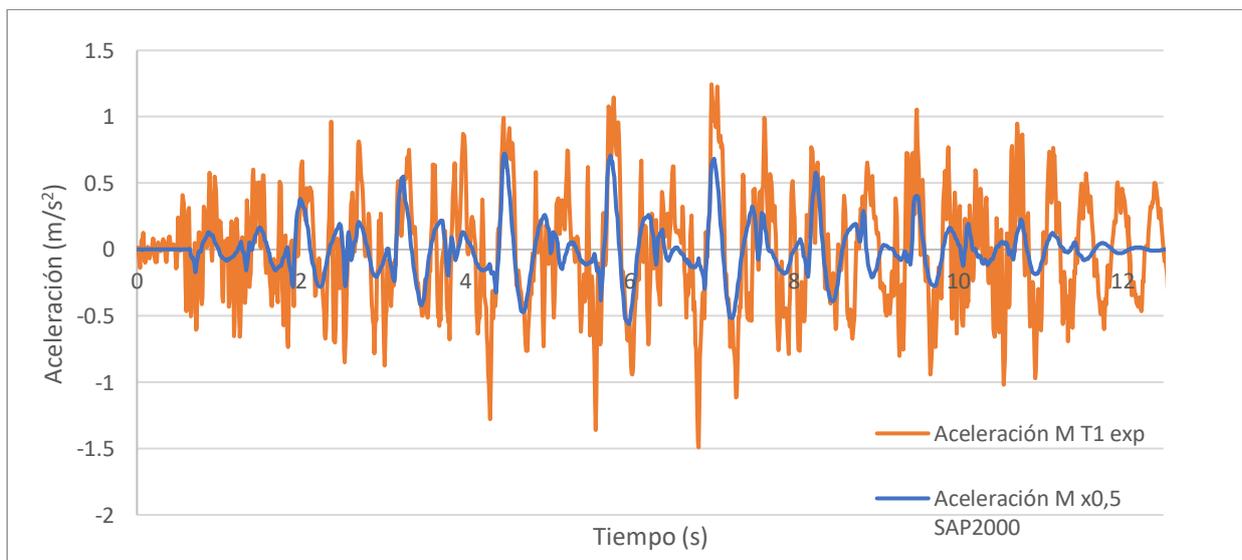


Ilustración 81. Aceleración punto central caso Tránsito real peatonal M T1 x 0,5 vs T1 M

Valor máximo aceleración SAP2000 = 0.72329 m/s²

7.3. Tránsito real M pero el peatón caminado justo sobre el extremo lateral de la plataforma:

Para realizar esta simulación, es necesario cambiar los puntos donde se aplican las pisadas sobre la plataforma. Para ello, se debe modificar la posición de las cargas unidad que se aplican sobre la plataforma, que están asociadas a los “load patterns” asociados a su vez a las funciones de fuerza de las pisadas.

Es decir, en vez de aplicar estas cargas asociadas a los “load patterns” de cada paso sobre los puntos centrales de la plataforma, se deben aplicar en los extremos del lateral, aprovechando la anterior discretización del área de la plataforma para hacerla coincidir con la longitud de cada paso.

Se representan los valores del desplazamiento y la aceleración del punto central y se grafican en las ilustraciones 82 y 83:

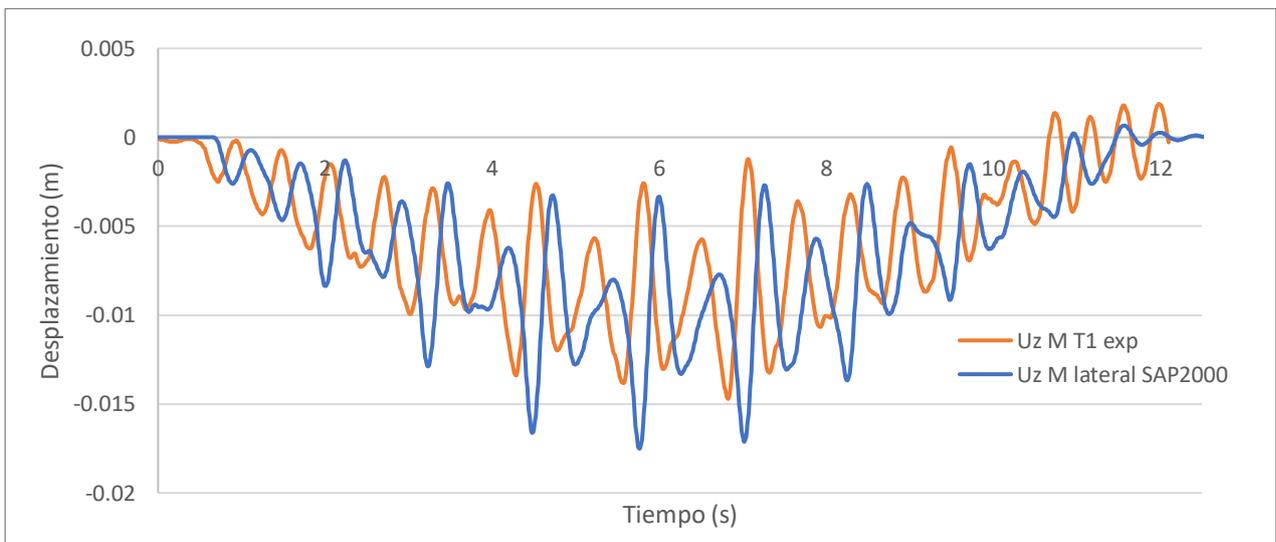


Ilustración 82. Desplazamiento punto central caso Tránsito real peatonal M T1 lado derecho vs T1 M

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.01752 m = 17.52 mm → prácticamente es el mismo valor, es decir, a 90 ppm no se excita la torsión.

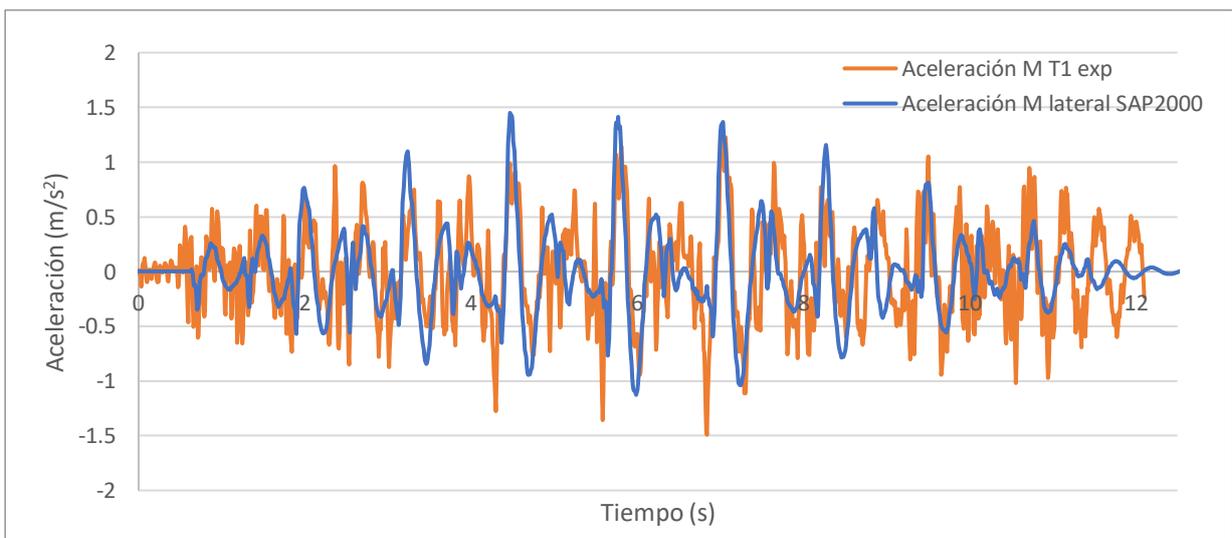


Ilustración 83. Aceleración punto central caso Tránsito real peatonal M T1 lado derecho vs T1 M

Valor máximo aceleración SAP2000 = 1.44994 m/s²

7.4. Tránsitos simplificados laterales:

Se procede de la misma forma que en los casos de tránsitos laterales anteriores, es decir, se deben cambiar los puntos donde se aplican las cargas unidad asociadas a los “load patterns” del “load case” que simula el tránsito.

En este epígrafe se desarrollan todos los casos anteriores que simplificaban el tránsito peatonal. Es decir, el caso “Shaker”, deslizante, pulsante y robot con 1 y 2 pasos.

Pero haciendo que el tránsito se aplique justo en el lateral de la plataforma. Tanto para el caso de pisadas medianas, como para el de pisadas cortas, este último desarrollado en el Anexo “2.4 Tránsitos simplificados laterales”.

7.4.1. Caso “Shaker” lateral:

Se debe aplicar la carga unitaria en el centro de la plataforma, pero en el extremo del lateral. Se procede a representar los valores del desplazamiento y la aceleración del punto central y se grafican en las ilustraciones 84 y 85:

Pisadas medianas:

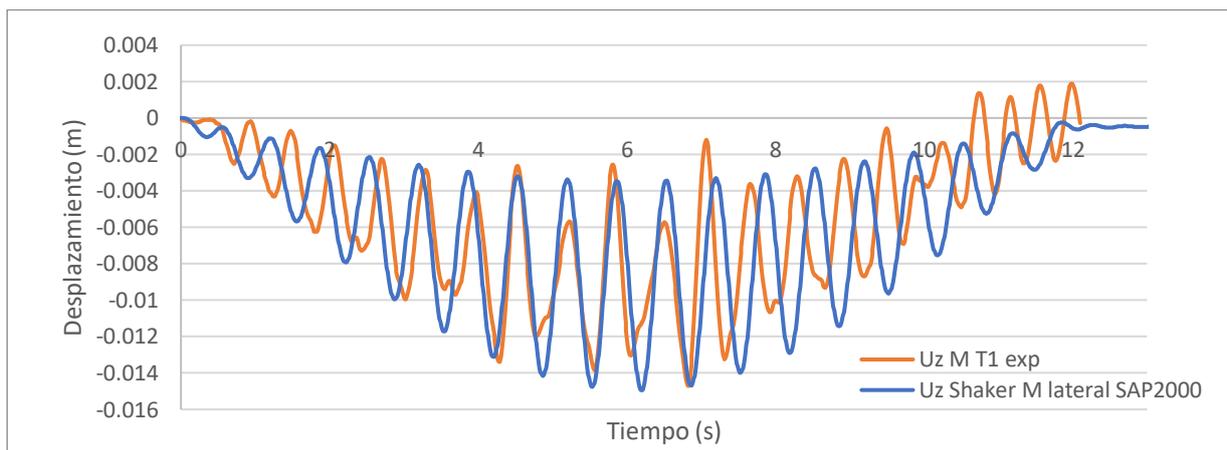


Ilustración 84. Desplazamiento punto central caso Shaker M lateral vs T1 M

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.01495 m = 14.95 mm

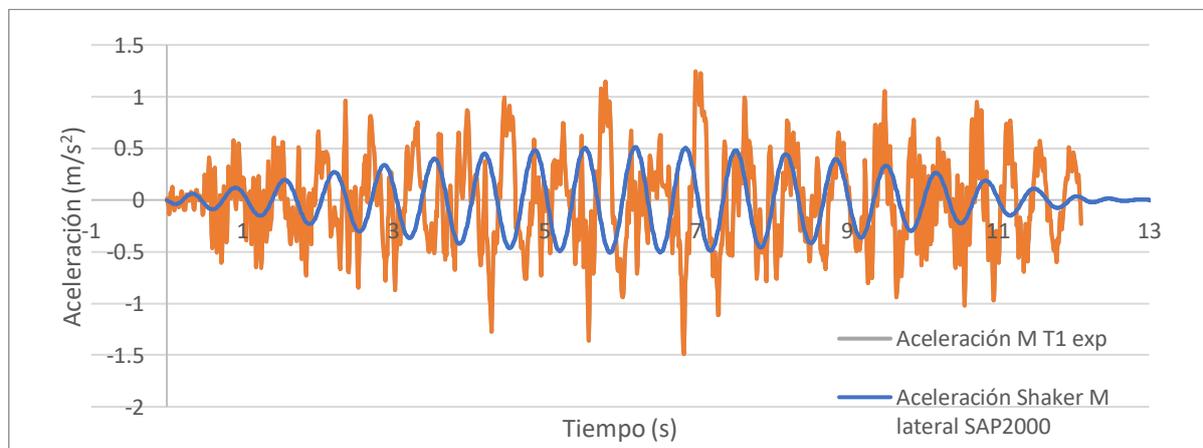


Ilustración 85. Aceleración punto central caso Shaker M lateral vs T1 M

Valor máximo aceleración SAP2000 = 0.51072 m/s²

7.4.2. Caso deslizante lateral:

Se representan los valores del desplazamiento y la aceleración del punto central y se grafican en las ilustraciones 86 y 87:

Pisadas medianas:

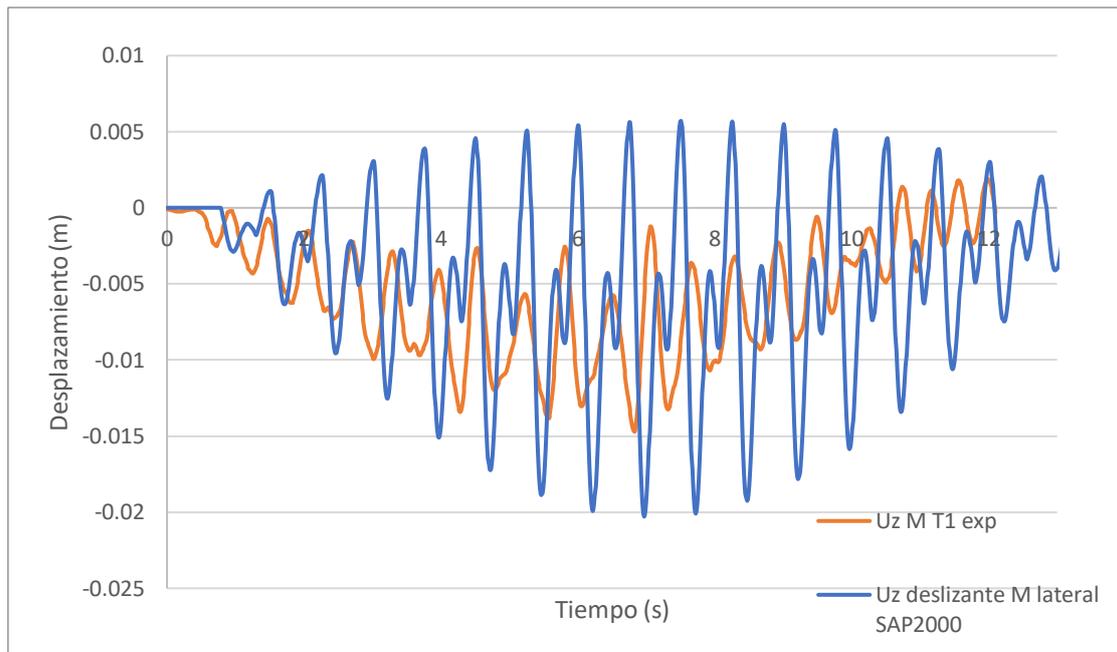


Ilustración 86. Desplazamiento punto central caso Deslizante M lateral vs T1 M

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.02029 m = 20.29 mm

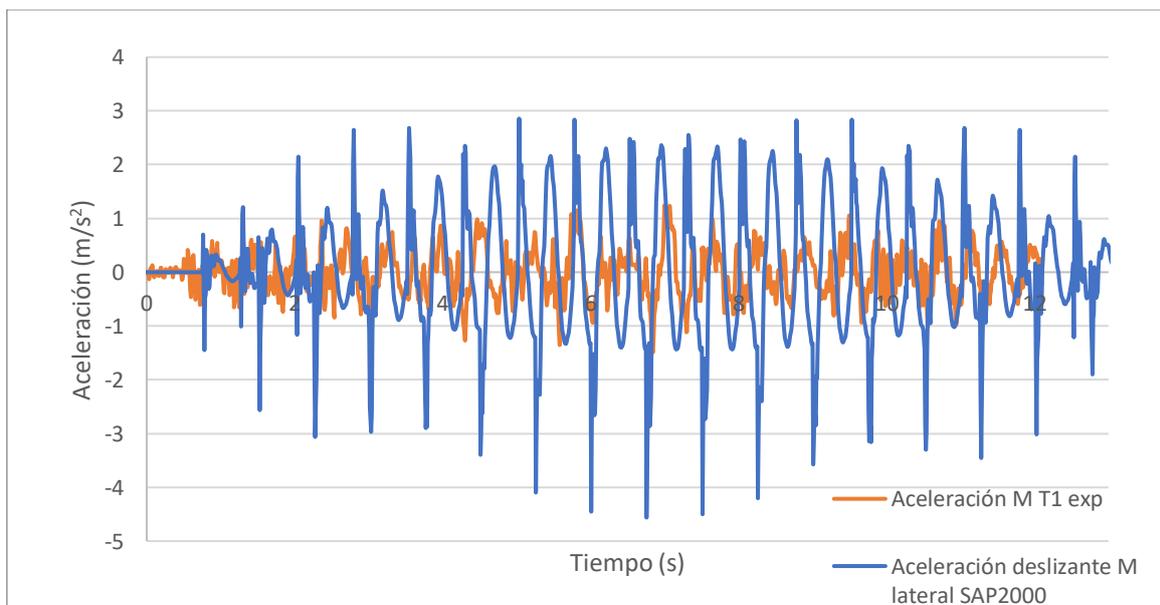


Ilustración 87. Aceleración punto central caso Deslizante M lateral vs T1 M

Valor máximo aceleración SAP2000 = 4.56476 m/s²

7.4.3. Caso pulsante lateral

Se representan los valores del desplazamiento y la aceleración del punto central y se grafican en las ilustraciones 88 y 89:

Pisadas medianas:

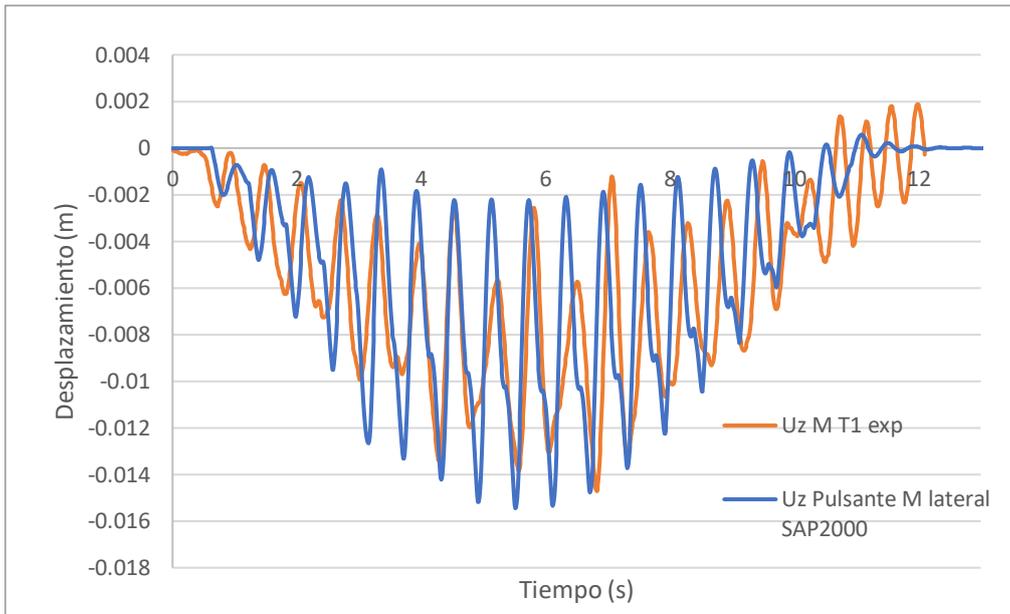


Ilustración 88. Desplazamiento punto central caso Pulsante M lateral vs T1 M

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.01545 m = 15.45 mm

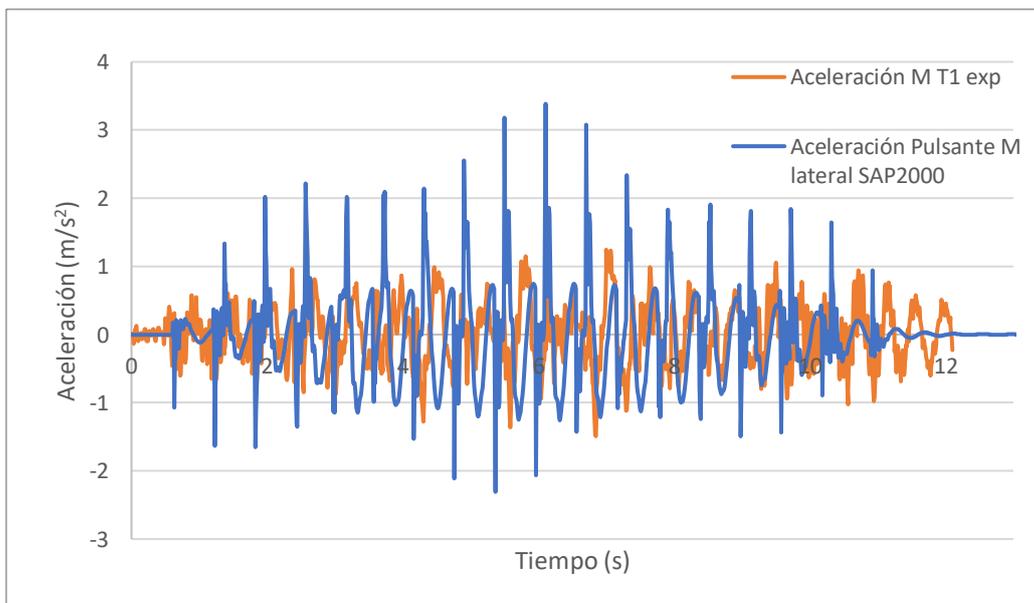


Ilustración 89. Aceleración punto central caso Pulsante M lateral vs T1 M

Valor máximo aceleración SAP2000 = 3.38491 m/s²

7.4.4. Caso robot lateral:

Se representan los valores del desplazamiento y la aceleración del punto central y se grafican en las ilustraciones 90 y 91:

7.4.4.1. Robot 1 paso D6:

Pisadas medianas:

Se grafican los resultados en las ilustraciones 90 y 91:

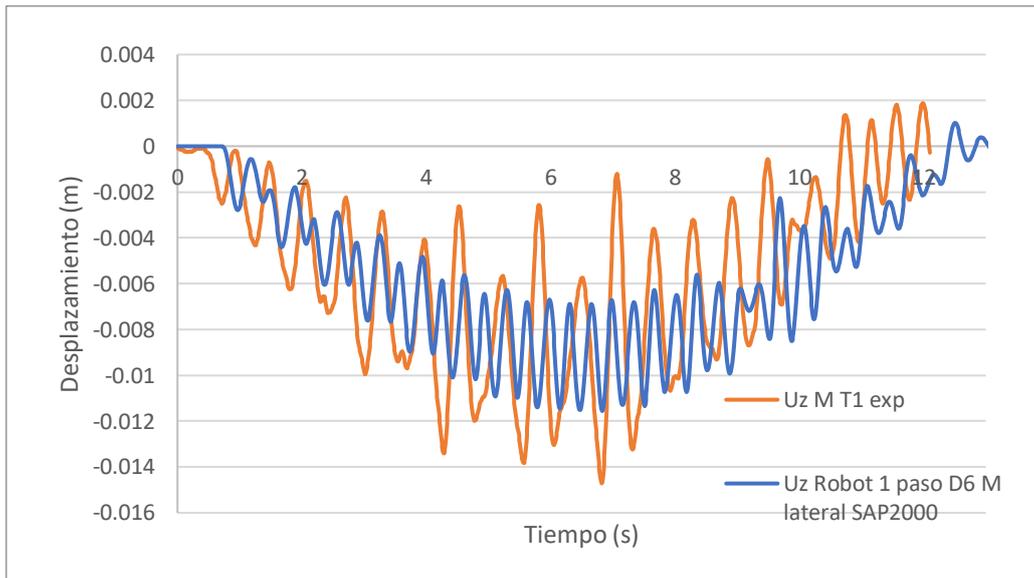


Ilustración 90. Desplazamiento punto central caso Robot 1 paso D6 M lateral vs T1 M

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.01156 m = 11.56 mm

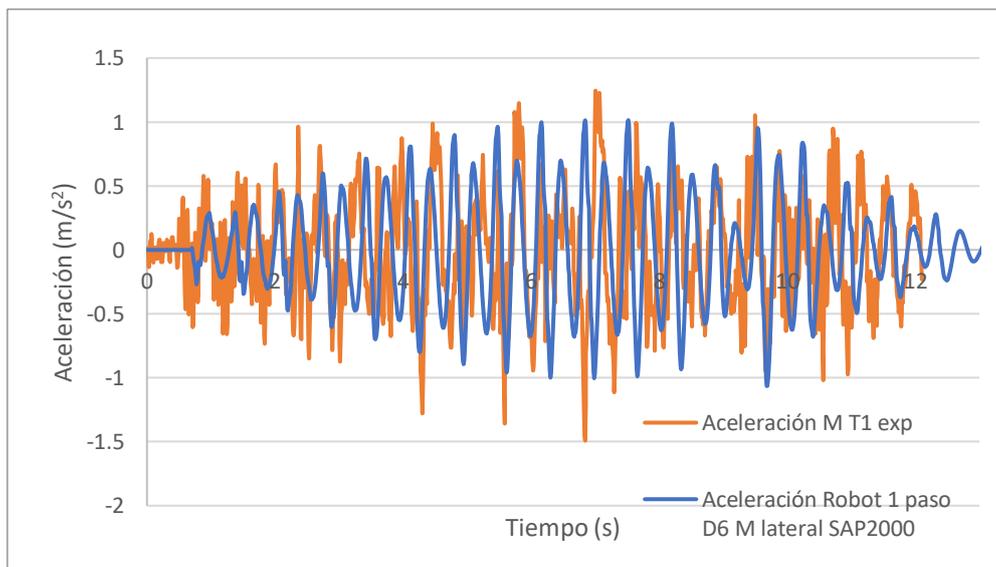


Ilustración 91. Aceleración punto central caso Robot 1 paso D6 M lateral vs T1 M

Valor máximo aceleración SAP2000 = 1.06453 m/s²

7.4.4.2. Robot 2 pasos D6 I6:

Pisadas medianas:

Se grafican los resultados en las ilustraciones 92 y 93:

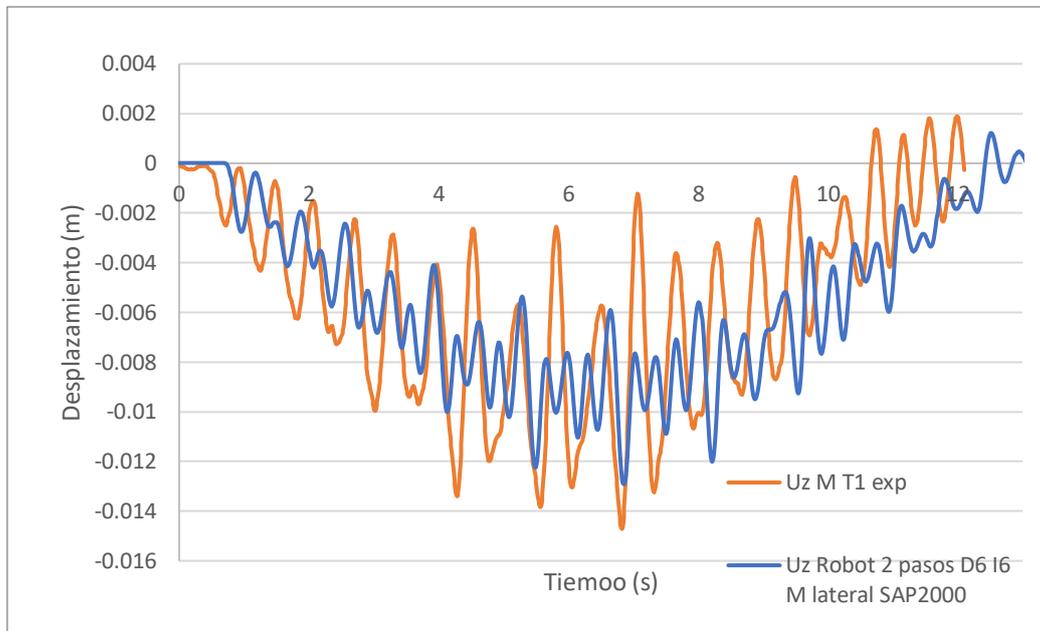


Ilustración 92. Desplazamiento punto central caso Robot 2 pasos D6 I6 M lateral vs T1 M

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.01292 m = 12.92 mm

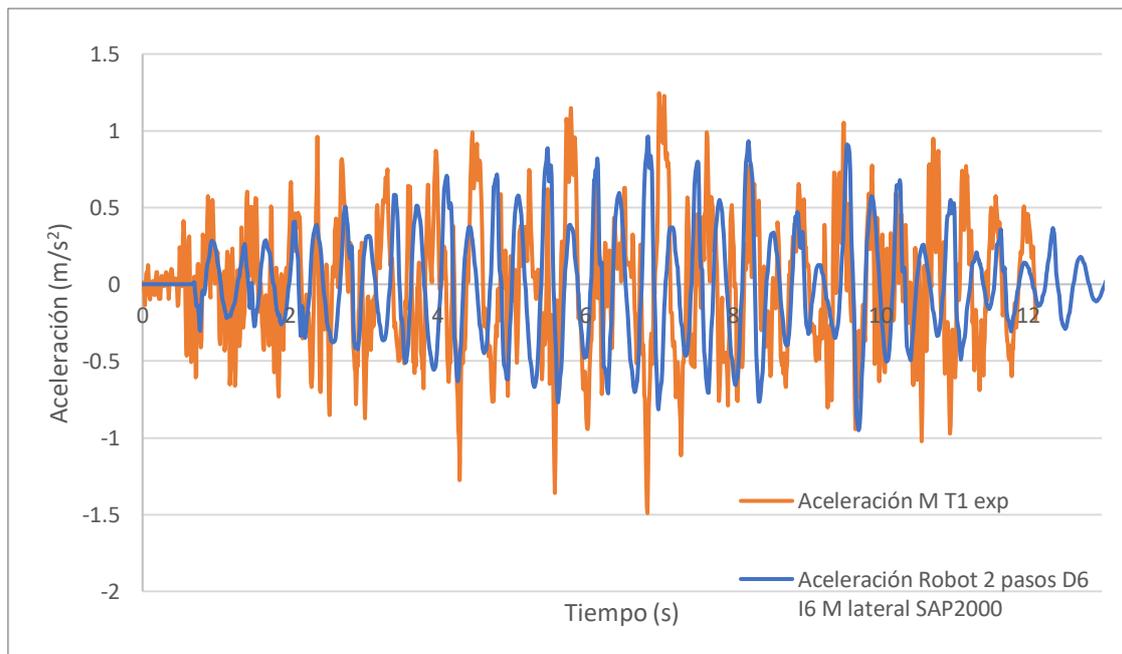


Ilustración 93. Aceleración punto central caso Robot 2 pasos D6 I6 M lateral vs T1 M

Valor máximo aceleración SAP2000 = 0.96313 m/s²

7.5. Tránsito peatonal de dos peatones:

Además de modificar tanto las fuerzas de las pisadas, es decir, el peso del peatón, y la zona por la que camina este sobre la plataforma, el modelo computacional permite introducir más de un peatón.

Se van a realizar dos tipos de simulaciones:

- Dos peatones andando a la vez, con el mismo tamaño de pisada y misma frecuencia de paso.
- Dos peatones andando a la vez con el mismo tamaño de pisada, pero diferente frecuencia de paso.

En el primer caso, ambos peatones parten del mismo punto y terminan de recorrer la plataforma a la vez. Además, los puntos donde estos aplican las funciones de fuerza de las pisadas coinciden en cuanto a distancia longitudinal respecto del extremo de la plataforma.

En la ilustración 94 se detalla el tránsito del primer peatón con una flecha azul y el tránsito del segundo peatón con una flecha verde, para el caso de opuesta dirección.

Sin embargo, en el segundo caso, a pesar de aplicar las pisadas en los mismos puntos y salir a la vez del mismo punto, al variar la velocidad de las pisadas, uno de ellos llega antes al final de la plataforma.

Se sigue el mismo procedimiento, es decir, hay que importar los archivos de las funciones temporales de las fuerzas de las pisadas reales del tránsito seleccionado, y crear los “load patterns” y el “load case” que represente el tránsito peatonal, con las siguientes diferencias:

- Para ambos casos, al haber dos peatones, se debe discretizar el modelo de la plataforma, para intentar que haya puntos donde poder aplicar las funciones de fuerzas de las pisadas de los peatones.

Es decir, el peatón durante los ensayos experimentales caminaba por el centro, ahora al haber dos, lo lógico es que, si caminan a la vez, no se superpongan entre sí. Nuevamente, se toma como punto de estudio, el punto central de la plataforma.

Por lo tanto, se divide cada mitad de la plataforma a su vez en dos mitades longitudinales como se muestra en la ilustración 94, para poder aplicar ambos tránsitos peatonales:

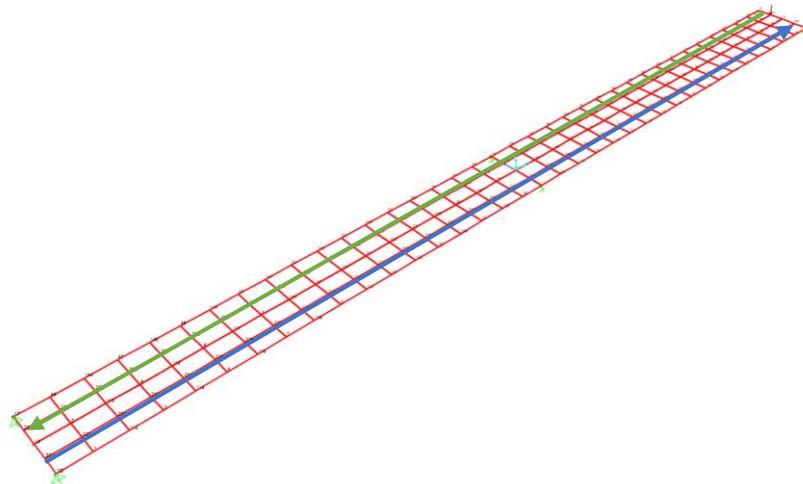


Ilustración 94. Discretización plataforma para 2 peatones a la vez

- Caso dos peatones andando a la vez, con tamaño de pisada igual y misma frecuencia de paso:

Se selecciona como tamaño la pisada mediana “M” y a 90 ppm, se importan las mismas funciones de fuerza de las pisadas que en casos anteriores, pero se implementan a los dos peatones.

- Caso dos peatones andando a la vez con el mismo tamaño de pisada, pero diferente frecuencia de paso:

Se selecciona como tamaño la pisada mediana “M” pero uno de los peatones es a 90 ppm y otro a 115 ppm. Por lo tanto, se deben importar los ficheros de las pisadas de dicha experimentación, y volver a calcular los valores de los “arrival time” que definen el “load case”.

La forma de implementar cada pisada en el “load case” es igual que si solo hubiera un peatón, pero en vez de realizar la secuencia completa de un peatón, se deben introducir cada “load pattern” que actúa en cada momento.

Es decir, de esta manera el “load case” debe seguir el orden temporal en que se efectúa cada pisada de cada peatón.

Y se deben aplicar nuevamente cargas unidad en cada punto de aplicación de las pisadas de los peatones del mismo modo que antes, pero esta vez, cambian estos puntos al cambiar la discretización de la plataforma.

En la ilustración 95 se detallan donde se deben aplicar estas cargas unidad asociadas a los “load patterns” y a su vez a las funciones de fuerza de las pisadas:

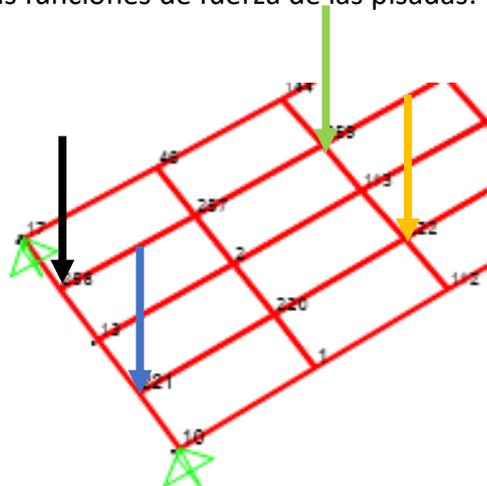


Ilustración 95. Puntos de aplicación cargas unidad con 2 peatones

De esta manera ambos peatones circulan por la plataforma por puntos diferentes de la misma. Esto sería para el caso de que ambos peatones fueran en la misma dirección, posteriormente se detalla la diferencia cuando caminan en opuestas direcciones (uno hacia el otro).

Donde se encuentran las cuatro flechas, son los puntos donde se aplicarían las cargas unidad asociadas a los “load patterns”, en este caso, el D1 (paso derecho 1) del peatón 1 (azul) y el D1 del peatón 2 (negra), el I1 (paso izquierdo 1) del peatón 1 (amarilla) y I1 del peatón 2 (verde), y así sucesivamente.

7.5.1. Caso dos peatones andando a la vez, mismo tamaño de pisada y frecuencia de paso:

En este caso, la secuencia del orden temporal de cada pisada es la siguiente:

- Para “ t_0 ” se aplica D1 peatón 1 y D1 peatón 2, para “ t_1 ” se aplica I1 peatón 1 y I1 peatón 2, para “ t_3 ” se aplica D2 peatón 1 y D2 peatón 2, y así sucesivamente.

Se definen los “load patterns” como en la ilustración 96, con P1= peatón 1, y P2= peatón 2, D=pisada derecha, I=pisada izquierda para los tránsitos peatonales de ambos peatones:

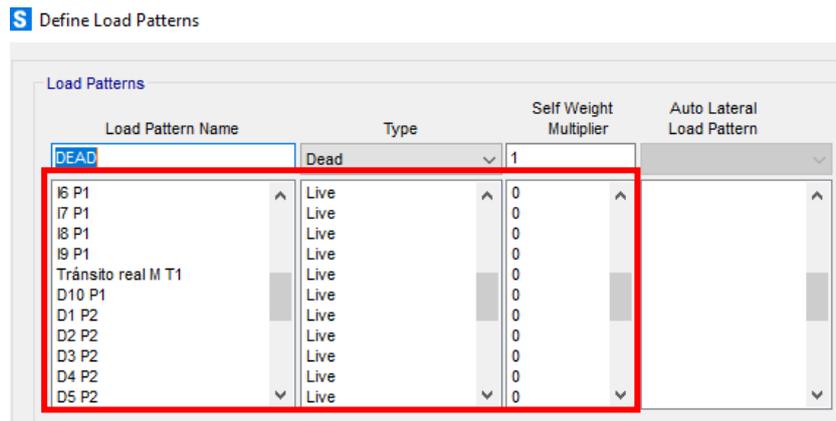


Ilustración 96. "Load patterns" para 2 peatones mismo tamaño de pisada y frecuencia de paso

En la ilustración 97, no se aprecian todos los “load patterns” pero se deben definir los de los 18 pasos de cada peatón al igual que en las simulaciones anteriores. Una vez importados los ficheros de las pisadas medianas a 90 ppm, el “load case” es el siguiente:

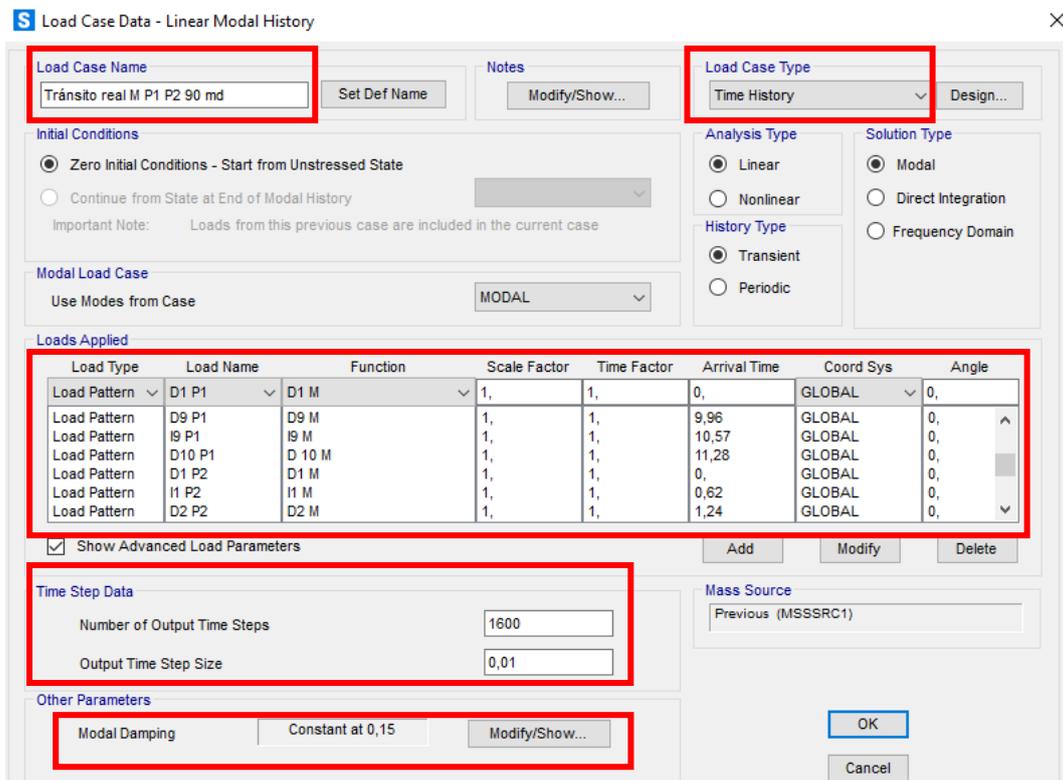


Ilustración 97. "Load case" tránsito peatonal 2 peatones mismo tamaño de pisada y misma frecuencia de paso

Como se ha comentado anteriormente, se debe implementar el tránsito del segundo peatón, que al ser nuevamente T1 M a 90 ppm, los valores de los “arrival time” son iguales, para que ambos peatones anden a la vez y en los mismos puntos de la plataforma al ser el mismo tamaño de la pisada.

Se representan los valores del desplazamiento y la aceleración del punto central, exportando los valores a Excel desde SAP2000 para poder graficarlos. Se comparan con los valores experimentales registrados durante del tránsito peatonal T1 M a 90 ppm con un solo peatón.

Caso ambos peatones caminando en la misma dirección:

Se grafican los resultados en las ilustraciones 98 y 99:

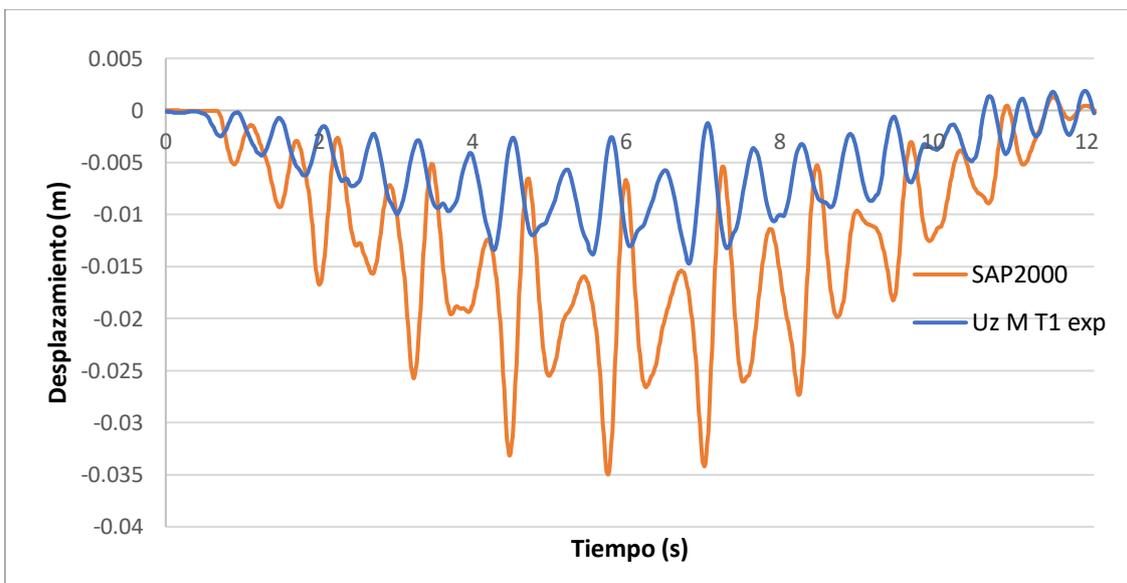


Ilustración 98. Desplazamiento 2 peatones M 90 ppm misma dirección vs T1 M real experimental

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = -0.03499 m = 34.99 mm

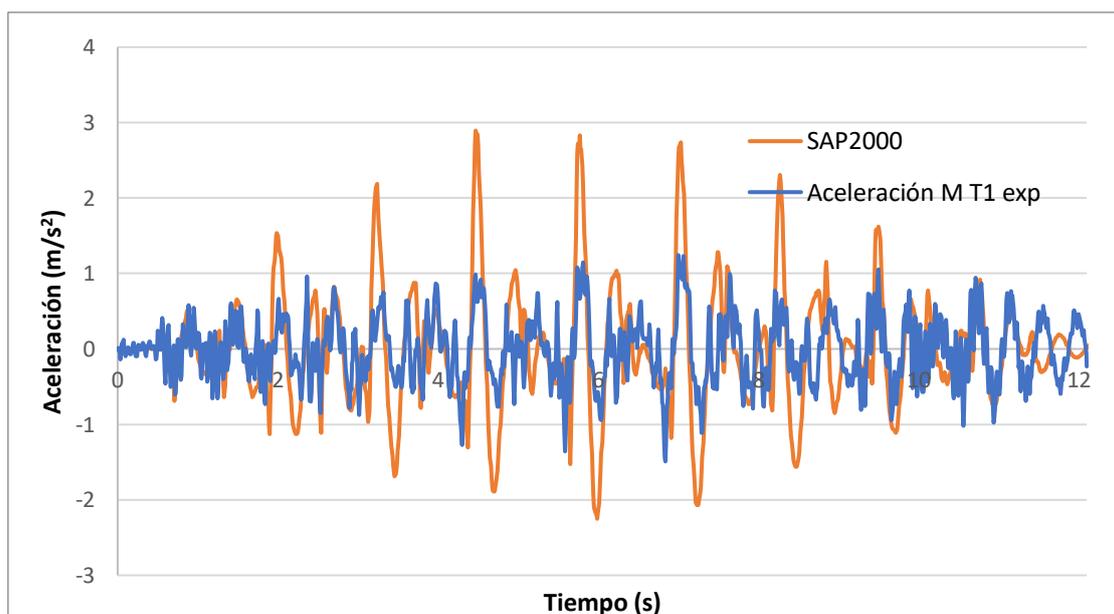


Ilustración 99. Aceleración 2 peatones M 90 ppm misma dirección vs T1 M real experimental

Valor máximo aceleración SAP2000 = 2.89468 m/s²

Caso peatones caminando en opuesta dirección, es decir, uno hacia el otro:

Se grafican los resultados en las ilustraciones 100 y 101:

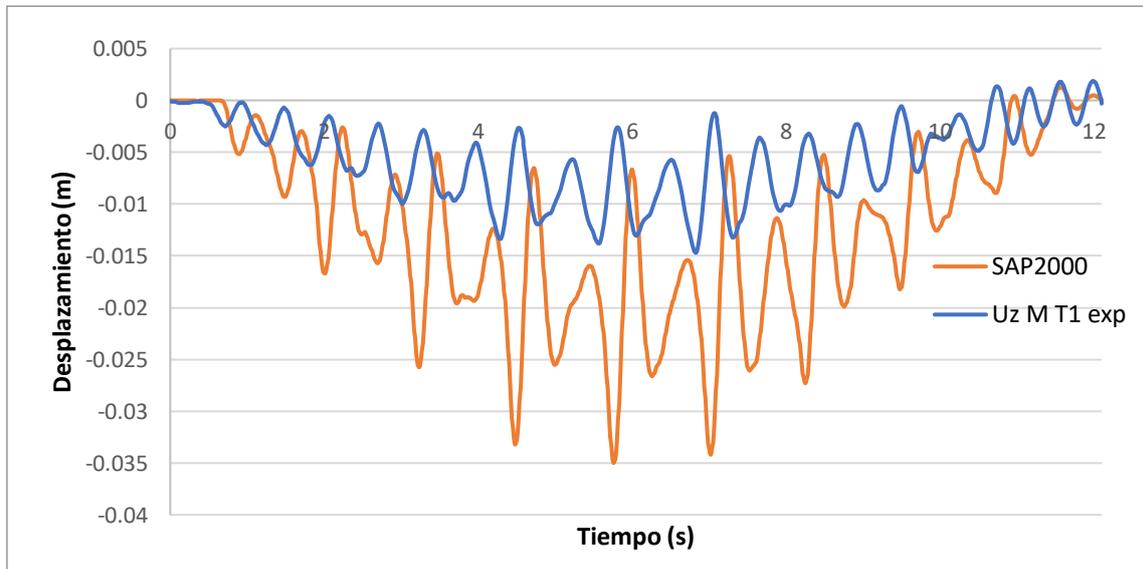


Ilustración 100. Desplazamiento 2 peatones M 90 opuesta dirección vs T1 M real experimental

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.03499 m = 34.99 mm

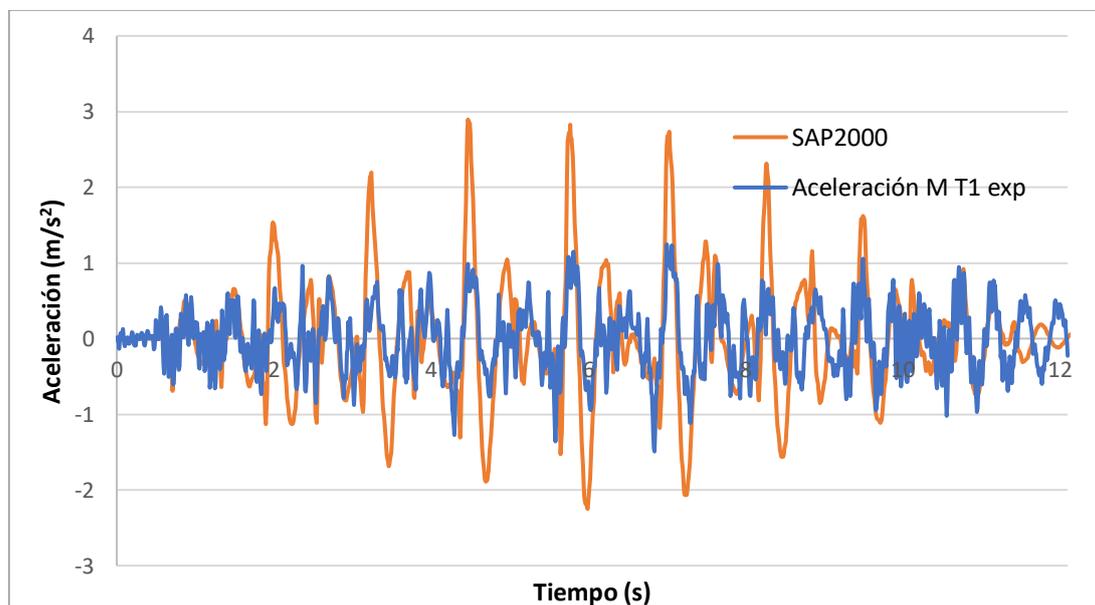


Ilustración 101. Aceleración 2 peatones M 90 ppm opuesta dirección vs T1 M real experimental

Valor máximo aceleración SAP2000 = 2.89468 m/s²

Como se observa, el resultado obtenido es el mismo que para el mismo caso, pero ambos peatones andando en la misma dirección desde el mismo punto.

Por lo tanto, la respuesta del punto central de la plataforma no depende de la dirección de cada peatón, siempre que permanezca constante la función de fuerza de la pisada, su tamaño y la frecuencia de paso entre ambos peatones.

7.5.2. Caso dos peatones a la vez, mismo tamaño de pisada, diferente frecuencia de paso:

Se deben calcular los valores de los “arrival time” para la experimentación de pisadas medianas a 115 ppm, del mismo modo que se realizó para 90 ppm.

Los valores obtenidos de los “arrival time” para las pisadas medianas a 115 ppm se muestran en la tabla 4:

Pasos	Tiempo inicio pisada (s)	Arrival time (s)
D1	11,72	0
D2	12,72	1
D3	13,74	2,02
D4	14,76	3,04
D5	15,79	4,07
D6	16,84	5,12
D7	17,88	6,16
D8	18,94	7,22
D9	19,96	8,24
D10	21,02	9,3
I1	12,24	0,52
I2	13,24	1,52
I3	14,24	2,52
I4	15,27	3,55
I5	16,31	4,59
I6	17,35	5,63
I7	18,4	6,68
I8	19,44	7,72
I9	20,47	8,75
I10	21,52	9,8

Tabla 4. Calculo valores "arrival time" pisadas M a 115 ppm

Teniendo en cuenta que el primer paso (D1 P2) empieza en 11.72 s, y es por tanto la referencia.

El valor de los “arrival time” entre ambos peatones ahora no es el mismo. Por lo que a la hora de implementar cada paso de cada peatón en el “load case” se debe tener en cuenta la secuencia en la que actúan.

Es decir, introducirlos respetando el orden temporal en que cada paso se aplica sobre la plataforma.

Este orden temporal viene definido por el valor de los “arrival time” tomando siempre como referencia el instante de tiempo 0 s.

En definitiva, no se respeta el mismo orden temporal que para el caso anterior con dos peatones con el mismo tamaño de pisada y misma frecuencia de paso.

Ya que a pesar de que ambos comienzan a la vez, es decir, para “ t_0 ” se aplica D1 peatón 1 y D1 peatón 2, al ser diferente la frecuencia de paso, hace que un peatón se adelante respecto del otro. A pesar de coincidir de manera longitudinal los puntos de aplicación de las pisadas correspondientes entre los dos peatones, al tener el mismo tamaño de pisada.

El procedimiento de definir los “load patterns”, mostrados en la ilustración 102, y las funciones de fuerza de las pisadas es igual que para el caso de ambos peatones a 90 ppm:

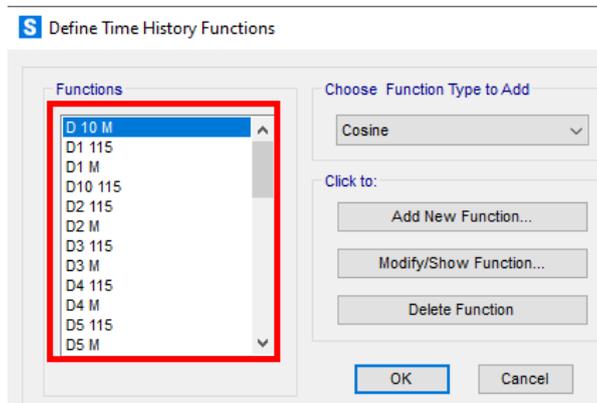


Ilustración 102. "Load patterns" flujo peatonal mismo tamaño de pisada pero diferente frecuencia de paso

Solo se deben importar los archivos de las funciones de fuerza de las pisadas del peatón a 115 ppm.

Se selecciona como referencia el tránsito T1, de los tres realizados experimentalmente para esta frecuencia de paso y tamaño de pisada mediana.

Una vez importados los ficheros de las pisadas medianas a 90 ppm, y las pisadas medianas a 115 ppm, el “load case” definido con los valores correspondientes de los “arrival time” es el mostrado en la ilustración 103:

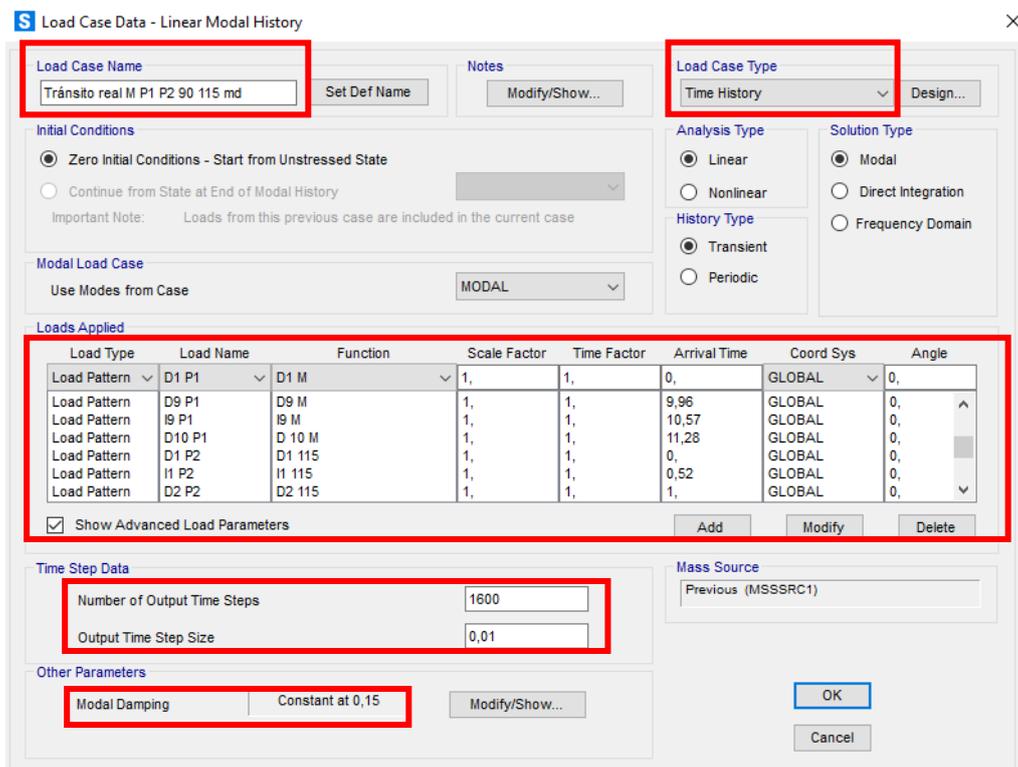


Ilustración 103. "Load case" tránsito peatonal 2 peatones mismo tamaño de pisada, pero diferente frecuencia de paso

Se puede observar el final del tránsito del primer peatón, y el inicio del segundo, esta vez, con diferentes funciones de fuerza de las pisadas y diferentes valores de “arrival time”.

El procedimiento de aplicar las cargas unidad asociadas a los “load patterns” y estas a las funciones de fuerza de las pisadas del peatón, es igual que cuando ambos peatones tenían una frecuencia de paso de 90 ppm, tanto para el caso de la misma dirección como el de la opuesta dirección.

Se representan los valores del desplazamiento y la aceleración del punto central. Se comparan con los valores experimentales registrados durante el tránsito peatonal T1 M a 90 ppm con un solo peatón.

Caso ambos peatones caminando en la misma dirección:

Se grafican los resultados en las ilustraciones 104 y 105:

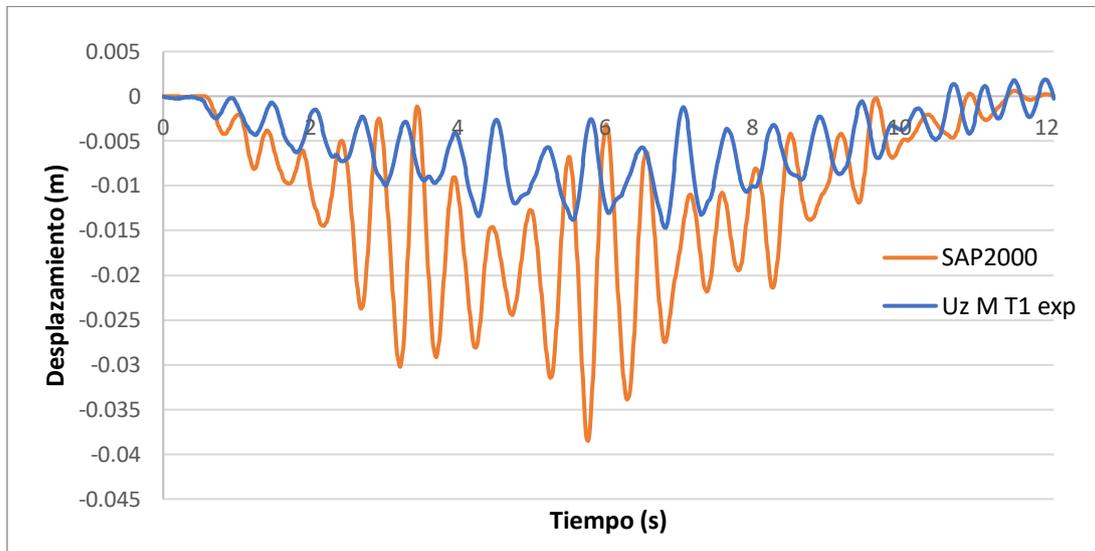


Ilustración 104. Desplazamiento 2 peatones M 90 y 115 misma dirección vs T1 M real experimental

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.03851 m = 38.51 mm

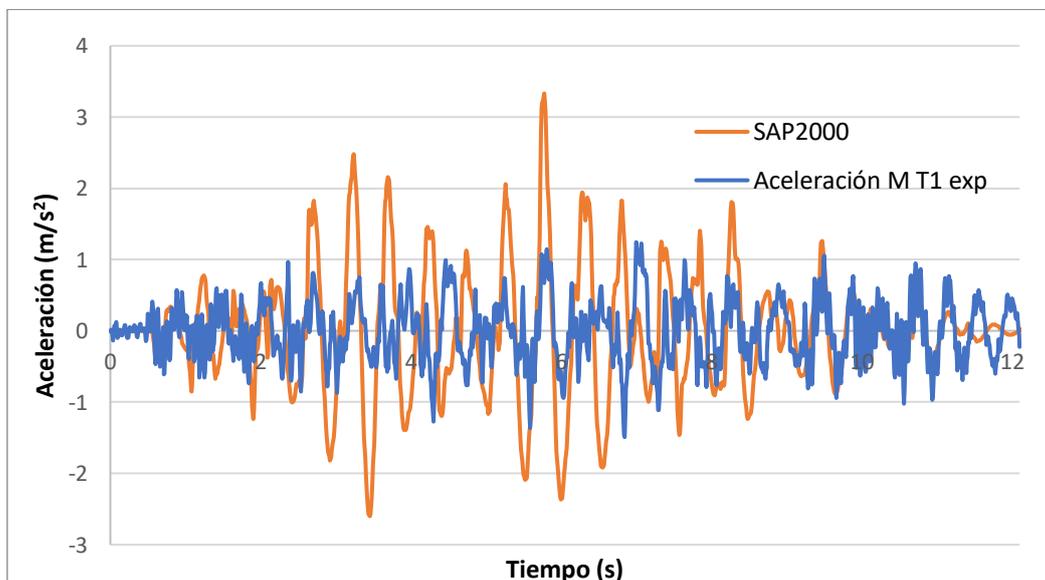


Ilustración 105. Aceleración 2 peatones M 90 y 115 ppm misma dirección vs T1 M real experimental

Valor máximo aceleración SAP2000 = 3.33191 m/s²

Caso dos peatones caminando en opuesta dirección, es decir, uno hacia el otro:

Se grafican los resultados en las ilustraciones 106 y 107:

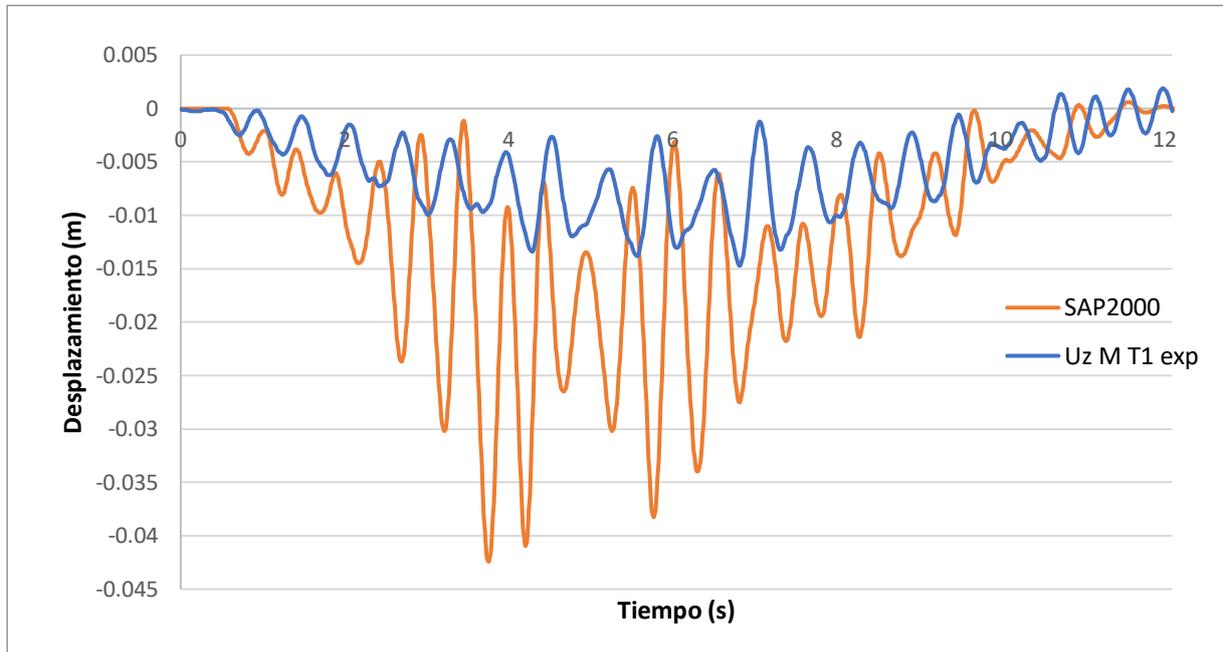


Ilustración 106. Desplazamiento 2 peatones M 90 y 115 opuesta dirección vs T1 M real experimental

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.04243 m = 42.43 mm

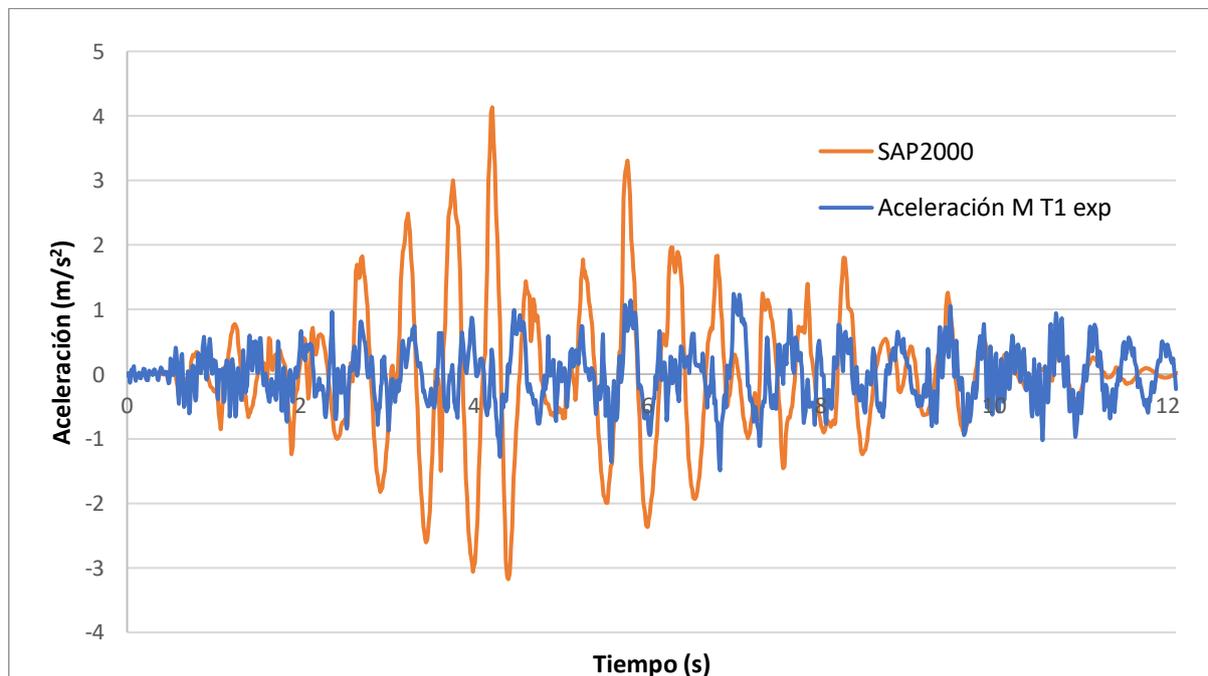


Ilustración 107. Aceleración 2 peatones M 90 y 115 ppm opuesta dirección vs T1 M real experimental

Valor máximo aceleración SAP2000 = 4.13514 m/s²

Cabe destacar que estas simulaciones se han realizado con pisadas medianas y a 90 y 115 ppm, pero el procedimiento es el mismo para cualquier tamaño de pisada (variando la discretización de la plataforma) y frecuencia de paso (variando el valor de los “arrival time” de cada tránsito peatonal).

7.6. Flujos peatonales:

Un flujo peatonal se define como un tránsito de personas sobre una pasarela, pero que no comienzan a caminar al mismo tiempo. [13]

Es decir, representa de un modo “real” una situación cotidiana de la estructura, en la que un peatón comienza a andar sobre ella cuando ya hay un peatón caminando sobre la misma.

Para realizar esto en el software de cálculo se sigue el mismo procedimiento que anteriormente, lo que cambia en este caso es el “load case”, en concreto el valor de los “arrival time” de los tránsitos de cada peatón.

El tamaño de las pisadas es el mismo, así que la discretización de la plataforma inicial es válida.

Se va a suponer que ambos peatones caminan justo por el centro de la plataforma. Por lo que los puntos de aplicación de las cargas unidad asociadas a los “load patterns” de cada tránsito peatonal coinciden en posición en la plataforma.

Se deben crear los “load patterns” de tránsito del segundo peatón, y asociar estos a las funciones de fuerza de las pisadas. Y aplicar estas en los puntos donde se aplica cada paso.

Es decir, se aplican en el mismo punto, mostrado en la ilustración 108, pero se retrasan temporalmente:

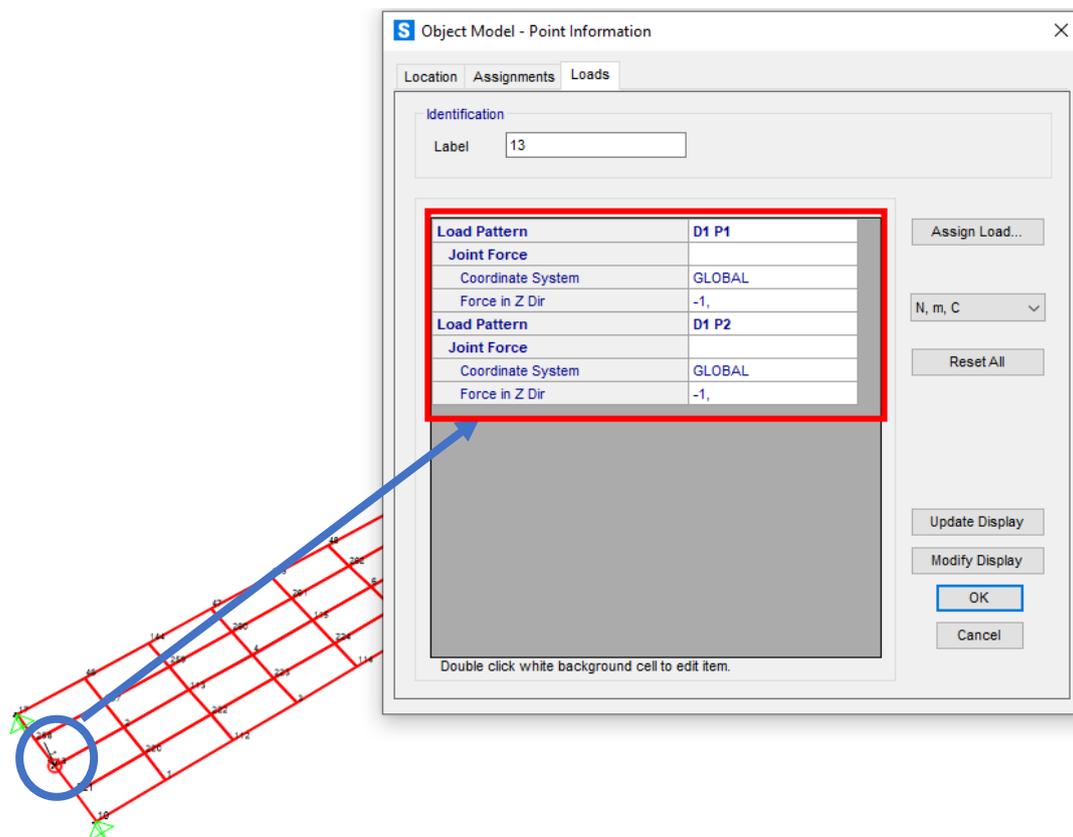


Ilustración 108. Punto aplicación carga unidad de "load pattern" del flujo peatonal de 2 peatones

Ambos se efectúan con un tamaño de pisada mediana M y a 90 ppm, por lo que los ficheros de las funciones de fuerza de las pisadas coinciden.

El procedimiento no variaría para el caso de pisadas cortas, pero se toma este como referencia para estudiar la respuesta de la estructura ante este tipo de tránsitos peatonales.

Para hacer que el segundo peatón comience a caminar cuando el otro ya esté en la plataforma, al tener ambos la misma frecuencia de paso, basta con sumar al valor de los “arrival time” del tránsito del segundo peatón el valor del retraso con el que se quiere que este comience a andar.

Para este caso se selecciona un desfase de 3 s. Es decir, el segundo peatón comenzará a andar con el mismo tamaño de pisada y la misma frecuencia de paso, 3 s después de que el primer peatón comience a andar.

Por lo tanto, los valores del “arrival time” de su tránsito, son los mismos valores que los del primer peatón (al tener la misma frecuencia de paso), pero retrasada 3 s, es decir, sumarle a cada valor 3 s.

El “load case” resultante es el mostrado en la ilustración 109:

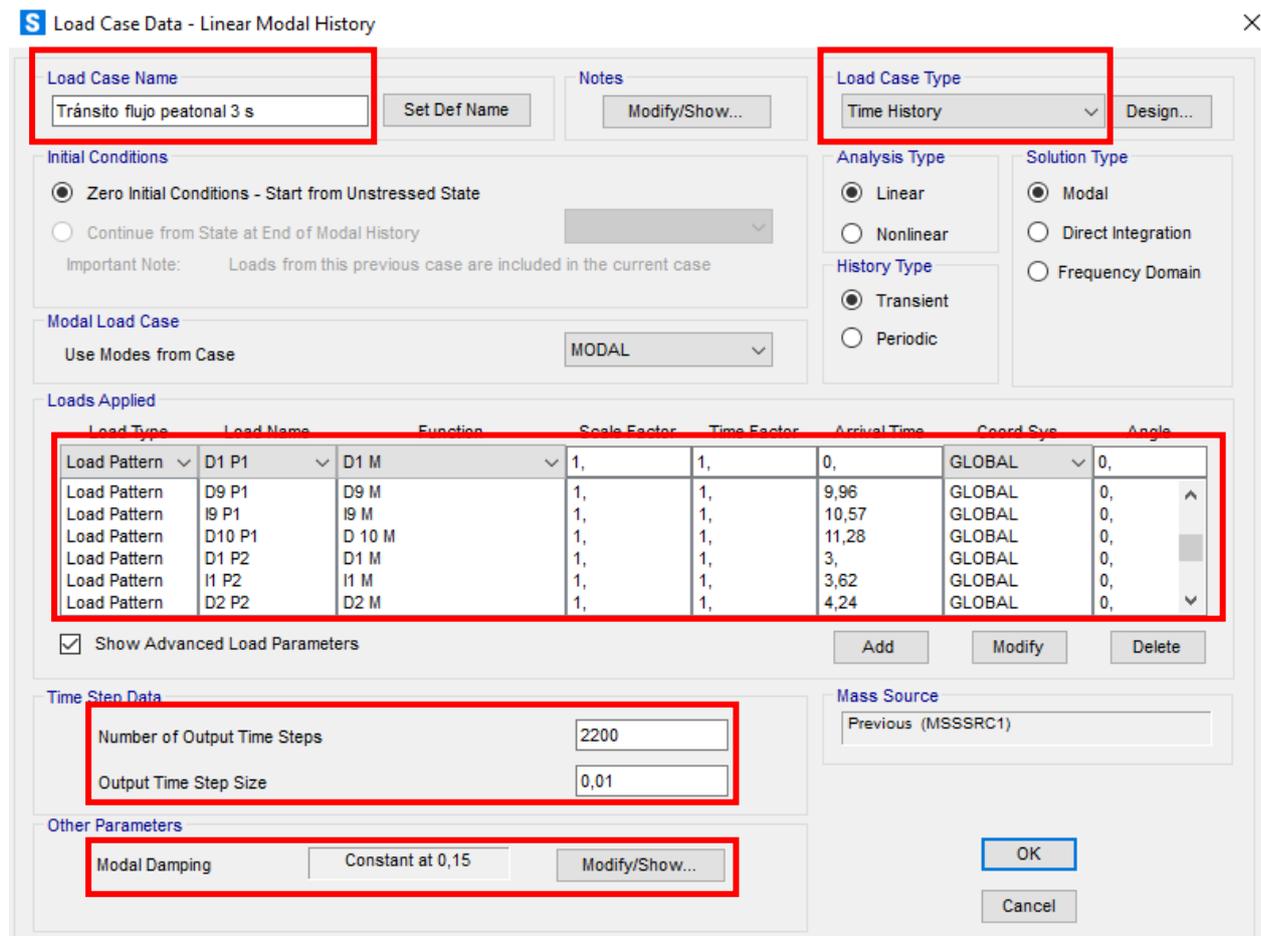


Ilustración 109. "Load case" flujo peatonal 2 peatones M a 90 ppm con 3 segundos de retraso temporal

El retraso temporal entre ambos peatones se aprecia en el “arrival time” del primer paso del peatón 2, que es “D1 P2” que, en vez de comenzar en 0 s, comienza en 3 s, retrasando el resto de pasos, y generando de esta manera el flujo peatonal sobre la plataforma.

En el apartado “Time step data”, se selecciona como frecuencia 0,01 Hz y 2200 puntos de estudio (22 s de simulación) , este último valor cambio respecto a las simulaciones anteriores, ya que ahora al no comenzar a la vez, el tránsito total de ambos peatones es más largo. Por eso se selecciona un valor más grande, para que se grafique en el tiempo el tránsito completo.

Se representan los valores del desplazamiento y la aceleración del punto central, exportando los valores a Excel desde SAP2000 para poder graficarlos. Se comparan con los valores experimentales registrados durante el tránsito peatonal T1 M a 90 ppm con un solo peatón.

Como se aprecia en ambas gráficas de las ilustraciones 110 y 111, la duración del tránsito no es la misma entre el flujo peatonal simulado y el registro experimental T1 M a 90 ppm con un solo peatón.

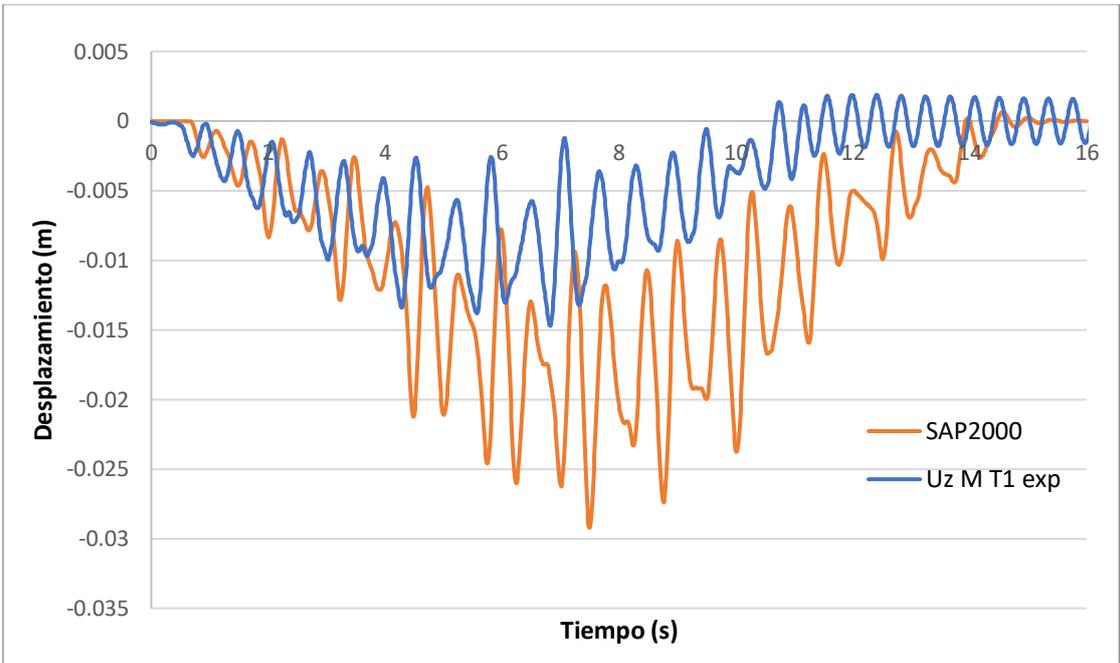


Ilustración 110. Desplazamiento flujo peatonal 2 p M 90 ppm misma dirección 3s vs T1 M 90 experimental

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.02922 m = 29.22 mm

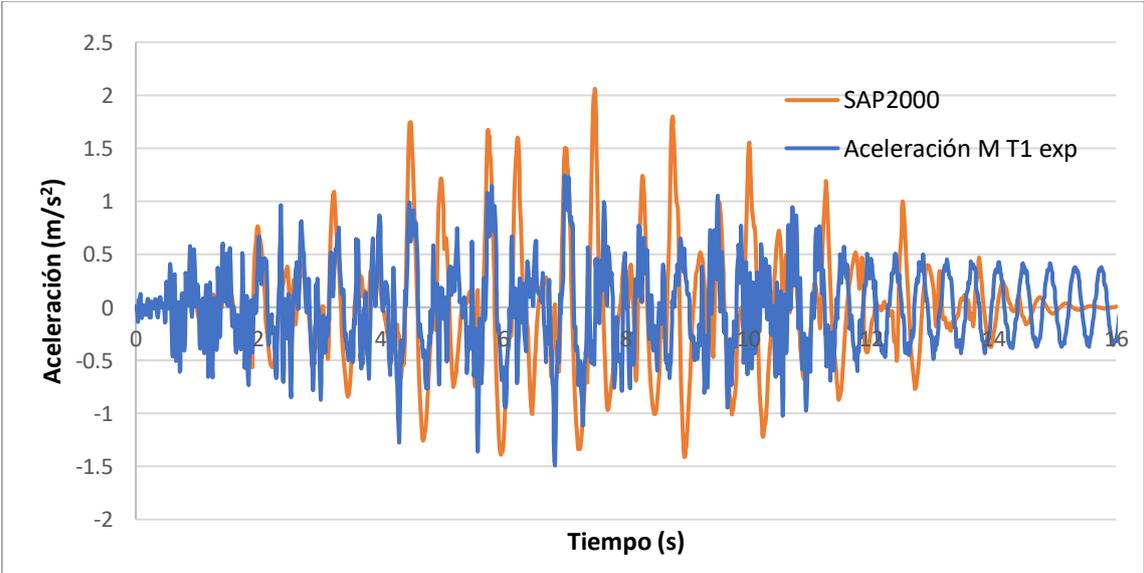


Ilustración 111. Aceleración flujo peatonal 2 p M 90 ppm misma dirección 3s vs T1 M 90 experimental

Valor máximo aceleración SAP2000 = 2.06143 m/s²

8. SIMULACIONES DE DISEÑO:

Todas las anteriores simulaciones de aplicación que se han realizado a lo largo de este epígrafe corresponden con simulaciones basadas en datos experimentales de un tránsito peatonal.

Al importar al software de cálculo el valor del “arrival time” del tránsito peatonal experimental, la función de fuerzas de las pisadas del peatón, la simulación se basa en datos registrados de manera experimental.

Durante la etapa de diseño de cualquier estructura, normalmente, no se tienen datos experimentales de la respuesta de la misma. Por lo tanto, los ingenieros y arquitectos deben usar simplificaciones de los casos de carga reales que se aproximen lo más posible a la respuesta real de la estructura.

Al realizar las simplificaciones del tránsito peatonal, se había estudiado el caso “Shaker”, Deslizante, Pulsante, Robot de 1 y 2 pasos. Al comparar la respuesta de la plataforma con la respuesta registrada durante los ensayos experimentales, se observa, que los que mejor representan la realidad son el caso “Shaker” y el Pulsante.

Por lo tanto, se seleccionan estos dos casos como referencia, es decir, serían los casos seleccionados si se tuviera que diseñar la plataforma desde cero, sin poder comparar con resultados experimentales como ha sido en este caso.

Y el caso Pulsante, se trata de un caso de tránsito peatonal simplificado, ya que supone que el peatón camina siempre igual, respecto a la función de fuerzas de la pisada (simplificada) y el tiempo entre caso paso.

Durante este epígrafe se realizan las siguientes simulaciones siempre con dos peatones:

- Caso “Shaker” 2 peatones a 90 ppm ambos y pisadas medianas.
- Caso “Shaker” 2 peatones a 90 ppm y 115 ppm y pisadas medianas.
- Caso “Shaker” 2 peatones a 90 ppm y 143 ppm y pisadas medianas.
- Caso Pulsante 2 peatones a 90 ppm ambos, pisadas medianas y misma dirección.
- Caso Pulsante 2 peatones a 90 ppm ambos, pisadas medianas y opuesta dirección.
- Caso Pulsante 2 peatones a 90 ppm y otro a 143 ppm, pisadas medianas y misma dirección.
- Caso Pulsante 2 peatones a 90 ppm y otro a 143 ppm, pisadas medianas y opuesta dirección.

Como se puede observar, todos los casos se realizan para el caso de pisadas medianas, el procedimiento para pisadas cortas sería igual.

El tamaño de la pisada, junto con la frecuencia de paso, influyen en el tiempo que se tarda en recorrer la plataforma durante el ensayo, y de este valor depende la función de fuerza del “Shaker”.

Además, la frecuencia de paso, al influir en el tiempo que se tarda en recorrer la plataforma, también determinará el valor del “arrival time” del tránsito pulsante.

Por lo tanto, la longitud de la pisada y la frecuencia de paso seleccionada, influyen en todos los ensayos que se van a realizar a continuación.

Por un lado, para calcular el valor del tiempo total que se tarda en recorrer la plataforma, en función de la frecuencia de paso y de la longitud de paso se debe aplicar la ecuación 5:

$$T_{\text{recorrer plataforma}} = \frac{L_{\text{plataforma}} \cdot 60}{ppm \cdot L_{\text{pisada}}}$$

Ecuación 5. Cálculo tiempo que se tarda en recorrer la plataforma en función de la frecuencia de paso y la longitud de la pisada

El valor de la longitud de la pisada se calcula con la ecuación 6:

$$L_{\text{pisada}} = \frac{L_{\text{plataforma}}}{n_{\text{pasos}}}$$

Ecuación 6. Cálculo longitud de la pisada en función del número de pasos

Siendo:

$L_{\text{plataforma}}$ = longitud total de la plataforma: 13.5 m

L_{pisada} = longitud de la pisada, para el caso de medianas es de 0.75 m al recorrer la plataforma en 18 pasos

ppm = frecuencia de paso, en este caso se estudian a 90, 115 y 143.

Se sustituyen los valores y se obtiene:

$$T_{\text{recorrer plataforma } 90 \text{ ppm}} = 12 \text{ s}$$

$$T_{\text{recorrer plataforma } 115 \text{ ppm}} = 9,39 \text{ s}$$

$$T_{\text{recorrer plataforma } 143 \text{ ppm}} = 7,55 \text{ s}$$

Este valor es el que se debe introducir en el término " T_{Total} " de la ecuación "Ecuación 7. Función de fuerza SETRA".

Para el cálculo del valor del "arrival time" para el caso deslizante se aplica la ecuación 8:

$$\text{Arrival time} = \frac{1}{\left[\frac{ppm}{60}\right]}$$

Ecuación 7. Cálculo del valor del "arrival time" para el caso Pulsante en función de la frecuencia de paso del tránsito peatonal

Se sustituyen los valores y se obtiene:

$$\text{Arrival time } 90 \text{ ppm} = 0,67 \text{ s}$$

$$\text{Arrival time } 143 \text{ ppm} = 0,42 \text{ s}$$

Para calcular el valor de la longitud del paso, es decir, de la longitud temporal de la función de fuerza que define cada pisada del caso Pulsante, se debe sumar al anterior valor, el valor del solapamiento.

En este caso, se selecciona 0,15 s, se obtiene:

Longitud temporal del paso 90 ppm = 0,82 s

Longitud temporal del paso 143 ppm = 0,57 s

Una vez calculados todos estos valores, ya se pueden definir tanto las funciones de las pisadas de cada paso, el "load case" con el valor de los "arrival time" para el caso Pulsante, al igual que la función que define el caso "Shaker".

Los puntos de aplicación de las cargas unidad, son los mismos que en los epígrafes de tránsitos laterales, es decir, al haber dos peatones, ambos andan por la parte central de cada mitad longitudinal de la plataforma en el caso Pulsante.

Para el caso "Shaker", al haber dos fuerzas puntuales, en vez de una, estas se aplican en el punto central de la plataforma, pero cada una en el centro de la mitad correspondiente de cada peatón.

8.1. Caso "Shaker" 2 peatones a 90 ppm ambos y pisadas medianas:

Para realizar esta simulación se debe importar a SAP2000 la función de la fuerza ponderada que define el caso "Shaker" que se han mostrado en la ilustración 35. En este caso para pisadas medianas y a 90 ppm.

El punto de aplicación de las dos fuerzas puntuales, como se ha comentado anteriormente, es el punto central de la plataforma. Pero al haber dos peatones, cada fuerza en su mitad longitudinal correspondiente.

El "load case" definido es el que se muestra en la ilustración 112:

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor	Time Factor	Arrival Time	Coord Sys	Angle
Load Pattern	Shaker 90	Shaker 90 M	1,	1,	0,	GLOBAL	0,
Load Pattern	Shaker 90	Shaker 90 M	1,	1,	0,	GLOBAL	0,
Load Pattern	Shaker 115 M	Shaker 115 M	1,	1,	0,	GLOBAL	0,

Ilustración 112. "Load case" caso 2 "Shaker" M 90

Se obtienen los siguientes resultados, y se grafican en las ilustraciones 113 y 114, que se comparan con el caso "Shaker" 90 M de un solo peatón:

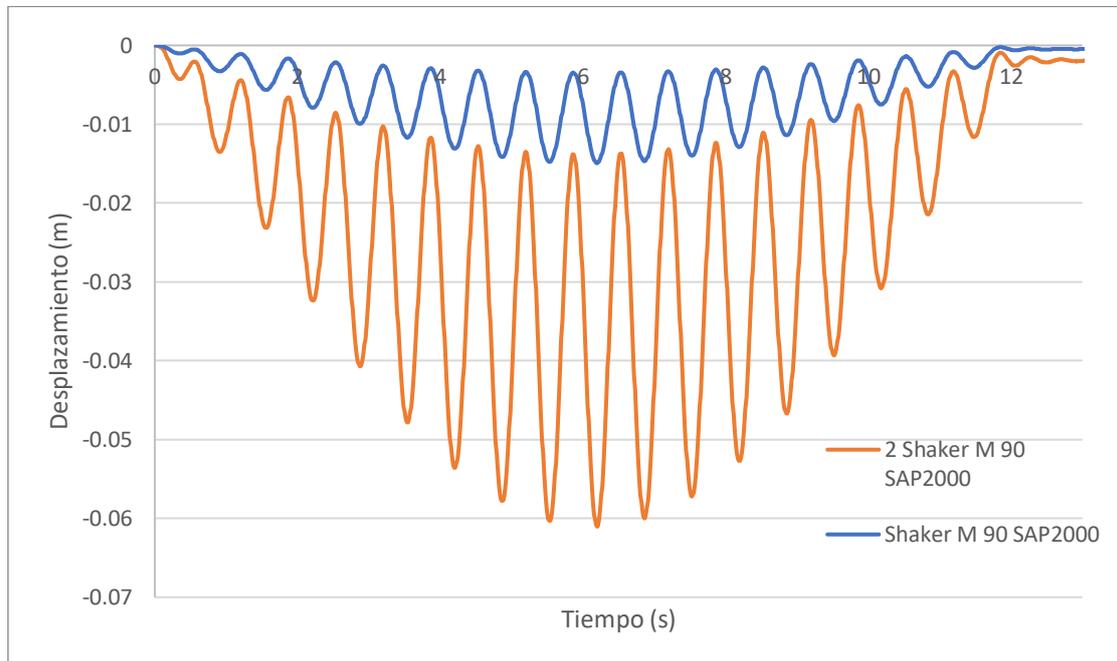


Ilustración 113. Comparativa desplazamiento caso 2 "Shaker" M 90 vs "Shaker" M 90

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.06105 m = 61.05 mm

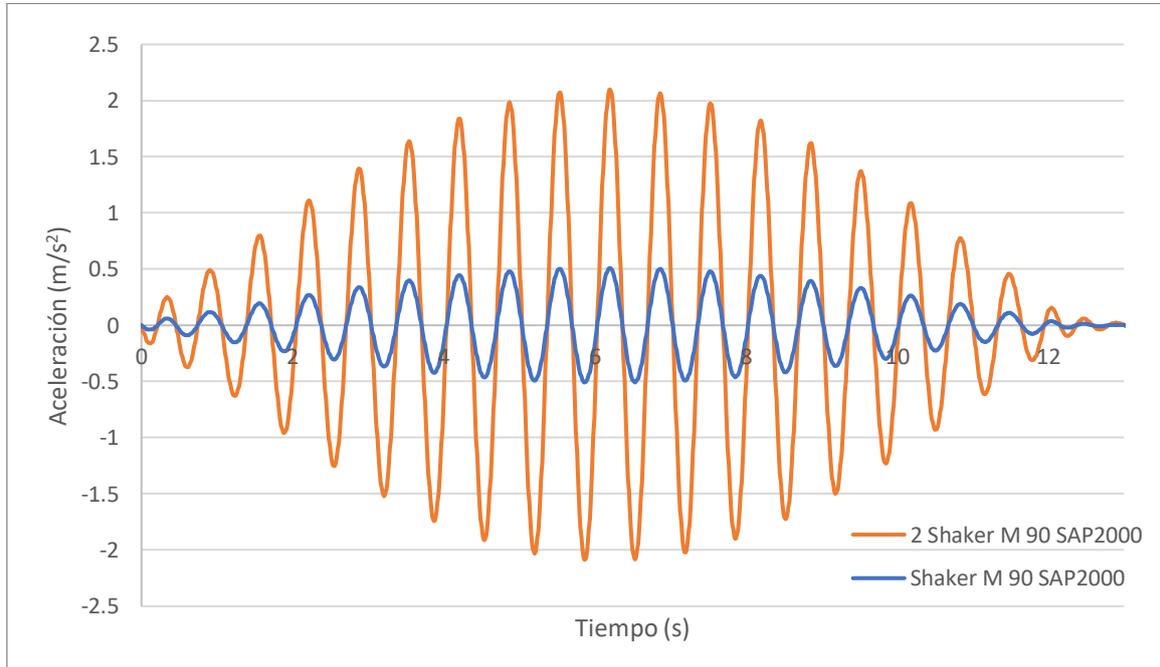


Ilustración 114. Comparativa aceleración caso 2 "Shaker" M 90 vs "Shaker" M 90

Valor máximo aceleración SAP2000 = 2.09922 m/s²

Entendiéndose "2 Shaker M 90 SAP2000" como el resultado de SAP2000 de la simulación de aplicar dos funciones de fuerza del Shaker a 90 ppm y "Shaker M 90 SAP2000" como el resultado de aplicar solo una función de fuerza del Shaker a 90 ppm, ambos con pisadas medianas.

8.2. Caso "Shaker" 2 peatones a 90 ppm y 115 ppm y pisadas medianas:

En este caso se sigue el mismo procedimiento, solo cambia la función del "Shaker", que ahora al ser a 115 ppm el segundo peatón, cambia el tiempo que tardaría en recorrer la plataforma, y de este valor depende la función de fuerza ponderada según la ecuación 3. Función fuerza SETRA.

Se obtienen los siguientes resultados, y se grafican en las ilustraciones 115 y 116, que se comparan con el caso "Shaker" 90 M de un solo peatón:

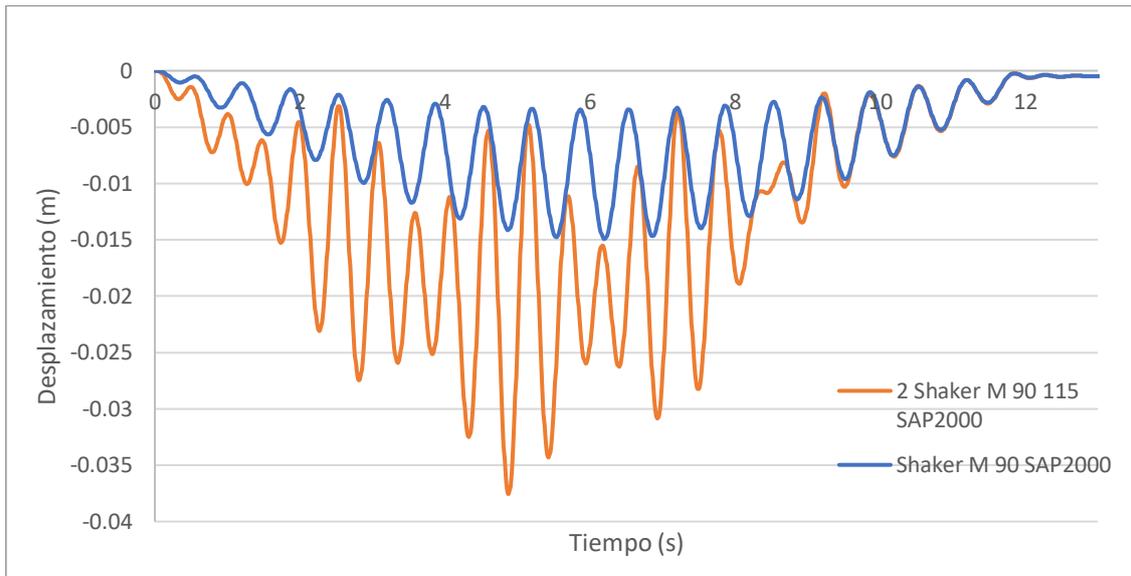


Ilustración 115. Comparativa desplazamiento caso 2 "Shaker" M 90 115 vs "Shaker" M 90

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.03755 m = 37.55 mm

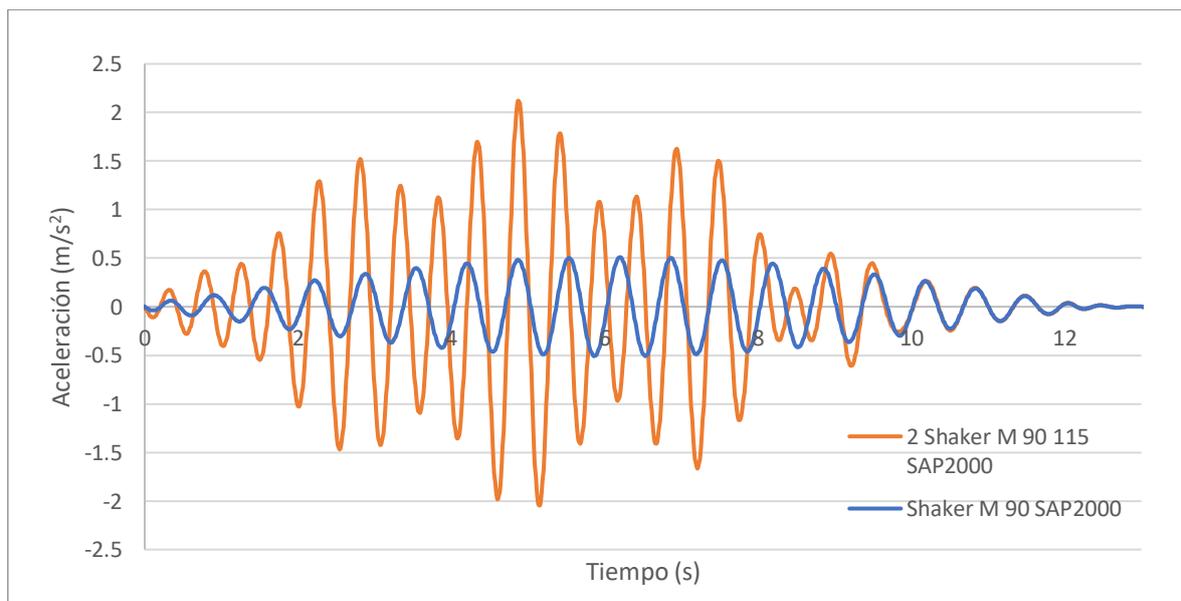


Ilustración 116. Comparativa aceleración caso 2 "Shaker" M 90 115 vs "Shaker" M 90

Valor máximo aceleración SAP2000 = 2.12057 m/s²

8.3. Caso "Shaker" 2 peatones a 90 ppm y 143 ppm pisadas medianas:

Nuevamente al ser a 143 ppm el segundo peatón la función de fuerzas del "Shaker" cambia, se seleccionan 143 Hz, al ser esta la frecuencia de resonancia del primer modo de vibración de la plataforma.

Se obtienen los siguientes resultados, y se grafican en las ilustraciones 117 y 118, que se comparan con el caso "Shaker" 90 M de un solo peatón:

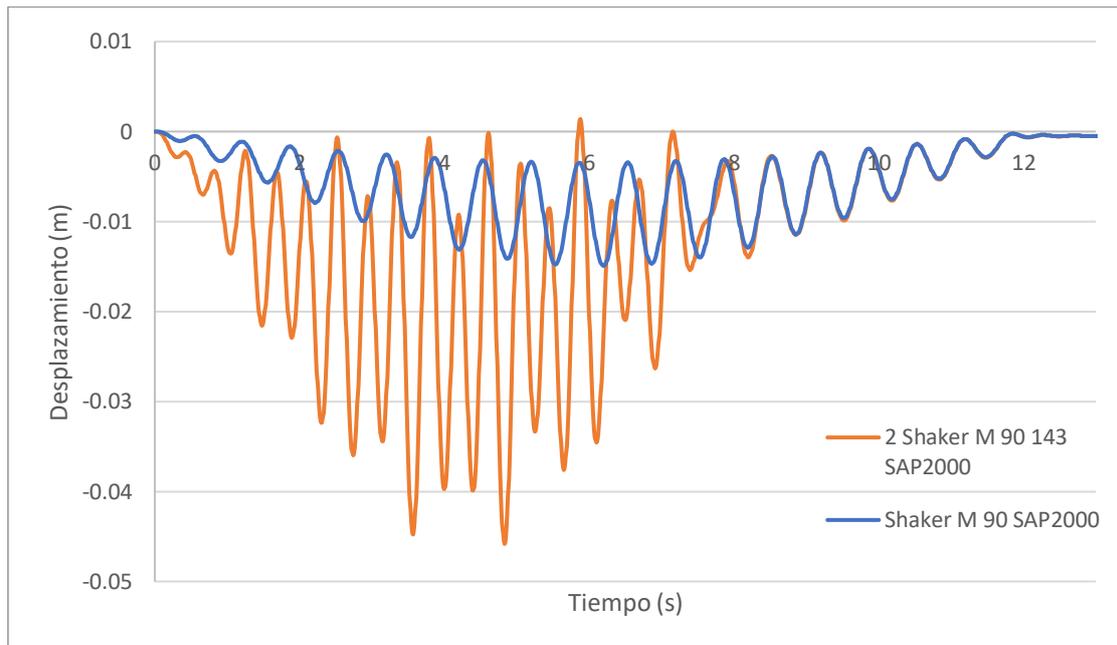


Ilustración 117. Comparativa desplazamiento caso 2 "Shaker" M 90 143 vs "Shaker" M 90

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.04583 m = 45.83 mm

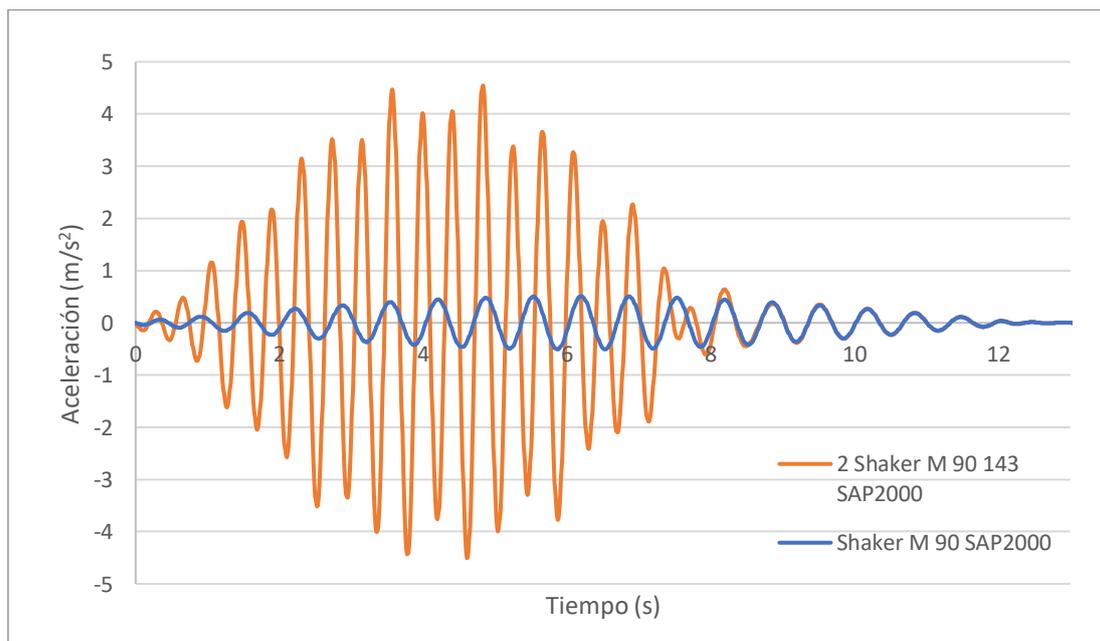


Ilustración 118. Comparativa aceleración caso 2 "Shaker" M 90 143 vs "Shaker" M 90

Valor máximo aceleración SAP2000 = 4.54652 m/s²

8.4. Caso Pulsante 2 peatones a 90 ppm ambos, pisadas medianas y misma dirección:

Para esta simulación se sigue el mismo procedimiento que en los epígrafes anteriores en los que había dos peatones en la plataforma. Anteriormente se importaban las funciones registradas de datos experimentales y se definía el “load case” a partir de los valores medidos experimentalmente.

En este caso, al tratarse de una simplificación, la función de fuerza de las pisadas se simplifica, y es la que se muestra en la ilustración 119:

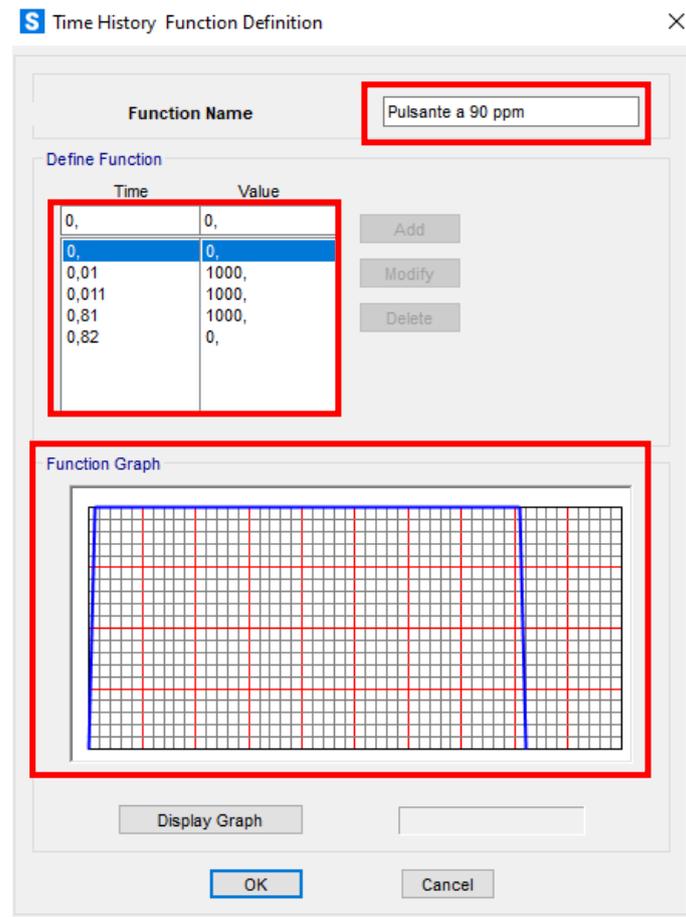


Ilustración 119. Función de fuerza Pulsante M 90 ppm

Se definen los “load patterns” y se aplican las cargas unidad asociados a estos y a la función de las pisadas, del mismo modo que en los epígrafes con dos peatones reales y sobre los mismos puntos en la plataforma.

EL “load case” se define igual también, cambiando el valor de los “arrival time” calculados mediante la ecuación 7 en función de la frecuencia de paso.

Y suponiendo que el peatón camina siempre de la misma forma, es decir, el valor del “arrival time” entre todos los pasos es constante.

En este caso, ambos peatones van a 90 ppm, por lo que el valor de los “arrival time” es el mismo para los dos tránsitos de los dos peatones.

El "load case" definido es el que se muestra en la ilustración 120:

S Load Case Data - Linear Modal History X

Load Case Name
Tránsito pulsante M P1 P2 90 md

Notes
Modify/Show...

Load Case Type
Time History

Initial Conditions

Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

Continue from State at End of Modal History

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case

Use Modes from Case: MODAL

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor	Time Factor	Arrival Time	Coord Sys	Angle
Load Pattern	D1 P1	Pulsante a 90 ppm	1,	1,	0,	GLOBAL	0,
Load Pattern	I9 P1	Pulsante a 90 ppm	1,	1,	11,39	GLOBAL	0,
Load Pattern	D10 P1	Pulsante a 90 ppm	1,	1,	12,06	GLOBAL	0,
Load Pattern	D1 P2	Pulsante a 90 ppm	1,	1,	0,	GLOBAL	0,
Load Pattern	I1 P2	Pulsante a 90 ppm	1,	1,	0,67	GLOBAL	0,
Load Pattern	D2 P2	Pulsante a 90 ppm	1,	1,	1,34	GLOBAL	0,
Load Pattern	I2 P2	Pulsante a 90 ppm	1,	1,	2,01	GLOBAL	0,

Show Advanced Load Parameters

Time Step Data

Number of Output Time Steps: 1600

Output Time Step Size: 0,01

Other Parameters

Modal Damping: Constant at 0,15

Mass Source: Previous (MSSSRC1)

OK

Cancel

Ilustración 120. "Load case" caso 2 Pulsantes M 90

Se obtienen los siguientes resultados, y se grafican en las ilustraciones 121 y 122, que se comparan con el caso Pulsante 90 M de un solo peatón:

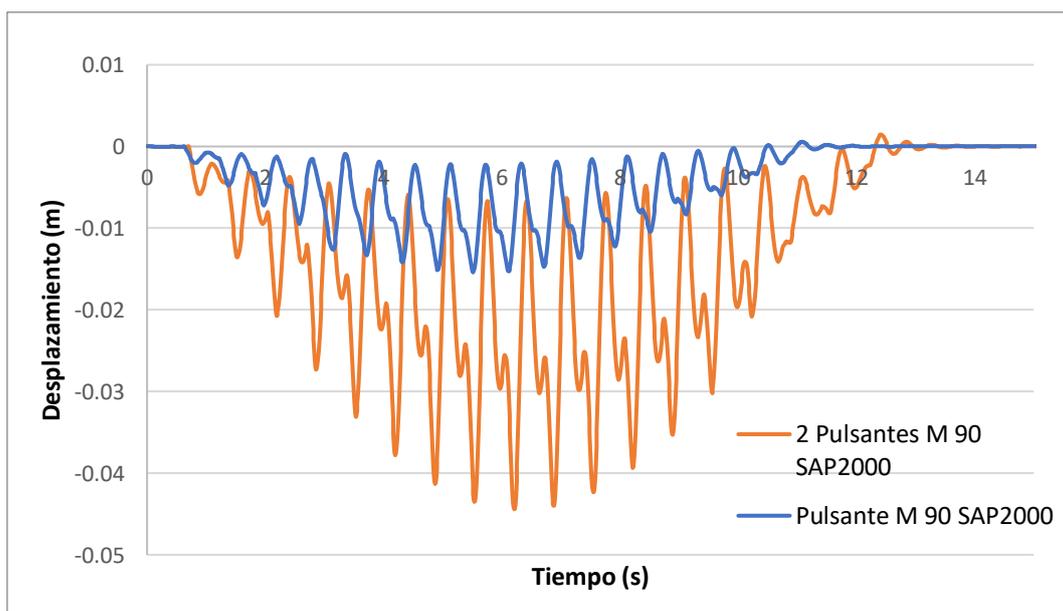


Ilustración 121. Comparativa desplazamiento caso 2 Pulsantes M 90 misma dirección vs Pulsante M 90

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.04442 m = 44.42 mm

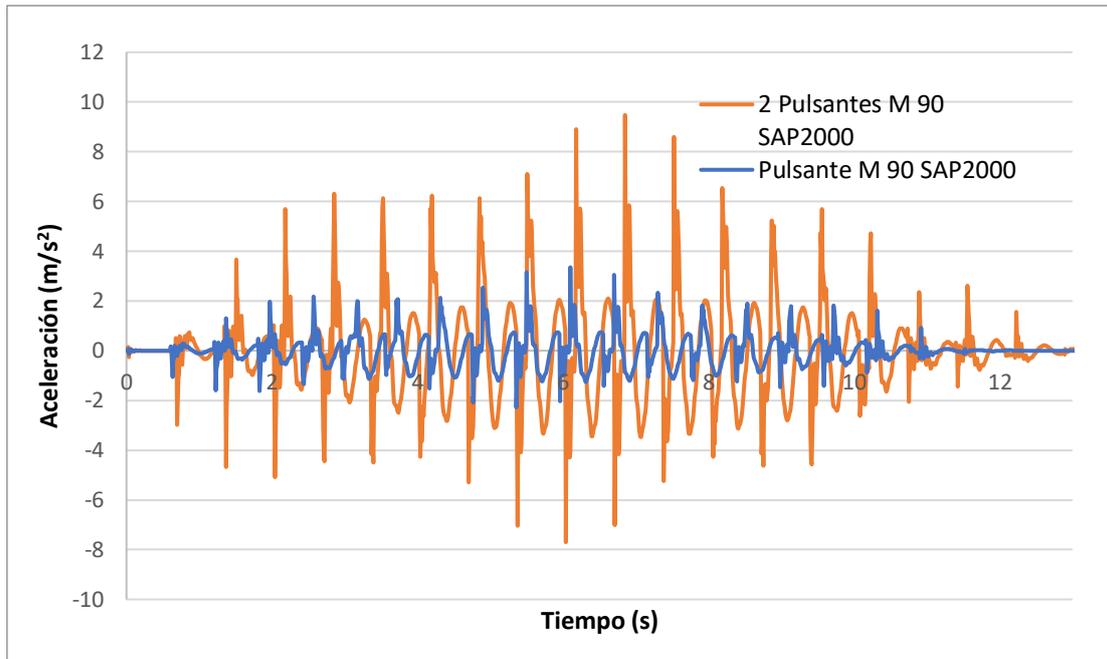


Ilustración 122. Comparativa aceleración caso 2 Pulsantes M 90 misma dirección vs Pulsante M 90

Valor máximo aceleración SAP2000 = 9.47345 m/s²

Entendiéndose “2 Pulsantes M 90 SAP2000” como el resultado de SAP2000 de la simulación de aplicar dos tránsitos pulsantes a 90 ppm y “Pulsante M 90 SAP2000” como el resultado de aplicar solo un tránsito pulsante a 90 ppm, ambos con pisadas medianas.

8.5. Caso Pulsante 2 peatones a 90 ppm ambos, pisadas medianas y opuesta dirección:

Este caso es igual que el anterior, solo que, en vez de ir los dos peatones en la misma dirección, uno parte desde el otro extremo de la plataforma y va en dirección contraria al otro.

Por lo tanto, lo único que se debe cambiar son los puntos de aplicación de las cargas unidad asociados a los "load patterns" y a la función de fuerzas de cada pisada.

Se obtienen los siguientes resultados, y se grafican en las ilustraciones 123 y 124, que se comparan con el caso Pulsante 90 M de un solo peatón:

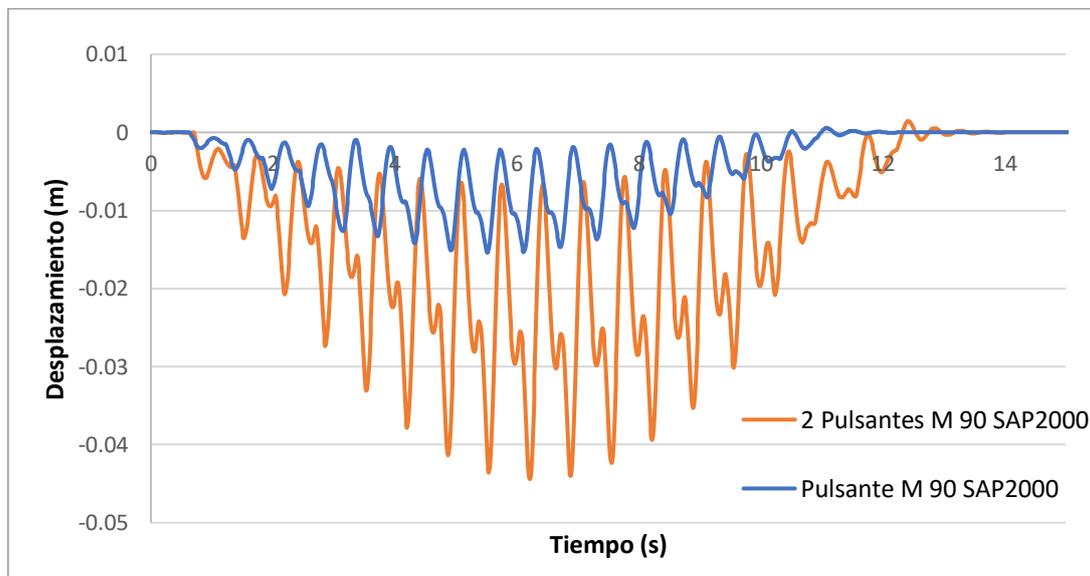


Ilustración 123. Comparativa desplazamiento caso 2 Pulsantes M 90 opuesta dirección vs Pulsante M 90

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.04442 m = 44.42 mm

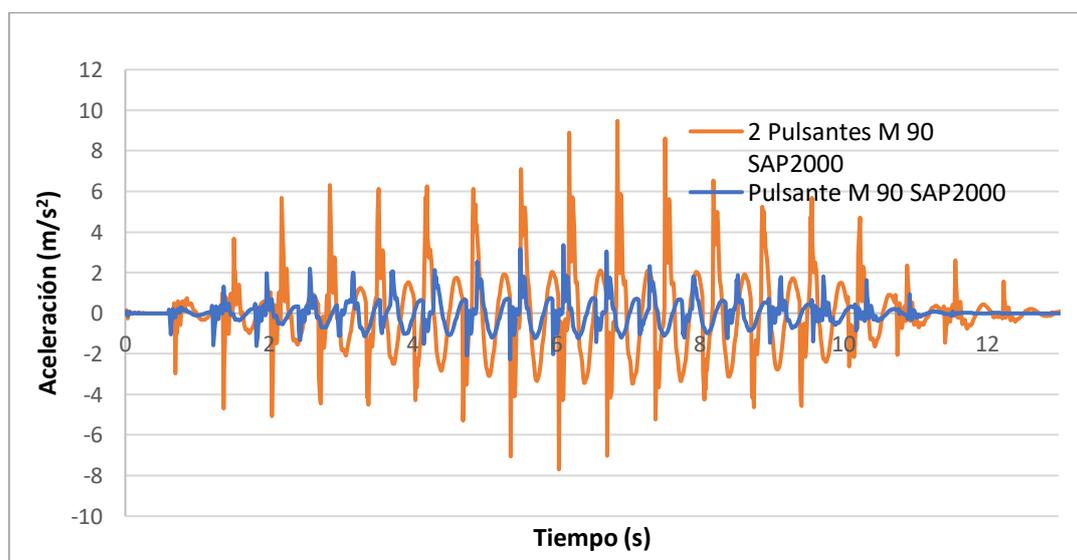


Ilustración 124. Comparativa aceleración caso 2 Pulsantes M 90 opuesta dirección vs Pulsante M 90

Valor máximo aceleración SAP2000 = 9.47345 m/s²

8.6. Caso Pulsante 2 peatones uno a 90 ppm y otro a 143 ppm, pisadas M y misma dirección:

Este caso difiere de los dos anteriores en que ahora uno de los peatones va a 143 ppm, por lo que el valor de los “arrival time” cambia en el tránsito del segundo peatón.

También cambia la función de fuerza que define las pisadas, al variar la frecuencia de paso, el resto de parámetros permanece constante.

La función de fuerza de las pisadas para el peatón a 143 ppm es la que se muestra en la ilustración 125:

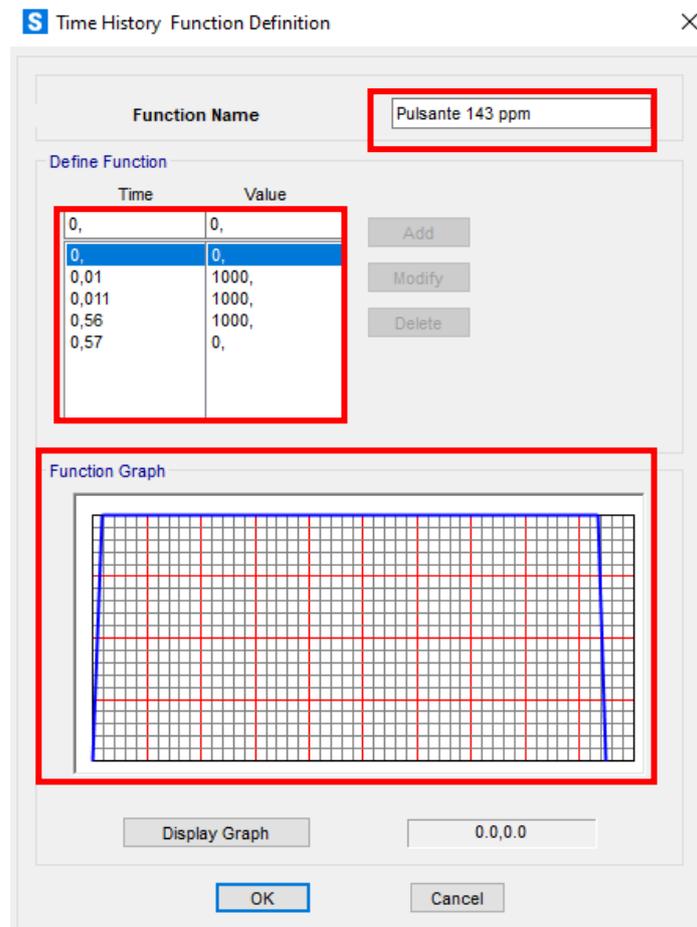


Ilustración 125. Función de fuerza Pulsante M 143 ppm

La función de fuerza para el peatón a 90 ppm es la que se muestra en la ilustración 119.

Se define el "load case" que se muestra en la ilustración 126:

S Load Case Data - Linear Modal History X

Load Case Name
Tránsito pulsante M P1 P2 90 115 md Set Def Name Modify/Show...

Load Case Type
Time History Design...

Initial Conditions
 Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
 Continue from State at End of Modal History ▼
 Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Analysis Type
 Linear
 Nonlinear

Solution Type
 Modal
 Direct Integration
 Frequency Domain

History Type
 Transient
 Periodic

Modal Load Case
Use Modes from Case: MODAL ▼

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor	Time Factor	Arrival Time	Coord Sys	Angle
Load Pattern ▼	D1 P1	Pulsante a 90 ppm ▼	1,	1,	0,	GLOBAL ▼	0,
Load Pattern	D9 P1	Pulsante a 90 ppm	1,	1,	10,72	GLOBAL	0,
Load Pattern	I9 P1	Pulsante a 90 ppm	1,	1,	11,39	GLOBAL	0,
Load Pattern	D10 P1	Pulsante a 90 ppm	1,	1,	12,06	GLOBAL	0,
Load Pattern	D1 P2	Pulsante 143 ppm	1,	1,	0,	GLOBAL	0,
Load Pattern	I1 P2	Pulsante 143 ppm	1,	1,	0,42	GLOBAL	0,
Load Pattern	D2 P2	Pulsante 143 ppm	1,	1,	0,84	GLOBAL	0,

Show Advanced Load Parameters Add Modify Delete

Time Step Data
 Number of Output Time Steps: 1600
 Output Time Step Size: 0,01

Mass Source
Previous (MSSSRC1)

Other Parameters
 Modal Damping: Constant at 0,15 Modify/Show...

OK
Cancel

Ilustración 126. "Load case" caso 2 Pulsante M 90 143

Se obtienen los siguientes resultados, y se grafican en las ilustraciones 127 y 128, que se comparan con el caso Pulsante 90 M de un solo peatón:

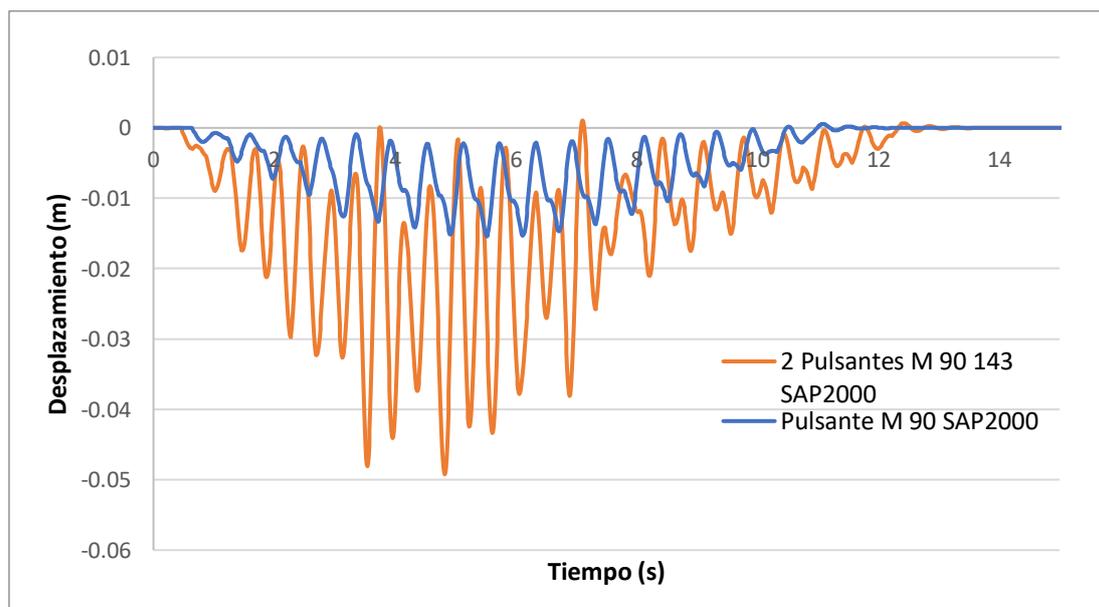


Ilustración 127. Comparativa desplazamiento caso 2 Pulsantes M 90 143 misma dirección vs Pulsante M 90

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.04923 m = 49.23 mm

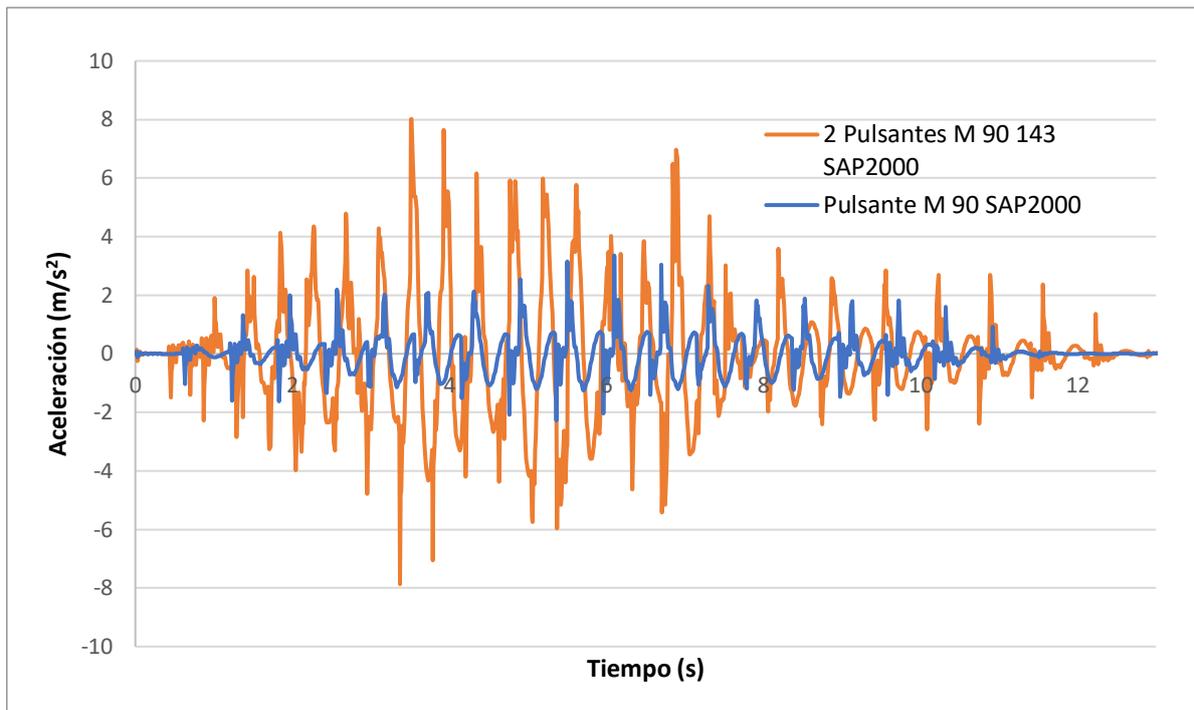


Ilustración 128. Comparativa aceleración caso 2 Pulsantes M 90 143 misma dirección vs Pulsante M 90

Valor máximo aceleración SAP2000 = 8.01004 m/s²

8.7. Caso Pulsante 2 peatones uno a 90 ppm, otro a 143 ppm, pisadas M, opuesta dirección:

Este caso es igual que el anterior, pero cambia la dirección del segundo peatón, por lo que se deben cambiar de nuevo los puntos de aplicación de las cargas unidad asociadas a los “load patterns” y a la función de carga de las pisadas.

Se obtienen los siguientes resultados, y se grafican en las ilustraciones 129 y 130, que se comparan con el caso Pulsante 90 M de un solo peatón:

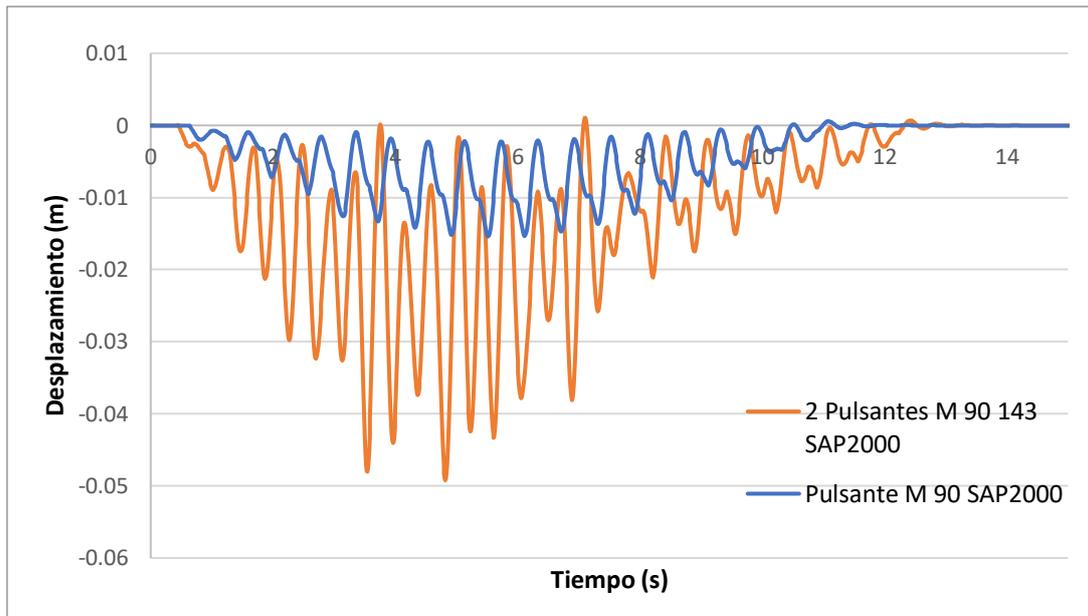


Ilustración 129. Comparativa desplazamiento caso 2 Pulsantes M 90 143 opuesta dirección vs Pulsante M 90

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.04923 m = 49.23 mm

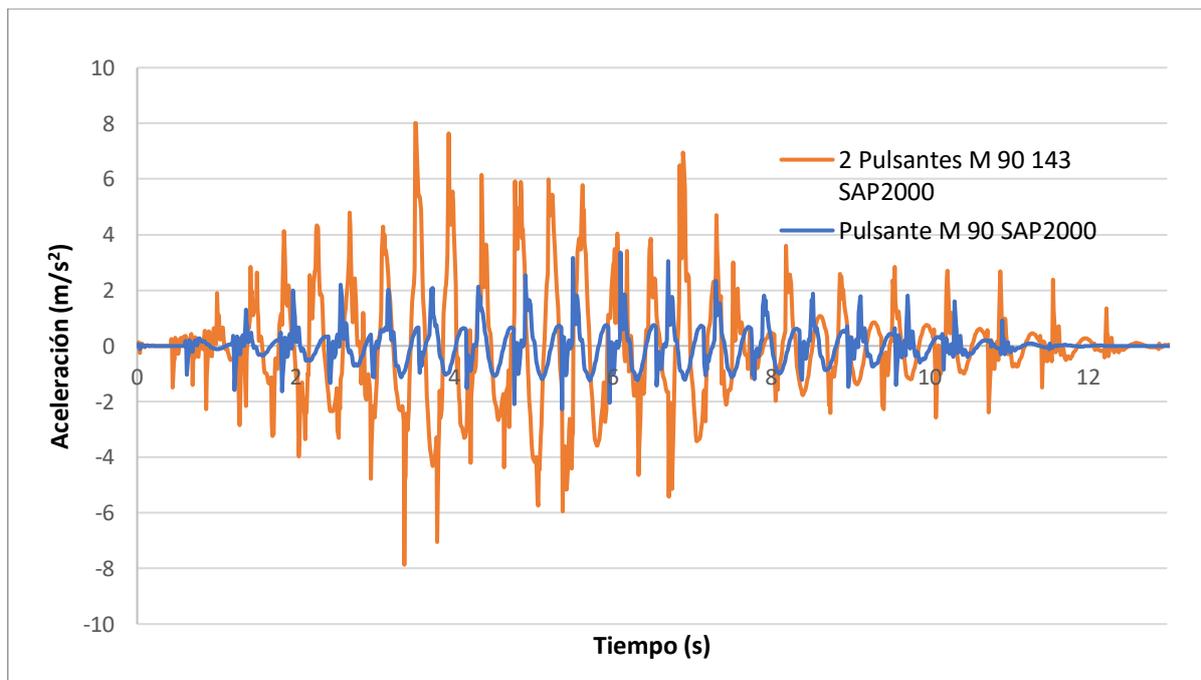


Ilustración 130. Comparativa aceleración caso 2 Pulsantes M 90 143 misma dirección vs Pulsante M 90

Valor máximo aceleración SAP2000 = 8.01004 m/s²

9. CONCLUSIONES:

Una vez desarrollado el presente trabajo, se ha estudiado gran cantidad de información relacionada con la respuesta de una determinada plataforma ante un tránsito peatonal, de este modo se han obtenido las siguientes conclusiones.

La respuesta de cualquier estructura ante una determinada situación de carga se puede prever siempre y cuando se cuente con modelos digitales que representen la realidad de manera fidedigna.

Para ello siempre se debe partir de una determinada situación inicial que permita comparar con resultados experimentales para poder utilizarlos como referencia, aunque en determinadas situaciones de diseño esta premisa puede no cumplirse.

Además, el tener un modelo digital de una estructura y conocer cómo responde, no vale solo para estudiar las estructuras a nivel general. Sino que, para una estructura específica, conocer cómo se va a comportar permite conocer los límites estructurales de la misma.

Permite además verificar si la estructura cumple los mínimos de carga para los que se ha diseñado o si por el contrario se van a generar problemas durante su utilización.

Además de poder llevar la estructura al límite, es decir, hasta que esta deja de ser útil o simplemente tiene problemas de estabilidad asociados a los casos de carga.

Esto permite conocer el grado de satisfacción durante su uso normal, y determinar como de probable es que se genere la carga necesaria para que esta deje de ser utilizable.

El realizar todas estas simulaciones, puede llevar más o menos tiempo, y puede tener asociado un mayor o menor coste.

Pero permite conocer la evolución de la estructura ante situaciones que de manera experimental no es viable, por su elevado coste económico o temporal o simplemente porque el caso de carga es imposible de escenificar.

En definitiva, poder definir un modelo digital en un software de cálculo de estructuras es vital para poder conocer el comportamiento real de la estructura, además de necesario para asegurar la viabilidad de la aplicación de la misma.

En cuanto al software de cálculo empleado, como se ha podido comprobar, responde de manera realista para simular un tránsito peatonal.

Uno de los principales inconvenientes que este tiene, y por el que los resultados obtenidos no son aún más simulares a los reales es la limitación del mismo a la hora de aplicar masas móviles.

Debido a que un peatón andando no solo ejerce fuerza sobre la estructura (cargas móviles), sino que su masa en movimiento genera una inercia que afecta sobre la respuesta real de la misma.

Además, también está la limitación a la hora de definir el amortiguamiento del conjunto de la plataforma peatón durante el tránsito peatonal, comentado anteriormente.

En definitiva, el poder realizar modelos digitales que permitan simular la respuesta real de una estructura, permite ahorrar costes y tiempo a las empresas encargadas en su construcción.

Al igual que poder asegurar que la estructura cumplirá las solicitaciones requeridas para la aplicación para la que se está diseñando antes de su construcción.

De esta manera el cálculo computacional permite verificar resultados de manera más sencilla y eficiente.

Consideraciones adicionales:

Al igual que durante la realización de cualquier trabajo, diseño o proyecto, en el presente TFM ha sido necesaria la utilización de diferentes herramientas y elementos para poder llegar a obtener los resultados expuestos en el mismo.

En cuanto al impacto ambiental del trabajo se puede concluir con que ha sido nulo. No se han empleado ni materiales peligrosos ni nocivos.

Lógicamente la plataforma del laboratorio, al igual que todos los equipos necesarios para realizar las experimentaciones, tienen un futuro impacto ambiental, debido a que cuando acabe su vida útil estos materiales deberán ser correctamente procesados.

Este impacto se puede considerar prácticamente nulo, debido a que el material está en perfecto estado para poder realizar más estudios y futuros proyectos, por lo que la vida útil de los instrumentos no se ha visto afectada.

En cuanto al aspecto económico, cabe destacar que los instrumentos empleados en el laboratorio han tenido un coste de adquisición, pero podrán ser empleados para numerosos proyectos.

Para realizar una estimación en cuanto al coste del presente trabajo, se considera que un Ingeniero en formación cobrará unos 20.000 €/año, realizando unas 1800 h/año, por lo que el salario aproximado es de 11,2 €/h.

En cuanto a las horas de dedicación del presente TFM, se pueden aproximar de la siguiente forma:

- Experimentación y comprensión de los ensayos experimentales: 15 horas.
- Desarrollo de las simulaciones en el software de cálculo SAP2000 para el calibrado de la plataforma: 85 horas.
- Desarrollo de las simulaciones para estudiar el comportamiento de la plataforma: 150 horas.
- Desarrollo del presente documento: 125 horas.

Por lo tanto, el número de horas empleadas para desarrollar este TFM ha sido de 375 horas, por lo que el coste final asciende a 4312,5 €.

Para finalizar, se puede concluir con que los objetivos marcados inicialmente para este TFM, se han cumplimentado.

Porque además de los objetivos técnicos del presente proyecto, también se ha desarrollado la capacidad de análisis y síntesis, mejora en la capacidad de organización y planificación de forma autónoma.

Al igual que el desarrollo del conocimiento adquirido anteriormente, todo ello con el objetivo de alcanzar las pautas fijadas del TFM y permitir una mejora continua y eficiencia en su elaboración.

Líneas de futuro:

Como líneas de futuro se pueden destacar entre otras las siguientes:

- La plataforma del laboratorio es configurable, es decir, se pueden modificar los apoyos centrales, por ejemplo, sustituirlos por apoyos fijos. También se podrían introducir masas puntuales repartidas de diferentes maneras sobre la misma, o incorporar amortiguadores o TMDs.

El trabajo futuro consistiría en comprobar que los resultados registrados experimentalmente coinciden con los obtenidos mediante el software de simulación SAP2000.

- Otro punto importante a destacar sería el realizar de manera experimental los tránsitos grupales y los flujos peatonales simulados, para comprobar que coinciden con las estimaciones del software
- Por otro lado, se podría realizar cualquiera de las simulaciones del presente TFM, pero utilizando otro software de cálculo de estructuras.

Como por ejemplo “CsiBridge”, un software de cálculo de estructuras especializado en puentes, para poder conocer así sus ventajas y limitaciones.

En el presente trabajo en el Anexo “3. Comprobación resultados mediante el software de cálculo “CsiBridge”, se presenta una pequeña introducción al mismo y la forma de importar archivos de SAP2000 para comparar los resultados obtenidos entre ambos softwares.

- También sería importante conseguir reproducir el efecto de la masa móvil de un peatón al caminar sobre la plataforma, a pesar de que este parámetro se ha obviado durante este TFM debido a la limitación del software de simulación, en la realidad afecta a la respuesta de la misma y, por lo tanto, sería importante poder cuantificarlo.

BIBLIOGRAFÍA:

- [1]-L.A. Polo, "Modelado, calibración y simulación de una plataforma multiconfigurable y transitable," TFG Grado Ing. Mec. Eii-Uva, 2021
- [2]- "Propiedades de la madera laminada". www.mosser.at (accessed Abril 29.2022)
- [3]- "Plantillas Bluetooth Loadsol". <https://www.novel.de/products/loadsol/> (accessed Abril 26.2022)
- [4]-"Tamaño de las pisadas de un peatón medio https://www.researchgate.net/publication/257896383_Modelling_the_Vertical_Loads_Applied_by_Pedestrians_at_a_Range_of_Walking_Velocities/figures?lo=1 (accessed Abril 28.2022)
- [5]- SETRA (2006). Technical guide - footbridges - Assessment of vibrational behavior of footbridges under pedestrian loading, Service d'Etudes Techniques des Routes et Auto - routes
- [6]- F. Álvarez-Touchard Vita, "Cargas móviles. Aplicación al dimensionado de un puente grúa de 30 m y 20 t", TFG Grado Ing. Mec. Eii-Uva, 2020.
- [7]- D. J. Ewins, "Modal Testing: Theory and Practice," Ed. RSP, 1995
- [8] -Prontuario básico de estructuras simples.
- [9] -C. W de Silva, "Vibration: Fundamentals and Practice," Ed. CRC, 2000
- [10]- Chowdhury, I; Dasgupta, S. P. Computation of Rayleigh damping coefficients for large systems; 2003.
- [11] - Chen, D. W, Wu, J. S. The exact solutions for the natural frequencies and mode shapes of non-uniform beams with multiple spring-mass systems. Journal Sound and Vibration; 2002. Volumen 25 (2). Páginas: 299-322.
- [12]- SAP2000®. Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of ThreeDimensional Structures; 200
- [13]- Cala Monroy, J. J; Villar Galindo, K. A. Predicción del comportamiento de puentes peatonales debido a la actividad humana usando modelos de computador. INGE CUC; 2017. Volumen 13 (2). Páginas: 42–52.
- [14]- Zivanovic, S; Pavic, A; Reynolds, P. Vibration serviceability of footbridges under human - induced excitation: a literature review. Journal Sound and Vibration; 2005. Volumen 279. Páginas: 1-74.

ANEXOS:

1. Simulaciones de verificación en "SAP2000". Caso pisadas cortas a 90 ppm:

- Los resultados obtenidos del ensayo experimental para el caso de pisadas cortas a 90 ppm se grafican en las ilustraciones 131 y 132, ajustados correctamente como se ha especificado en el epígrafe "6. Simulaciones de verificación realizadas en el software de cálculo "SAP2000":

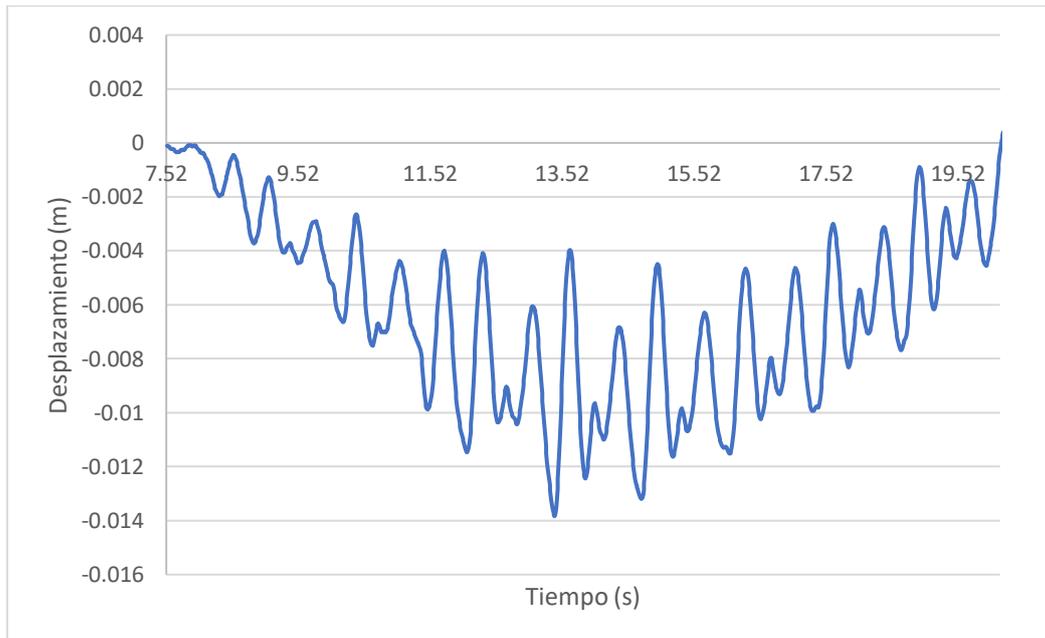


Ilustración 131. Desplazamiento punto central C ida sin referenciar temporalmente

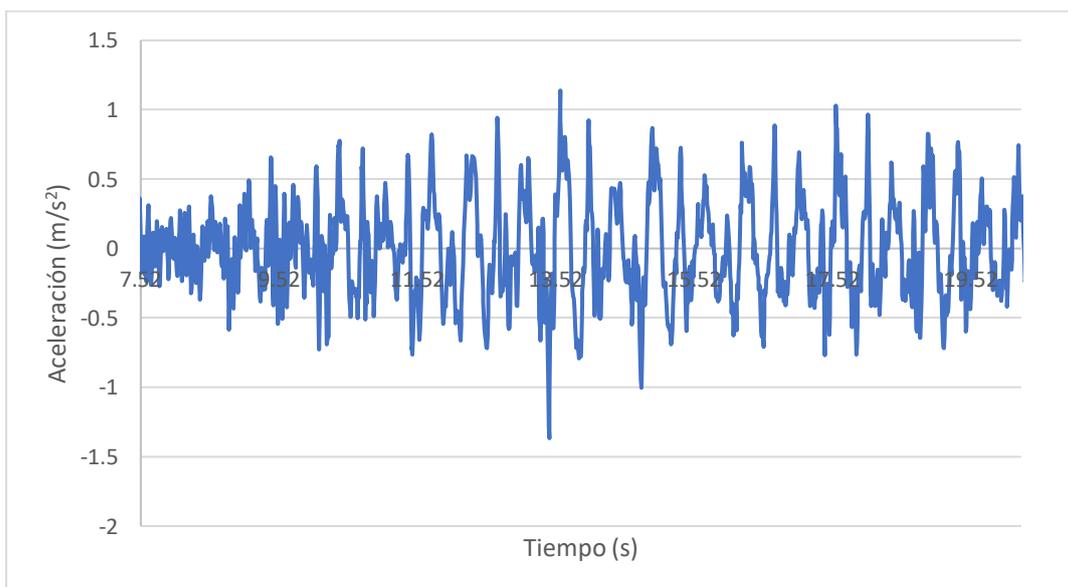


Ilustración 132. Aceleración punto central C ida sin referenciar temporalmente

El valor máximo del desplazamiento del punto central de la plataforma es de 0.01383508 m, es decir, 13,83 mm, que servirá como referencia para todas las simulaciones del caso de pisadas cortas a 90 ppm del caso de referencia T4.

El valor máximo de la aceleración del punto central de la plataforma es de $1,3681778 \text{ m/s}^2$ que servirá como referencia para todas las simulaciones del caso de pisadas cortas a 90 ppm del caso de referencia T4.

Los resultados experimentales registrados para este caso son los siguientes, se grafican en las ilustraciones 133 y 134:

Pisadas cortas a 90 ppm:

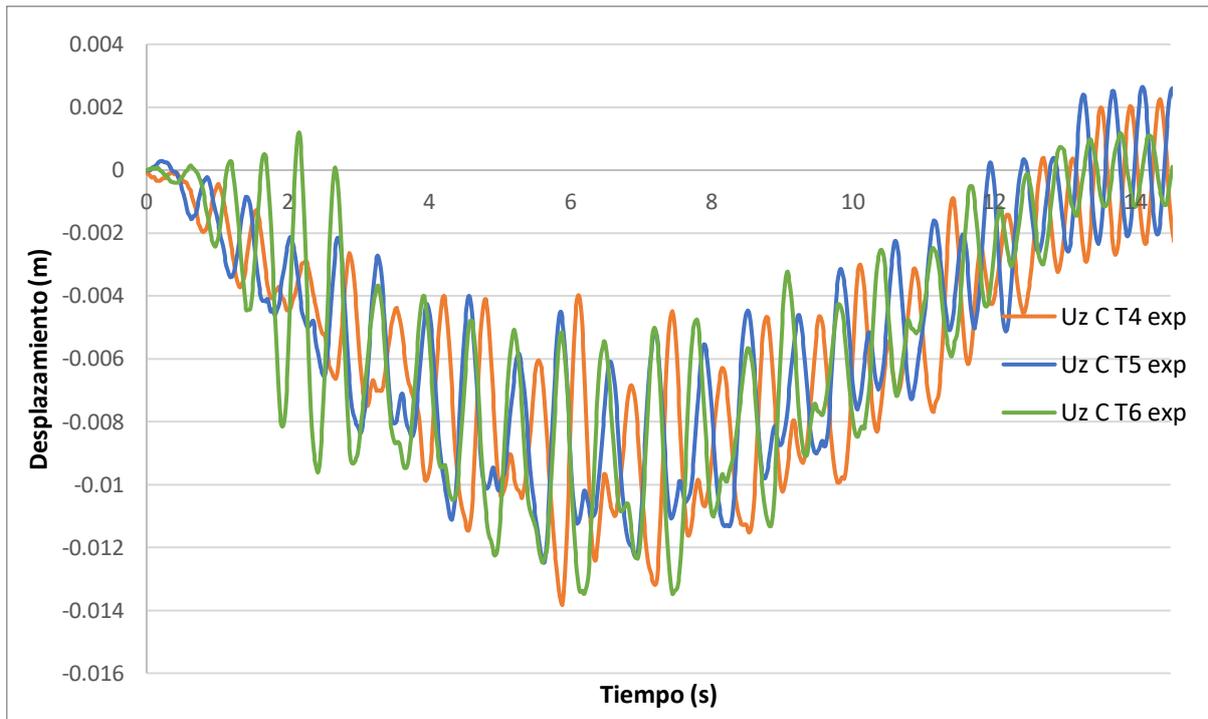


Ilustración 133. Comparativa desplazamiento vertical punto central experimental C T4 T5 T6

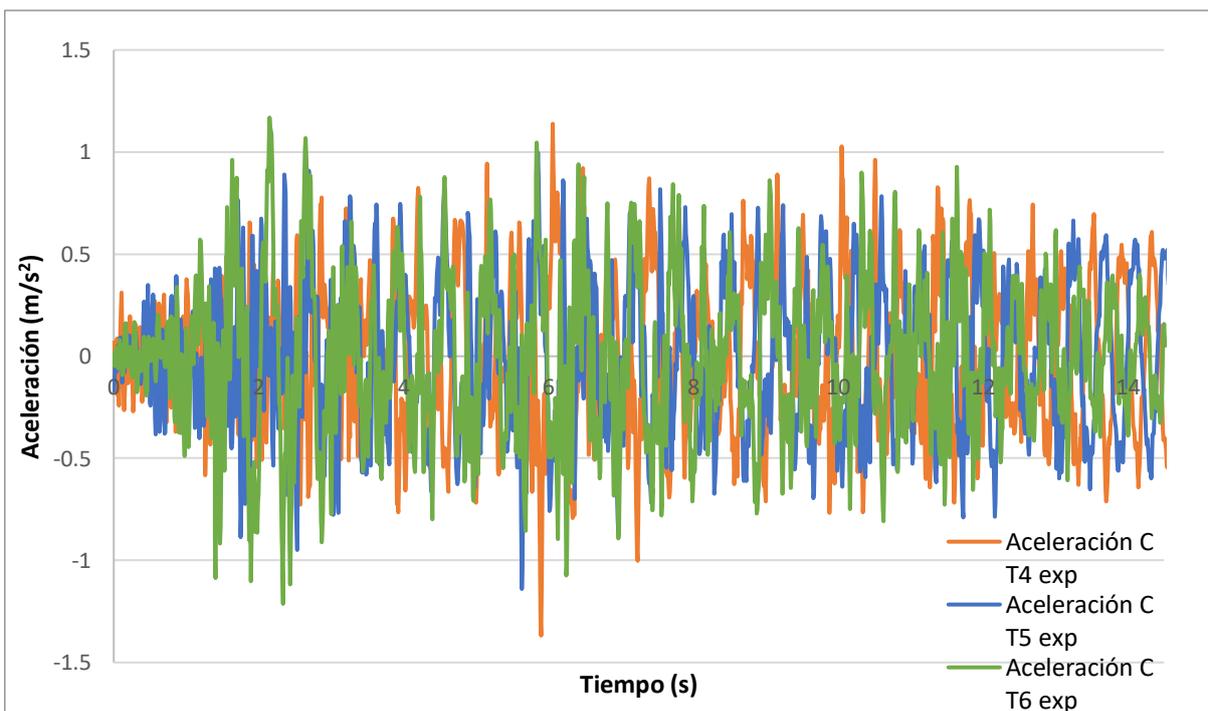


Ilustración 134. Comparativa aceleración vertical punto central experimental C T4 T5 T6

Ahora se realizarán las mismas simulaciones efectuadas en el epígrafe “6.2. Caso pisadas medianas a 90 ppm”, y se compararán con el caso experimental correspondiente, en este caso el caso T4.

Se realizan un total de 20 pasos, es decir, la plataforma se divide cada mitad en 10 partes, en vez de 9 como en el caso de pisadas medianas a 90 ppm.

Cambian los valores de las funciones de los pasos que registran las plantillas bluetooth, la duración de cada paso, la duración del tránsito y el momento de inicio de cada paso.

El procedimiento para efectuar las simulaciones en el software de cálculo SAP2000 es igual que el que se ha desarrollado para el caso de pisadas medianas a 90 ppm.

1.1. Caso “Shaker”:

La expresión de la fuerza ponderada tiene la forma de la ecuación 3 [5]:

$$F(t) = g \cdot [M + 0,4 \cdot (\sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t))] \cdot \sin\left[\frac{\pi \cdot t}{T_{total}}\right]$$

Siendo:

- g = gravedad= 9,81 m/s²
- M = masa del peatón= 90 kg (se selecciona este valor para todos los ensayos)
- t = periodo de muestreo = 0,01 Hz (igual para todos los ensayos)
- f = frecuencia = al ser 90 ppm son 1.5 Hz
- T_{total} = tiempo que se tarda en recorrer la pasarela (ensayo pisadas cortas a 90 ppm= 12.73 segundos).

Por lo tanto, solo cambia el valor del T_{total} , que corresponde con el tiempo que se tarda en recorrer la plataforma en el ensayo experimental del tránsito real peatonal con pisadas cortas a 90 ppm.

En este caso para el ensayo T4, es de 12.73 segundos, como se explicará en el epígrafe “11.1.5. Caso tránsito peatonal real”.

Se representan los valores del desplazamiento y la aceleración del punto central, se comparan con los obtenidos del tránsito peatonal real T4 y se grafican en las ilustraciones 135 y 136:

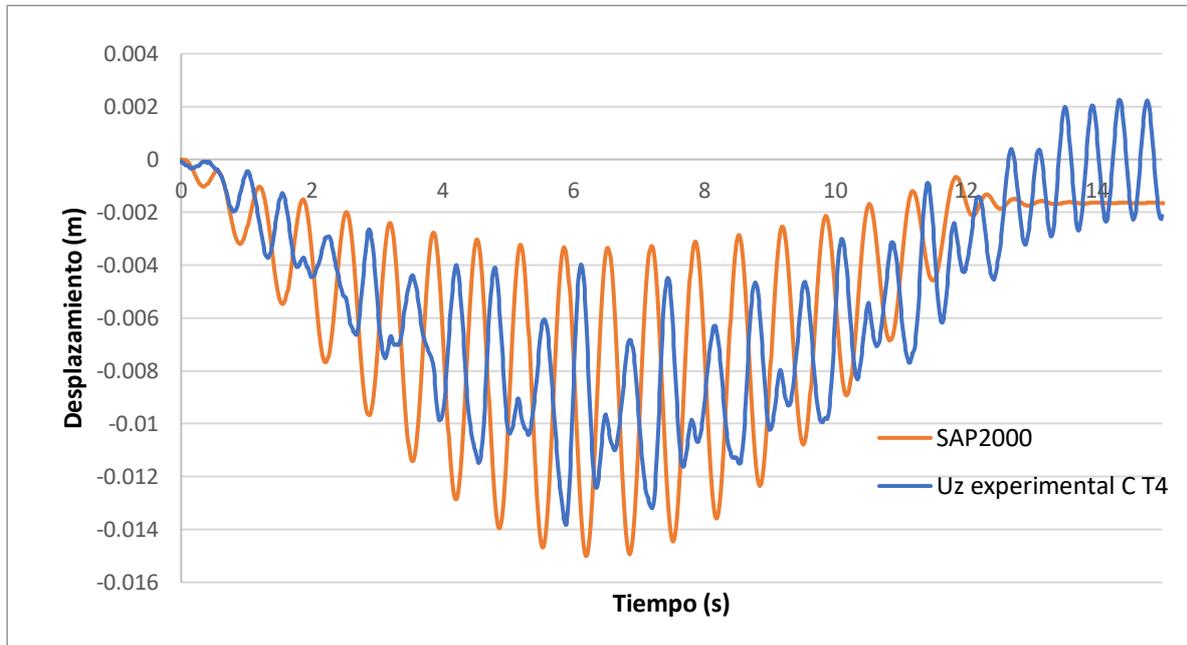


Ilustración 135. Comparativa desplazamiento punto central caso Shaker C vs T4 C

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.01501 m = 15.01 mm

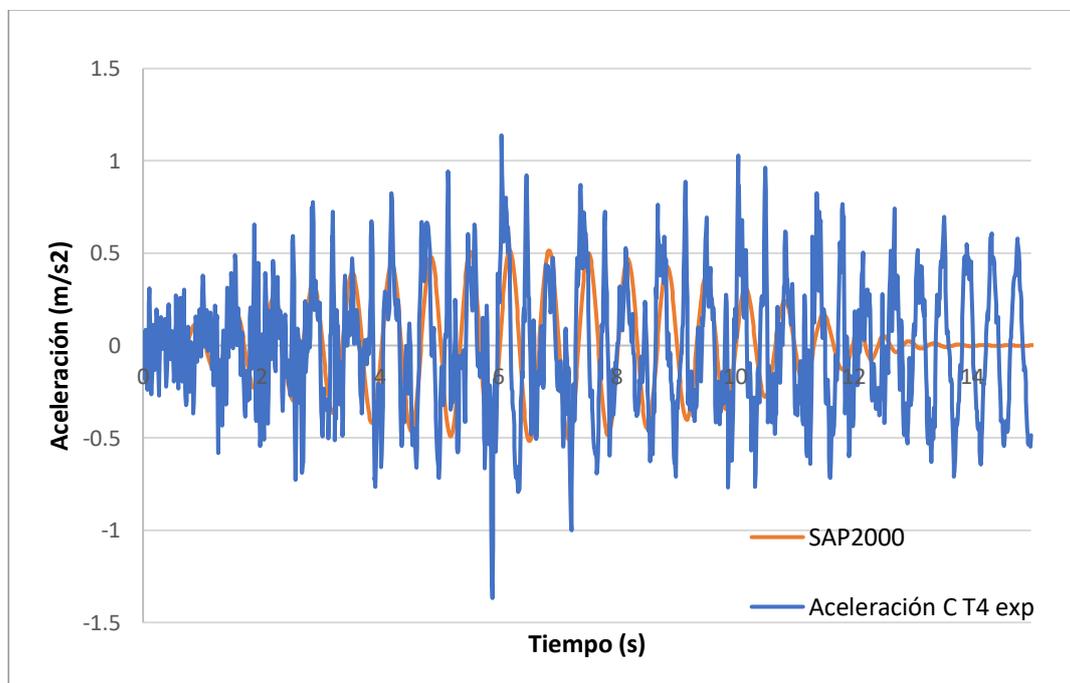


Ilustración 136. Comparativa aceleración punto central caso Shaker C vs T4 C

Valor máximo aceleración SAP2000 = 0.51753 m/s²

A la vista de los resultados, se está sobrecargando la plataforma, es decir, se está cargando más de lo que se debe.

Se debe multiplicar la función de fuerza del “Shaker” por el factor de escala que relaciona el valor del desplazamiento máximo experimental (13.83 mm → T4 C) con el valor máximo de cada simulación, en este caso de 15.01 mm:

$$F = F_{\text{shaker}} \cdot 13.83 / 15.01$$

Se obtienen los siguientes resultados siguiendo el mismo procedimiento anterior, y se grafican en las ilustraciones 137 y 138:

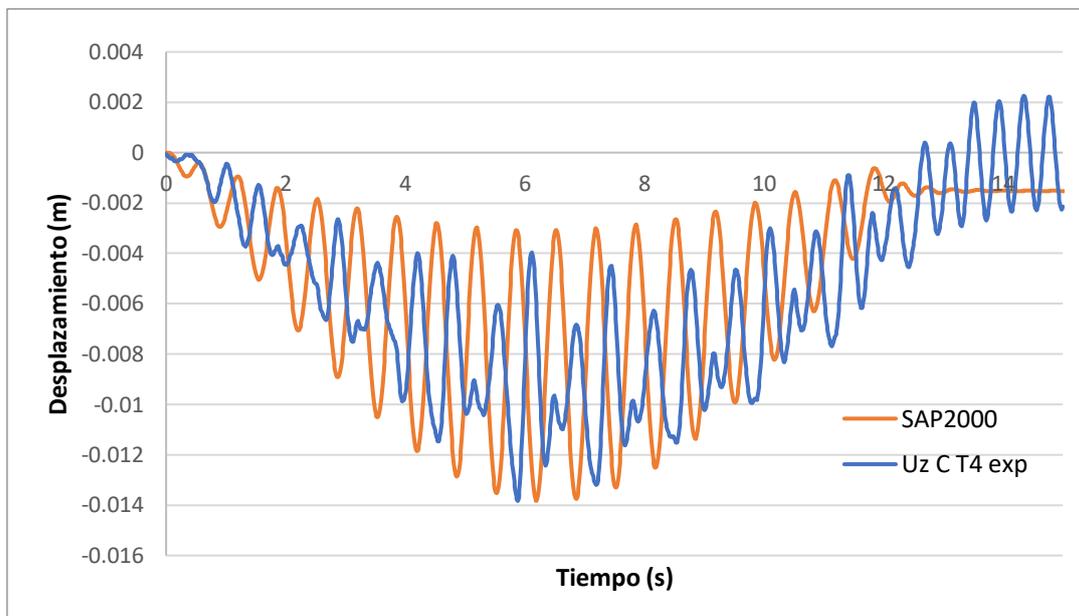


Ilustración 137. Comparativa desplazamiento punto central caso Shaker C vs T4 C ponderado

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.01383 m = 13.83 mm

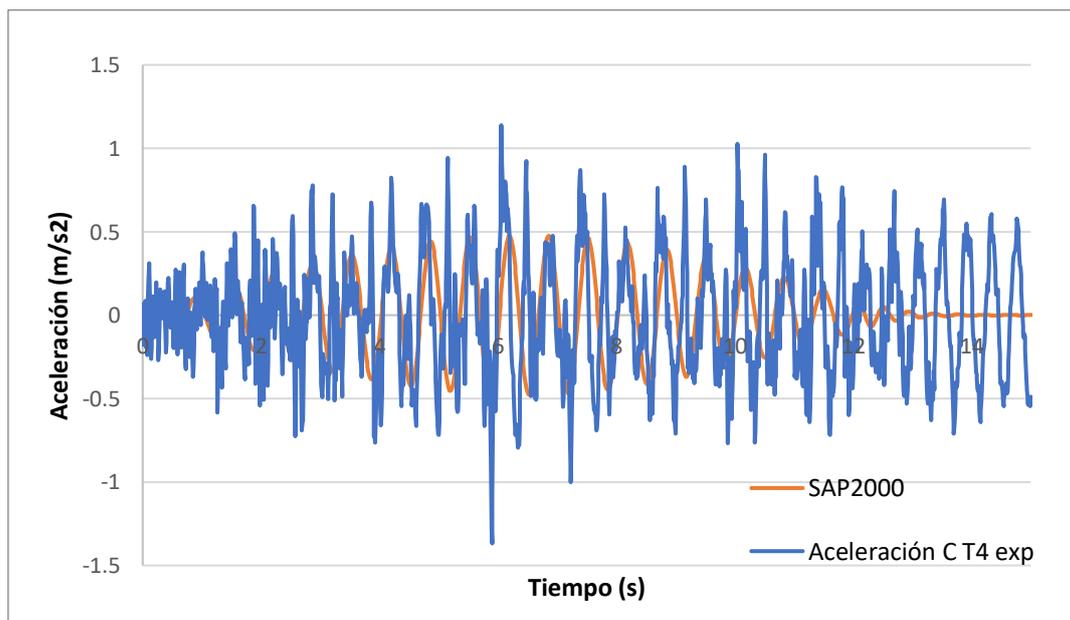


Ilustración 138. Comparativa aceleración punto central caso Shaker C vs T4 C ponderado

Valor máximo aceleración SAP2000 = 0.47685 m/s²

1.2. Caso deslizante:

En este caso, la función que define la fuerza del paso es diferente a la del caso de pisadas medianas, y se representa en la ilustración 139:

Debido a que se seleccionan los siguientes valores (que corresponden con los valores medios de tiempo y fuerza para las pisadas cortas en el tránsito real experimental T4):

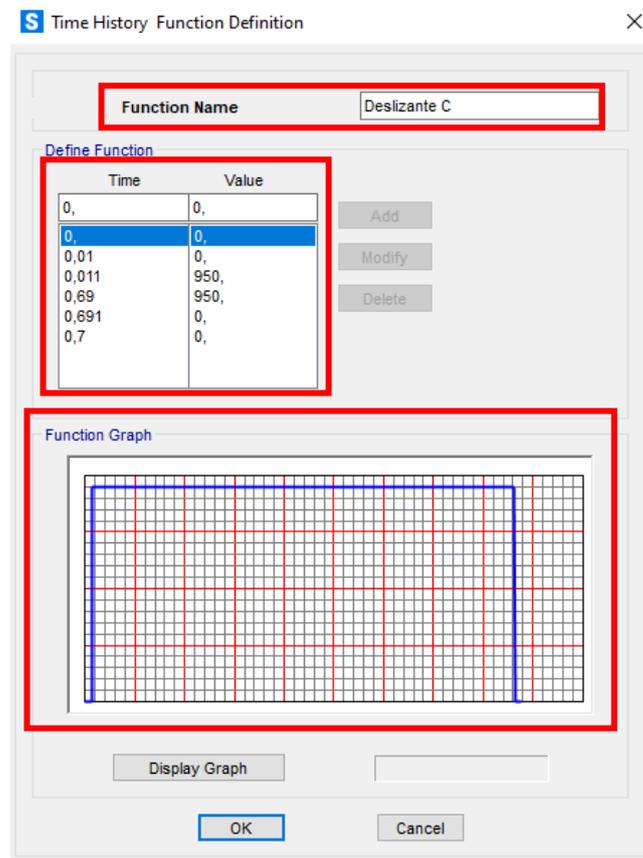


Ilustración 139. Función fuerza caso Deslizante C

Al cambiar la duración de cada paso, ahora a 0.70 segundos, cambia el valor del "arrival time" del "load case".

Haciéndolo coincidir con este valor para que no haya superposición entre las pisadas, simulando que en ningún instante de tiempo se encuentran ambos pies en la plataforma.

El “load case” definido es el de la ilustración 140:

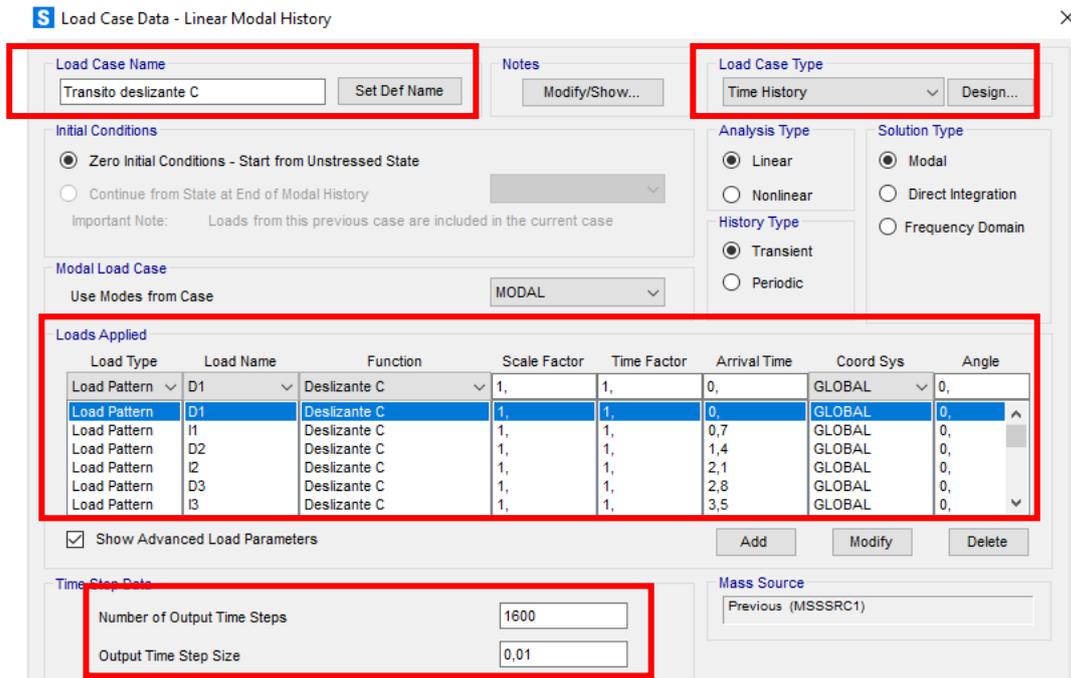


Ilustración 140. “Load case” caso Deslizante C

Se representan los valores del desplazamiento y la aceleración del punto central, se comparan con los obtenidos del tránsito peatonal real T4 y se grafican en las ilustraciones 141 y 142:

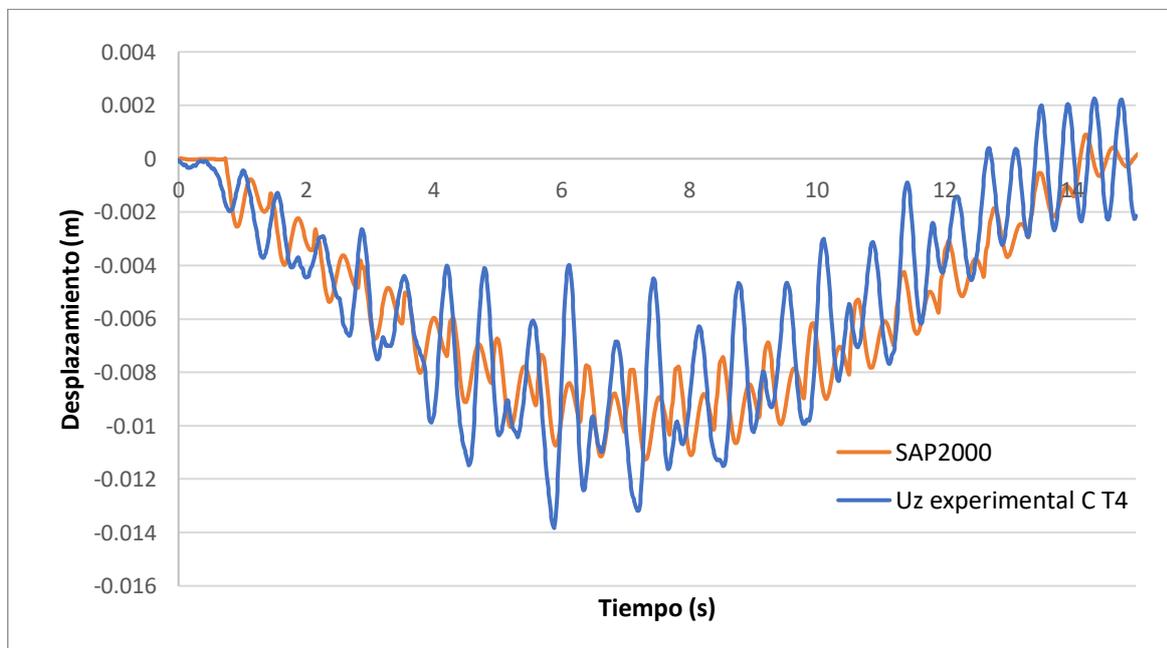


Ilustración 141. Comparativa desplazamiento punto central caso Deslizante C vs T4 C

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.01127 m = 11.27 mm

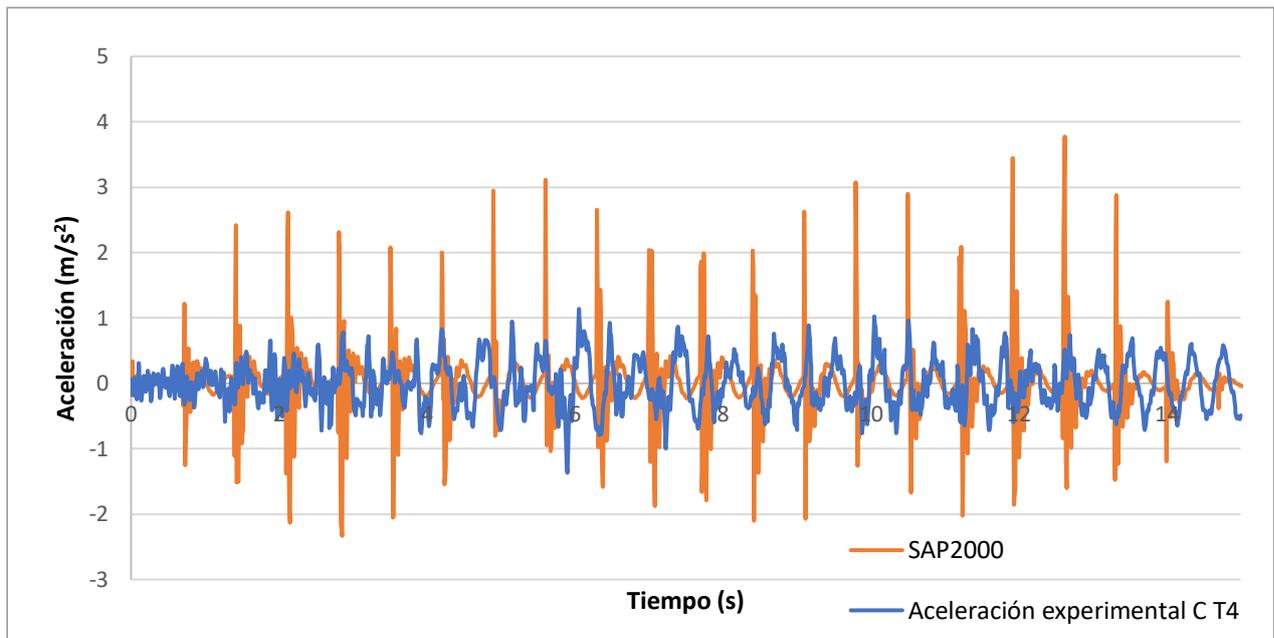


Ilustración 142. Comparativa aceleración punto central caso Deslizante C vs T4 C

Valor máximo aceleración SAP2000 = 3.77422 m/s^2

Nuevamente, a la vista de los resultados, se está subestimando la plataforma, es decir, se está cargando menos de lo que se debe.

Se ha seleccionado como valor medio de la fuerza de cada pisada 950 N. La fuerza pondera es:

$$F = 950 \text{ N} \cdot 13.83/11.27 = 1165.79 \text{ N}$$

Se obtienen los siguientes resultados siguiendo el mismo procedimiento anterior, y se grafican en las ilustraciones 143 y 144:

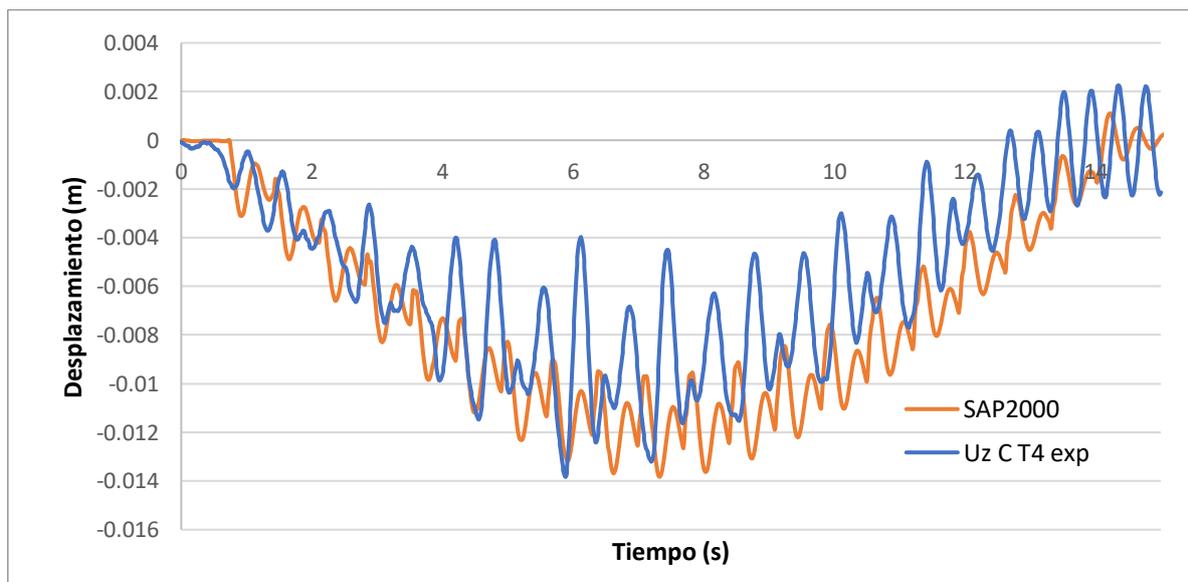


Ilustración 143. Comparativa desplazamiento punto central caso Deslizante C vs T4 C ponderado

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = $0.01383 \text{ m} = 13.83 \text{ mm}$

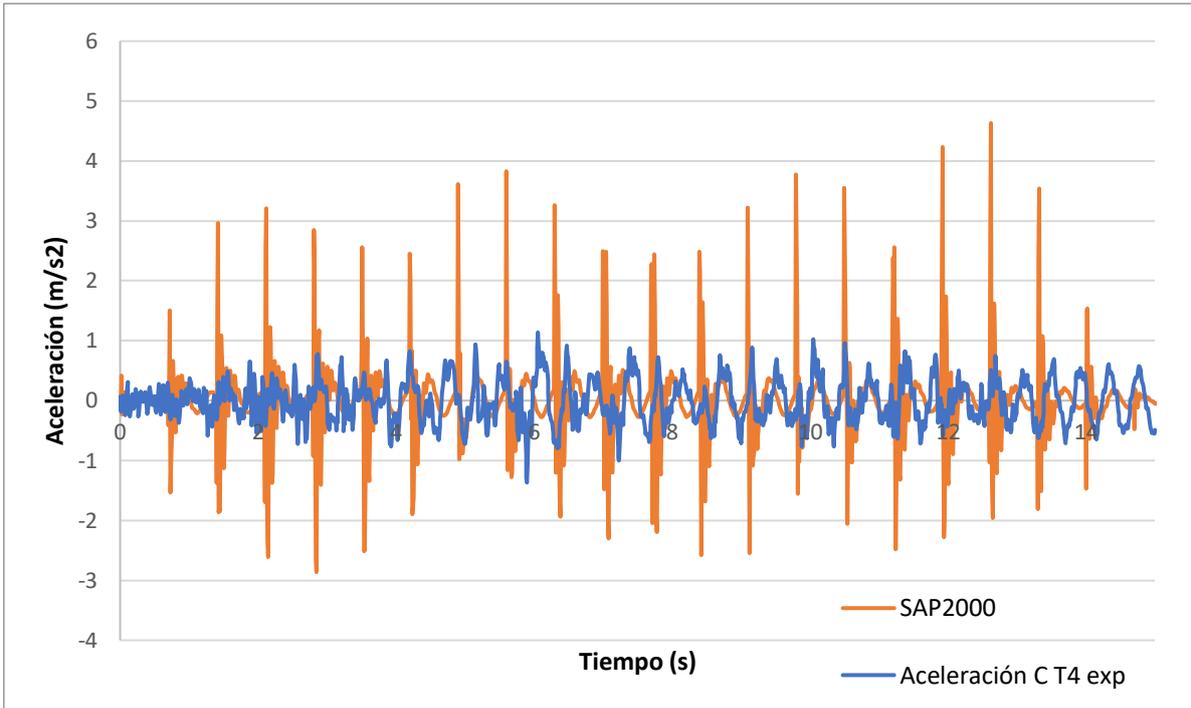


Ilustración 144. Comparativa aceleración punto central caso Deslizante C vs T4 C ponderado

Valor máximo aceleración SAP2000 = 4.63152 m/s^2

1.3. Caso pulsante:

Este caso es igual que el anterior, pero superponiendo los pasos, como en el caso pulsante para pisadas medianas, se modifica el valor del “arrival time” dejando constante la duración de la función de fuerzas del paso.

Seleccionando un solape de 0.15 s como en el caso pulsante para pisadas medianas, por lo tanto, el “load case” es igual, se muestra en la ilustración 145, pero con valores de “arrival time” diferentes, comenzando en 0.55 s (0.70 s – 0.15 s) desde la referencia que se encuentra en 0 s:

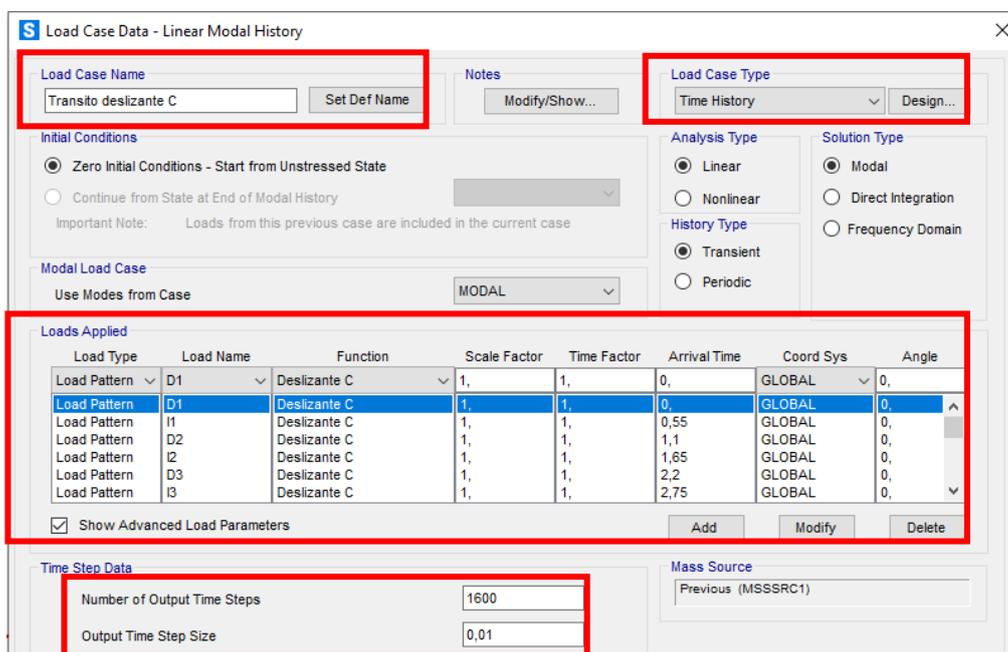


Ilustración 145. “Load case” caso pulsante C

Se representan los valores del desplazamiento y la aceleración del punto central, se comparan con los obtenidos del tránsito peatonal real T4 y se grafican en las ilustraciones 146 y 147:

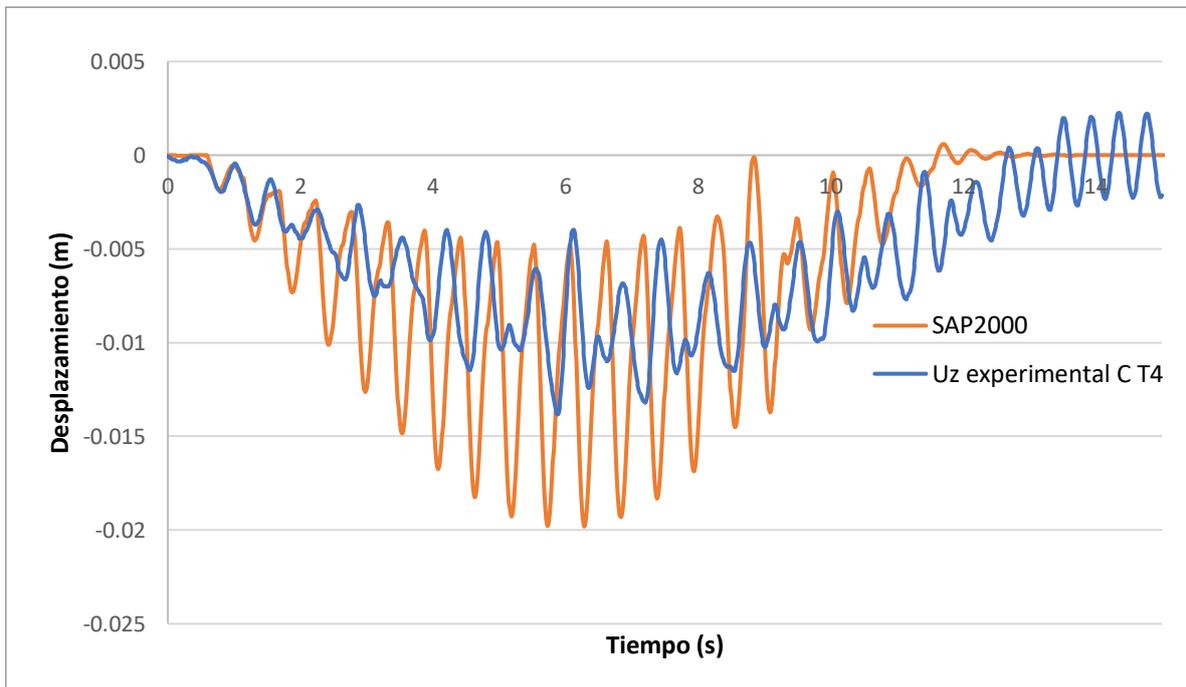


Ilustración 146. Comparativa desplazamiento punto central caso Pulsante C vs T4 C

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.01981 m = 19.81 mm

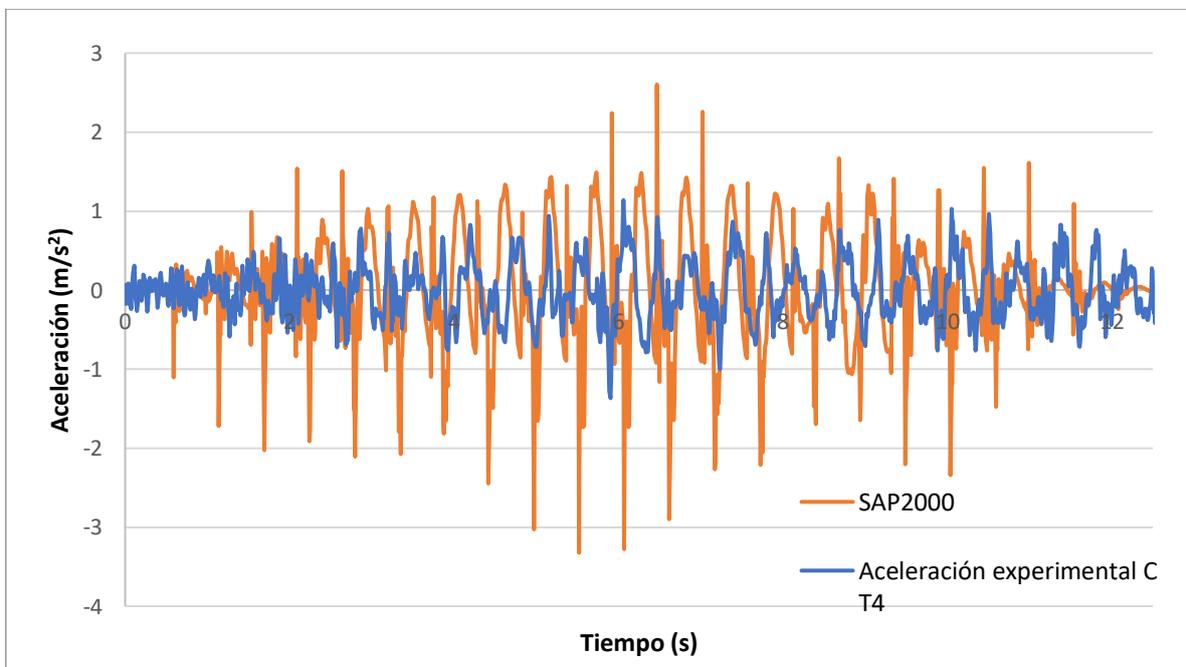


Ilustración 147. Comparativa aceleración punto central caso Pulsante C vs T4 C

Valor máximo aceleración SAP2000 = 3.32379 m/s²

En este caso se está sobrecargando la plataforma, el valor de la fuerza ponderada es de:

$$F = 950 \text{ N} \cdot 13.83/19.81 = 663.2256 \text{ N}$$

Se obtienen los siguientes resultados siguiendo el mismo procedimiento anterior, y se grafican en las ilustraciones 148 y 149:

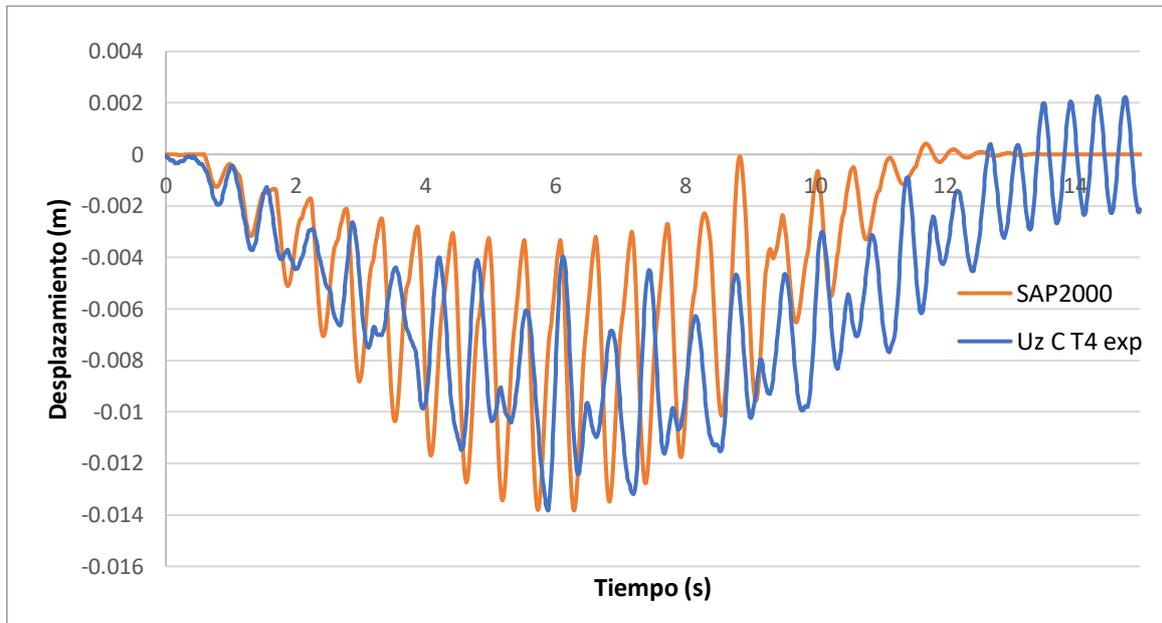


Ilustración 148. Comparativa desplazamiento punto central caso Pulsante C vs T4 C ponderado

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.01383 m = 13.83 mm

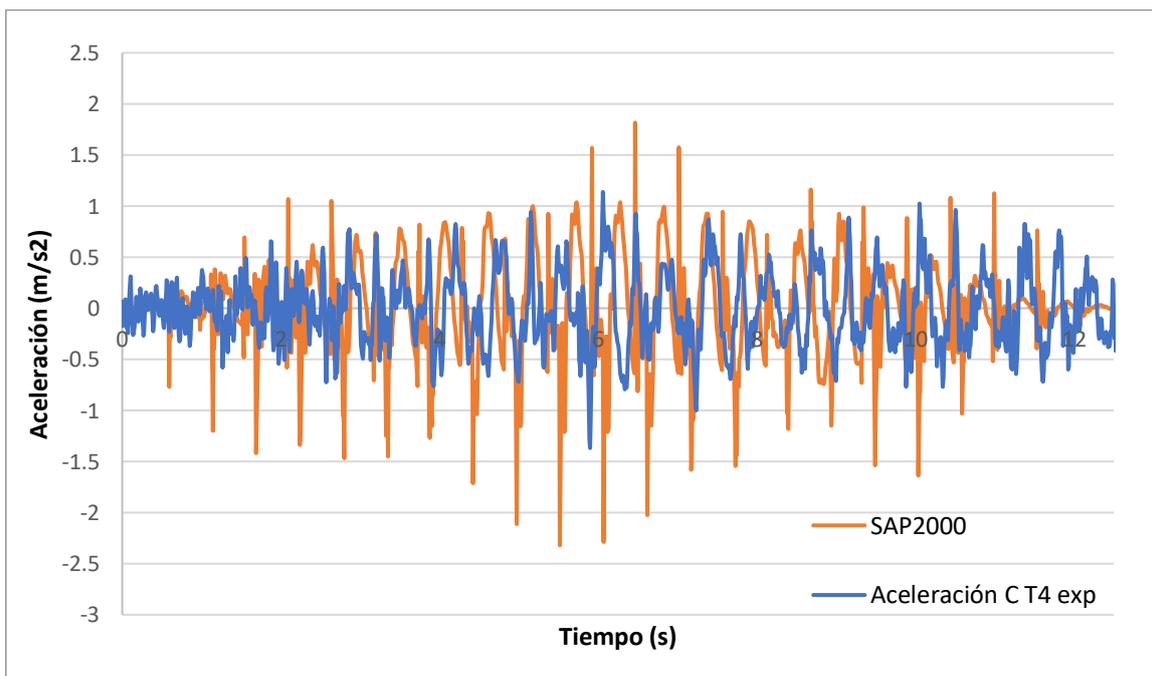


Ilustración 149. Comparativa aceleración punto central caso Pulsante C vs T4 C ponderado

Valor máximo aceleración SAP2000 = 2.32045 m/s²

1.4. Caso robot:

En este caso, la única diferencia con el caso de las pisadas medianas, es que, las funciones de las fuerzas de los pasos se importan de las pisadas registradas en el tránsito real experimental con pisadas cortas a 90 ppm T4.

Se seleccionan de nuevo “D6” y “I6”. El valor de las fuerzas, y el valor del “arrival time” es el correspondiente a estas, registradas durante la experimentación real a 90 ppm con pisadas cortas T4.

1.4.1. Caso robot 1 paso:

Se representan los valores del desplazamiento y la aceleración del punto central, se comparan con los obtenidos del tránsito peatonal real T4 y se grafican en las ilustraciones 150 y 151:

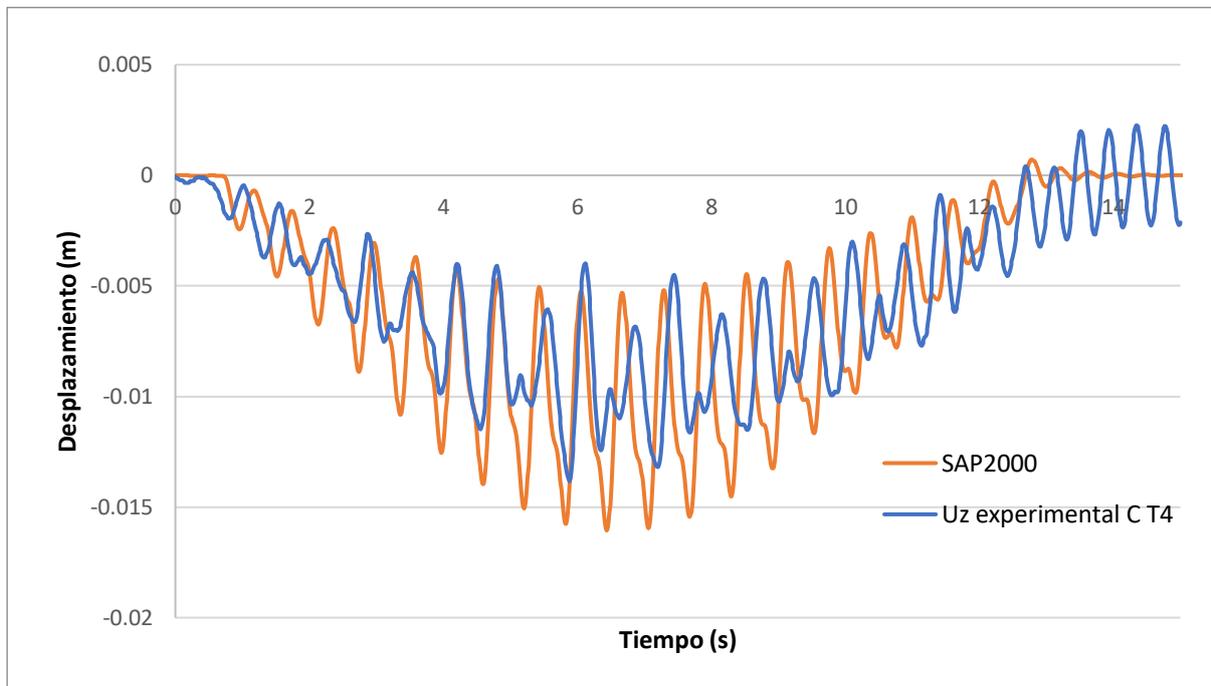


Ilustración 150. Comparativa desplazamiento punto central caso Robot 1 paso D6 C vs T4 C

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.01606 m = 16.06 mm

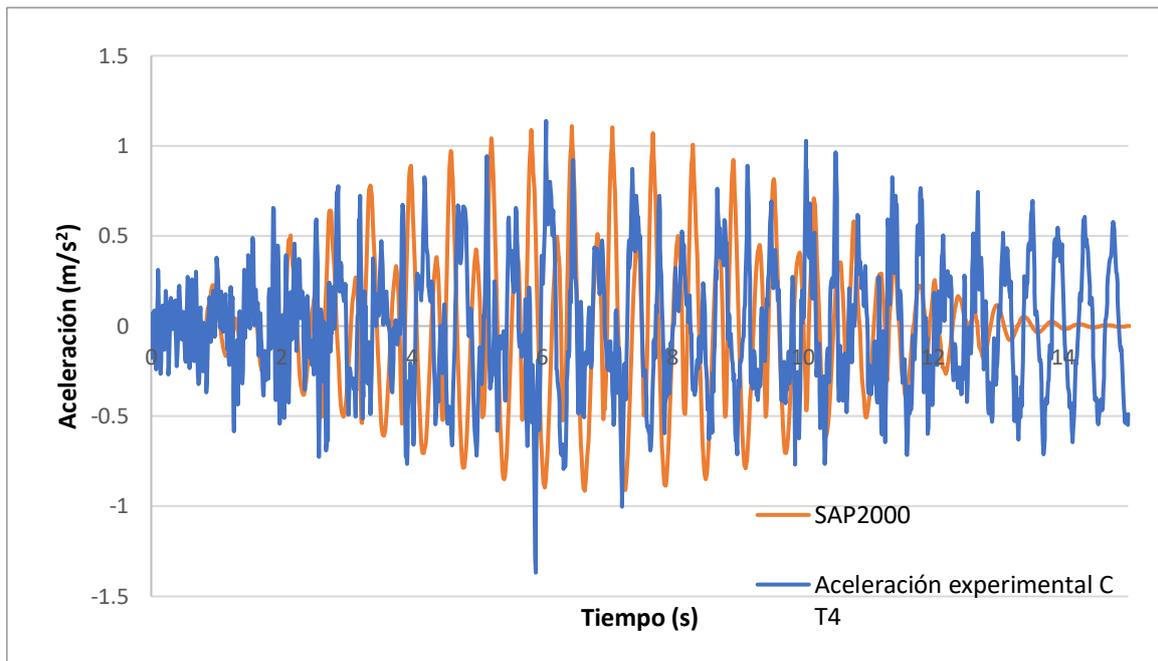


Ilustración 151. Comparativa aceleración punto central caso Robot 1 paso D6 C vs T4 C

Valor máximo aceleración SAP2000 = 1.10947 m/s²

En este caso la plataforma está sobrecargada, se debe multiplicar la función de fuerza del paso “D6” por el factor de escala:

$$F = D6 \cdot 13.83/16.06$$

Se obtienen los siguientes resultados siguiendo el mismo procedimiento anterior y se grafican en las ilustraciones 152 y 153:

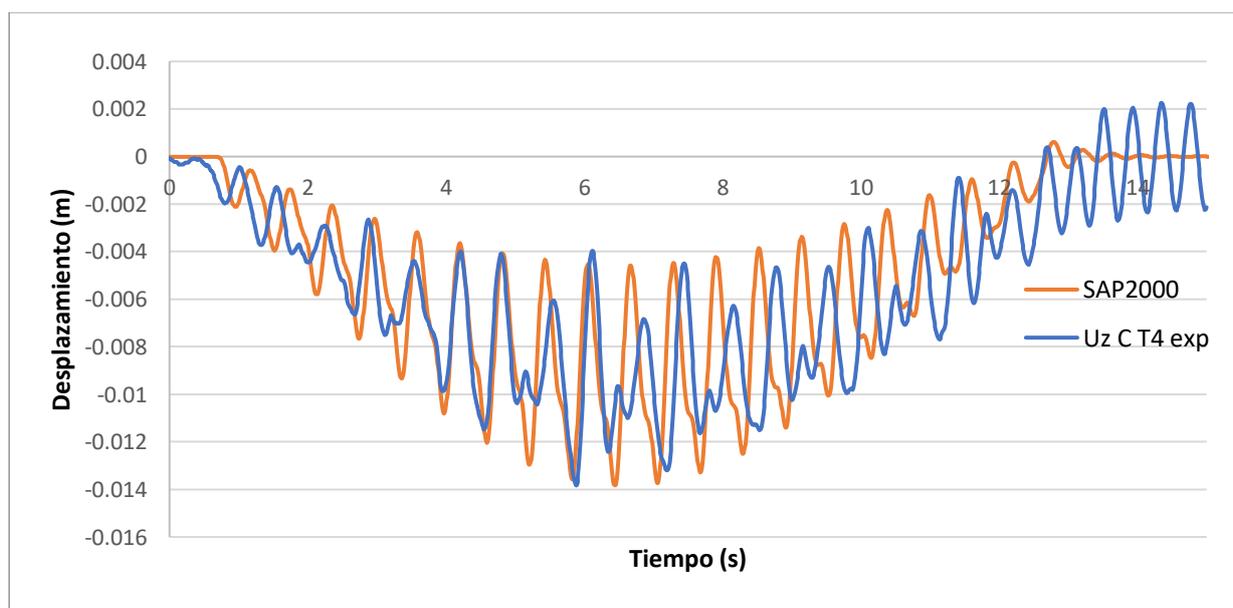


Ilustración 152. Comparativa desplazamiento punto central caso Robot 1 paso D6 C vs T4 C ponderado

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.01383 m = 13.83 mm

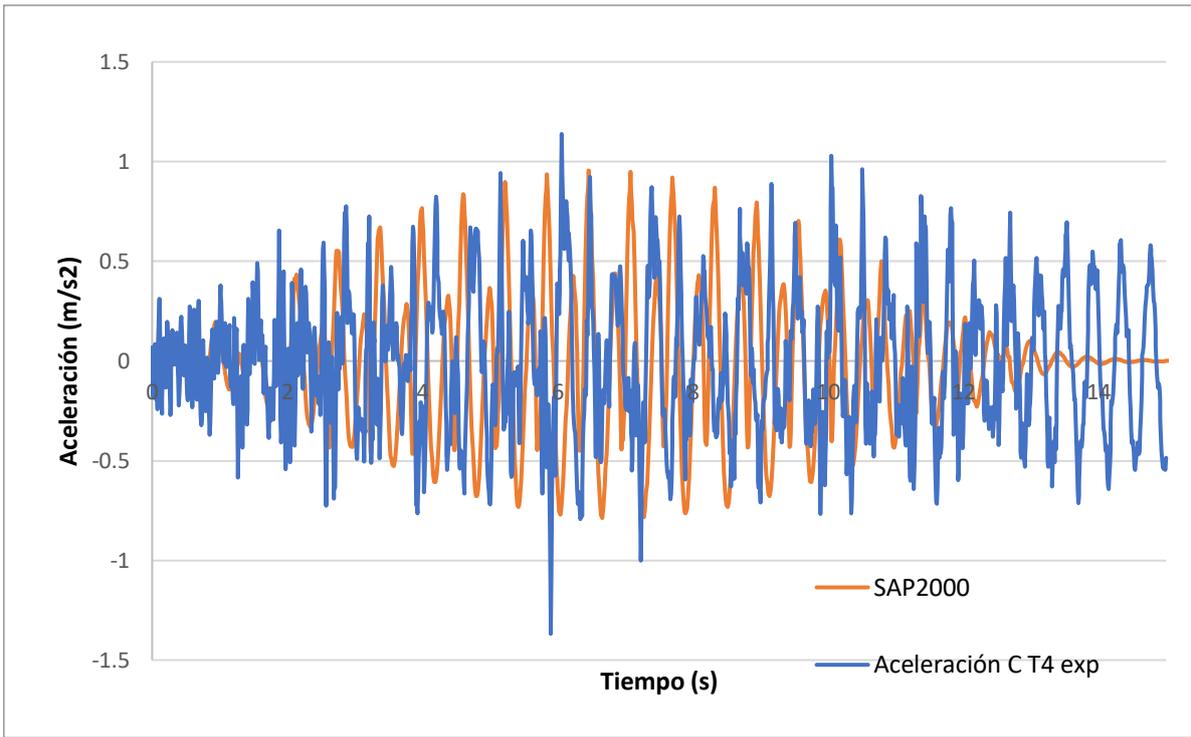


Ilustración 153. Comparativa aceleración pto central caso Robot 1 paso D6 C vs T4 C ponderado

Valor máximo aceleración SAP2000 = 0.95542 m/s^2

1.4.2. Caso robot 2 pasos:

Se representan los valores del desplazamiento y la aceleración del punto central, se comparan con los obtenidos del tránsito peatonal real T4 y se grafican en las ilustraciones 154 y 155:

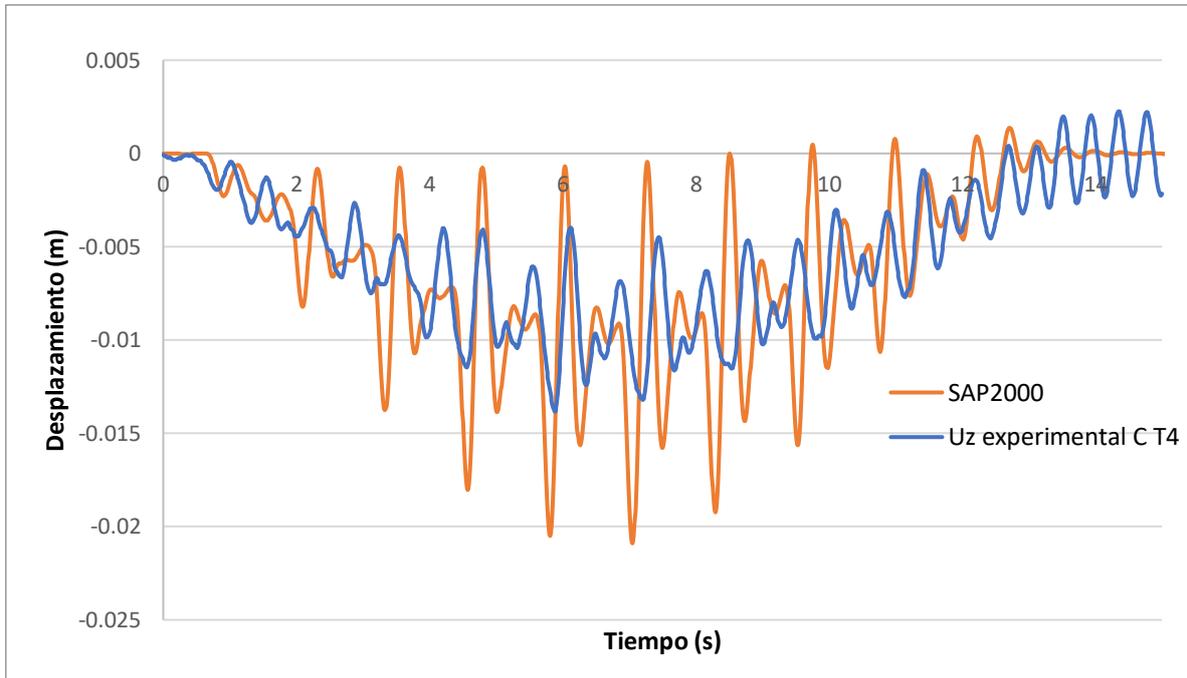


Ilustración 154. Comparativa desplazamiento punto central caso Robot 2 pasos D6 I6 C vs T4 C

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.0209 m = 20.9 mm

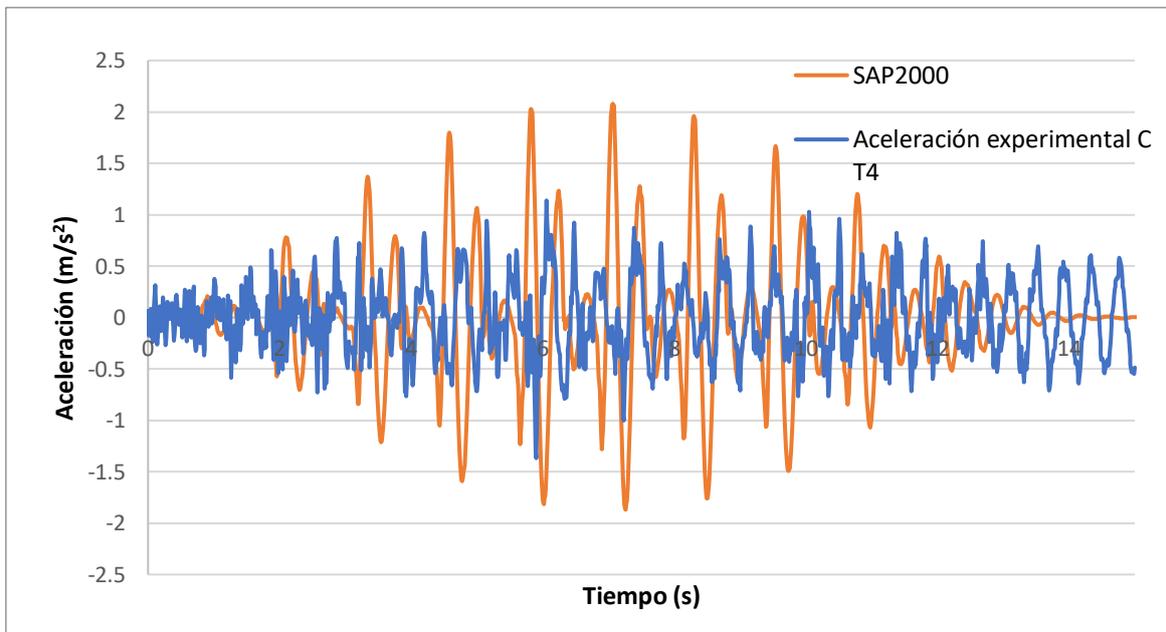


Ilustración 155. Comparativa aceleración punto central caso Robot 2 pasos D6 I6 C vs T4 C

Valor máximo aceleración SAP2000 = 2.07981 m/s²

En este caso la plataforma está sobrecargada, se debe multiplicar la función de fuerza de los pasos “D6” y “I6” por el factor de escala:

$$F = D6 \cdot 13.83/20.9$$

$$F = I6 \cdot 13.83/20.9$$

Se obtienen los siguientes resultados siguiendo el mismo procedimiento anterior y se grafican en las ilustraciones 156 y 157:

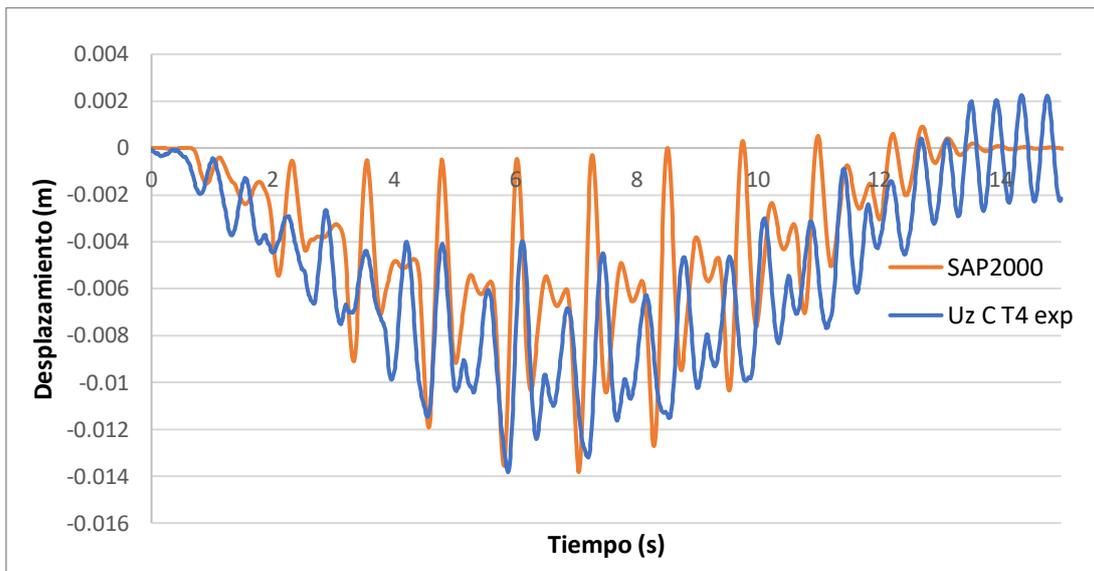


Ilustración 156. Comparativa desplazamiento punto central caso Robot 2 pasos D6 I6 C vs T4 C ponderado

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0,01383 m = 13,83 mm

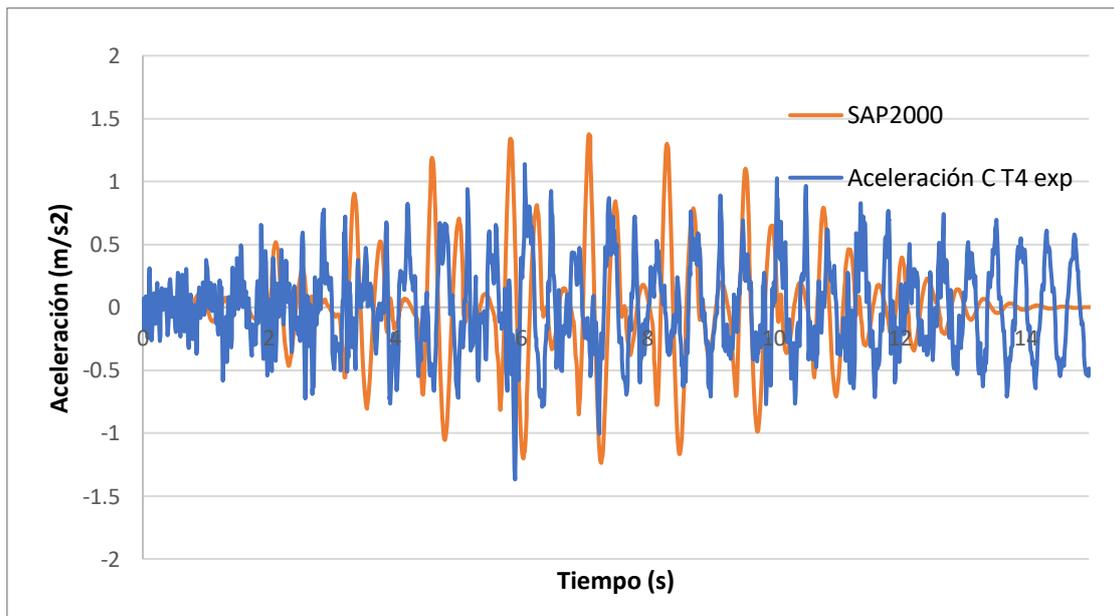


Ilustración 157. Comparativa aceleración pto central caso Robot 2 p D6 I6 C vs T4 C ponderado

Valor máximo aceleración SAP2000 = 1,37626 m/s²

1.5. Caso tránsito peatonal real:

Los valores de las funciones de la fuerza de cada paso obtenidos mediante las plantillas bluetooth durante el ensayo experimental son los representados en la ilustración 158:

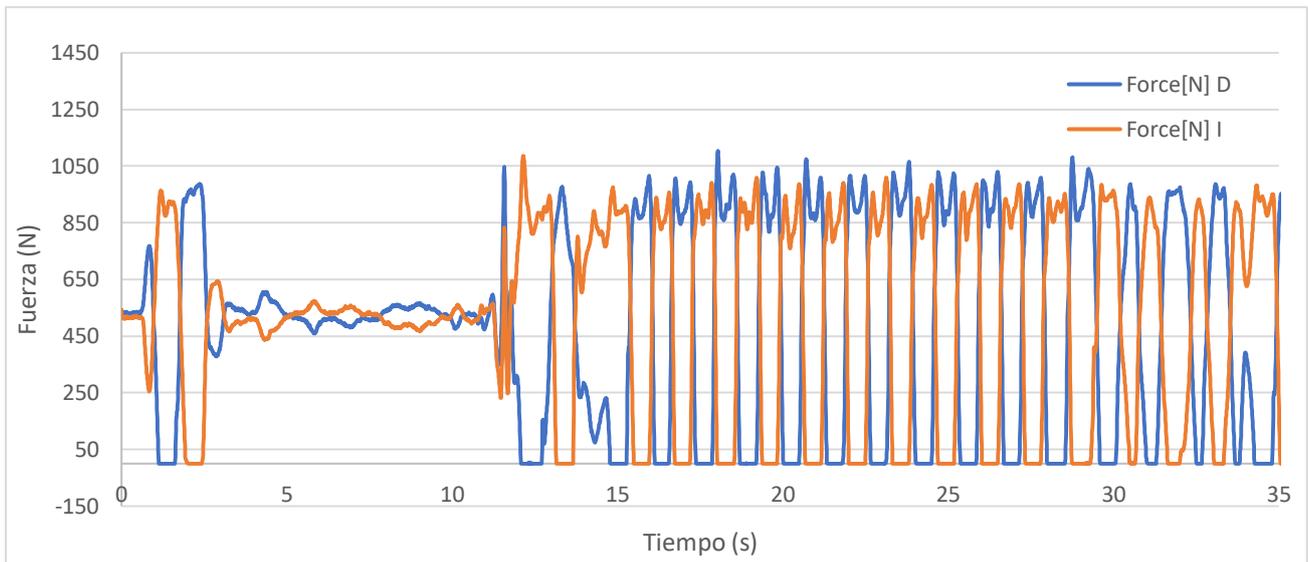


Ilustración 158. Fuerza Pisadas experimentales C 90 ppm T4 sin referenciar

De nuevo se deben seleccionar solo las pisadas del tránsito peatonal experimental, en este caso 20 pasos, se muestra en la ilustración 159:

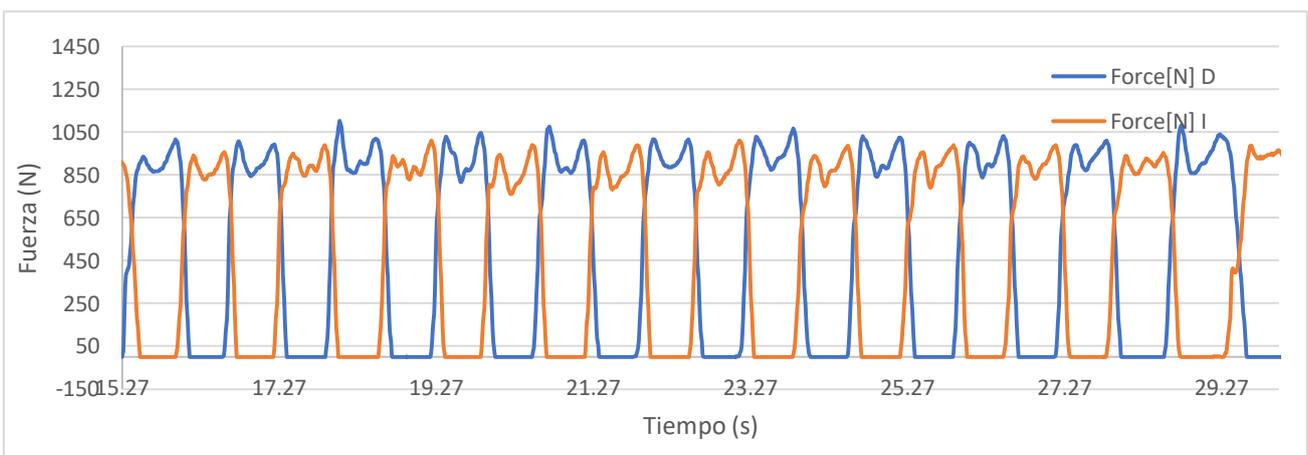


Ilustración 159. Fuerza Pisadas experimentales C 90 ppm T4 referenciada a la ida

Es decir, el tránsito real comienza en 15.27 s (valor de referencia del “arrival time”) y termina después de 20 pasos, en el segundo 28, es decir, el tránsito dura 12,73 s.

Nuevamente, para el cálculo de los valores de los “arrival time” de cada pisada, mostrado en la tabla 5, se aplica el mismo procedimiento que antes, teniendo en cuenta que el primer paso (D1) empieza en 15.27 s, y es por tanto la referencia:

Pasos	Tiempo inicio pisada (s)	Arrival time (s)
D1	15.27	0
D2	16.55	1.28
D3	17.86	2.59
D4	19.19	3.92
D5	20.49	5.22
D6	21.78	6.51
D7	23.09	7.82
D8	24.5	9.23
D9	25.85	10.58
D10	27.14	11.87
I1	15.95	0.68
I2	17.19	1.92
I3	18.53	3.26
I4	19.83	4.56
I5	21.16	5.89
I6	22.49	7.22
I7	23.81	8.54
I8	25.18	9.91
I9	26.49	11.22
I10	27.8	12.53

Tabla 5. Cálculo "arrival time" pisadas C 90 ppm

Se deben exportar los valores en ".txt" a Excel para poder graficarlos.

Aunque posteriormente se deben volver a exportar a ".txt" separando cada pisada para poder importarlo a SAP2000.

Nuevamente, se ejecuta el modelo y se representan los valores del desplazamiento y la aceleración del punto central, se comparan con los obtenidos del tránsito peatonal real T4 y se grafican en las ilustraciones 160 y 161:

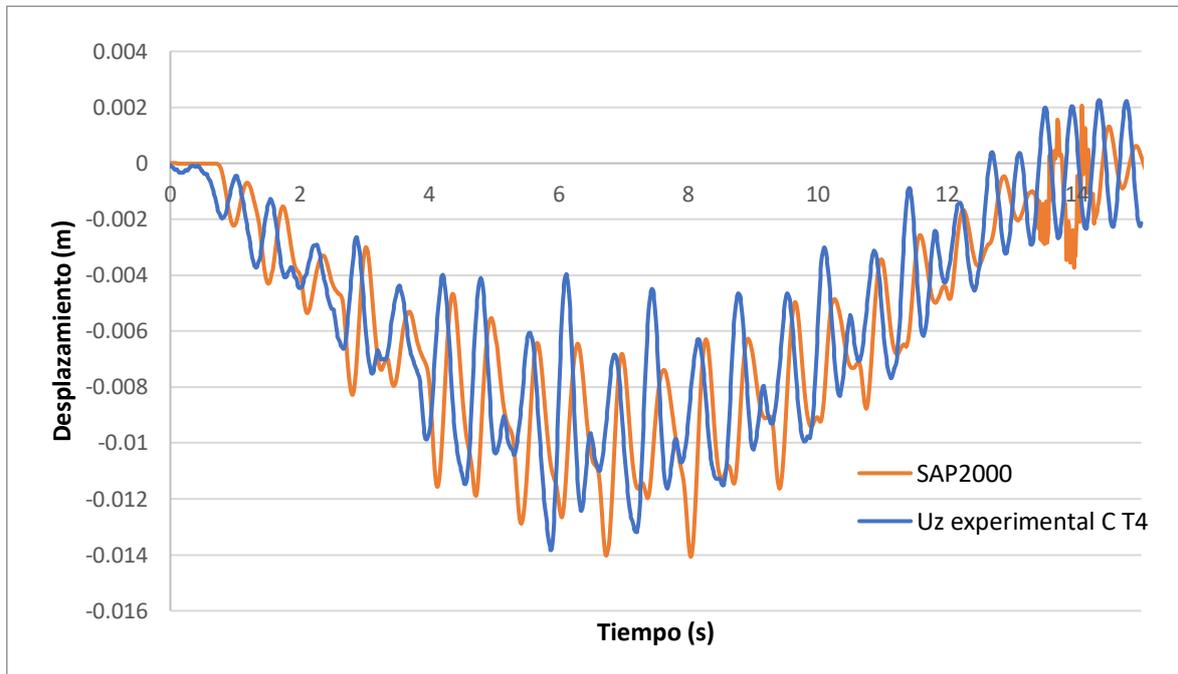


Ilustración 160. Comparativa desplazamiento punto central caso Tránsito peatonal real C vs T4 C

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.01407 m = 14.07 mm

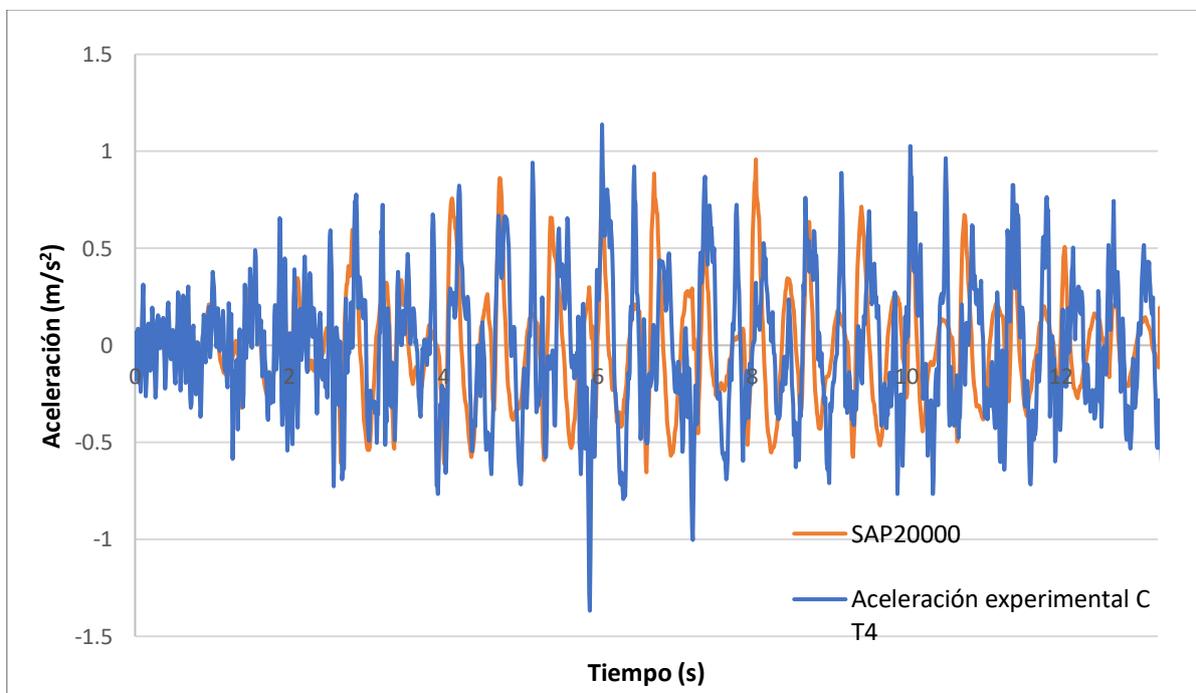


Ilustración 161. Comparativa desplazamiento punto central caso Tránsito peatonal real C vs T4 C

Valor máximo aceleración SAP2000 = 0.95765 m/s²

De nuevo, para estudiar y poder observar la influencia de cada pisada en el valor real del desplazamiento se deben “casar” en el tiempo los valores obtenidos experimentalmente por un lado de la tarjeta de adquisición de datos que proporciona el valor del desplazamiento y la aceleración del punto central, y por el otro, los valores de las plantillas bluetooth que registran la fuerza de cada paso, ambos valores se muestran en la ilustración 162:

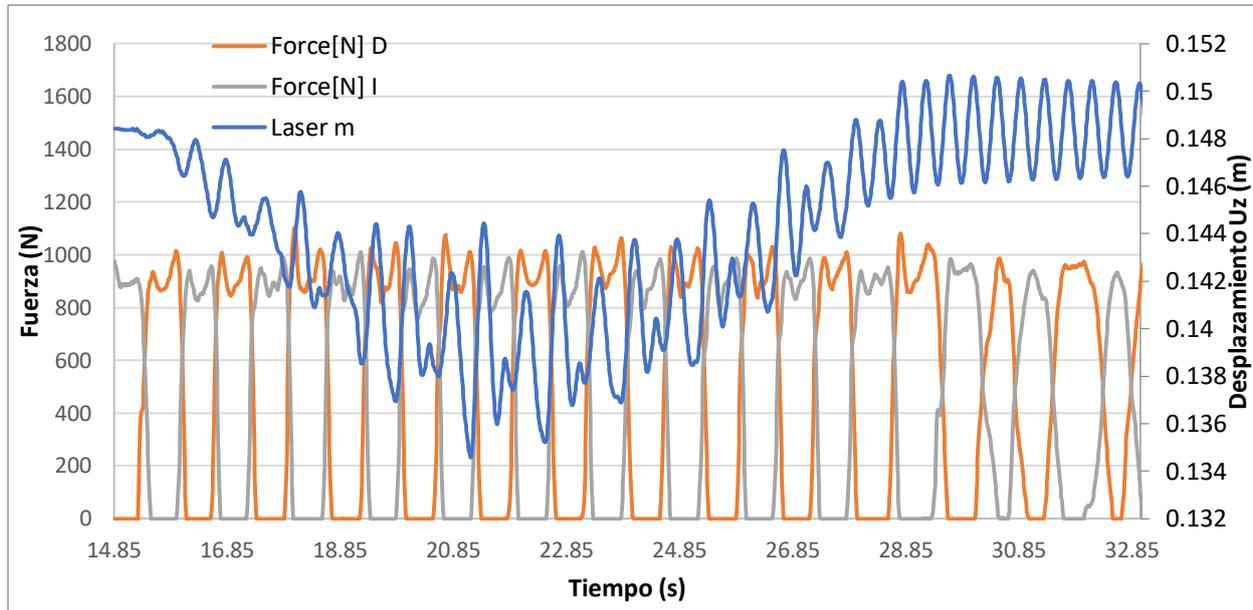


Ilustración 162. Fuerza de las pisadas casadas con desplazamiento experimental tránsito C 90 T4

De nuevo, se puede observar que al iniciarse el tránsito comienza a desplazarse verticalmente el punto central, haciéndose máximo cuando actúan los pasos centrales, comienza en 15.27 s y termina la ida en el segundo 28, el tránsito dura 12.73 s después de 20 pasos.

Como en el caso de pisadas medianas a 90 ppm, cuando el peatón abandona la plataforma, esta se queda vibrando como se puede observar en el desplazamiento del punto central de la misma cuando termina el tránsito.

Una vez realizadas todas las simulaciones, tanto para el caso de pisadas medianas y cortas a 90 ppm, se concluye que el modelo que se ha generado responde de manera real en relación con la plataforma experimental.

Ahora se pueden realizar diferentes tipos de simulaciones, que de manera experimental o no es posible o aún no se han realizado, y tomar como válidos los valores de la respuesta de la estructura al cambiar el caso de carga o el tipo de tránsito que se efectúa.

Conclusiones:

Una vez realizadas todas las simulaciones anteriores cabe destacar:

Aunque se han ajustado y ponderado con los factores de escala (relación entre desplazamientos máximos) los valores del desplazamiento del punto central de la plataforma, los valores de la aceleración máximos no coinciden. A pesar de esto, se encuentran dentro de un margen de valores aceptables.

Para los desplazamientos:

- Caso “shaker”: se ha ponderado por la fórmula de SETRA con el factor de escala 13.83/15.01.

- Caso deslizante: la fuerza que ajusta el valor del desplazamiento es 1000 N multiplicado por el facto de escala 13.83/11.27.
- Caso pulsante: se solapan 0.15 s y el factor de escala es de 13.83/19.81.
- Caso robot: el factor de escala para el caso 1 paso D6 es de 13.83/16.06 y para el caso 2 pasos D6 I6 es de 13.83/20.9.
- Caso tránsito real: en este caso no tiene sentido ponderarlo por su factor de escala, para ajustar el valor del desplazamiento al experimental, se debe modificar el valor del amortiguamiento del conjunto plataforma peatón seleccionado.

Se procede a seleccionar un valor para el amortiguamiento del conjunto plataforma peatón de 0.285 en vez de 0.12 como se había seleccionado anteriormente (para las simulaciones posteriores se selecciona el valor de 0.12 al ajustar mejor la envolvente de máximos y mínimos desplazamientos). De nuevo, al cambiar este valor también cambiarían los resultados obtenidos en las anteriores simulaciones que simplifican el tránsito peatonal.

Se obtienen los siguientes resultados y se grafican en las ilustraciones 163 y 164:

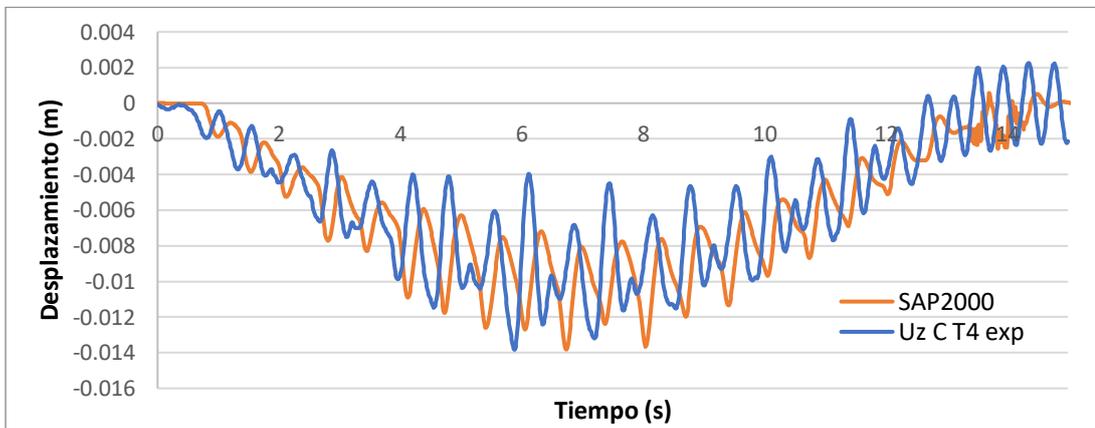


Ilustración 163. Comparativa desplazamiento punto central caso Tránsito peatonal real C vs T4 C ponderado

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.01382 m = 13.82 mm

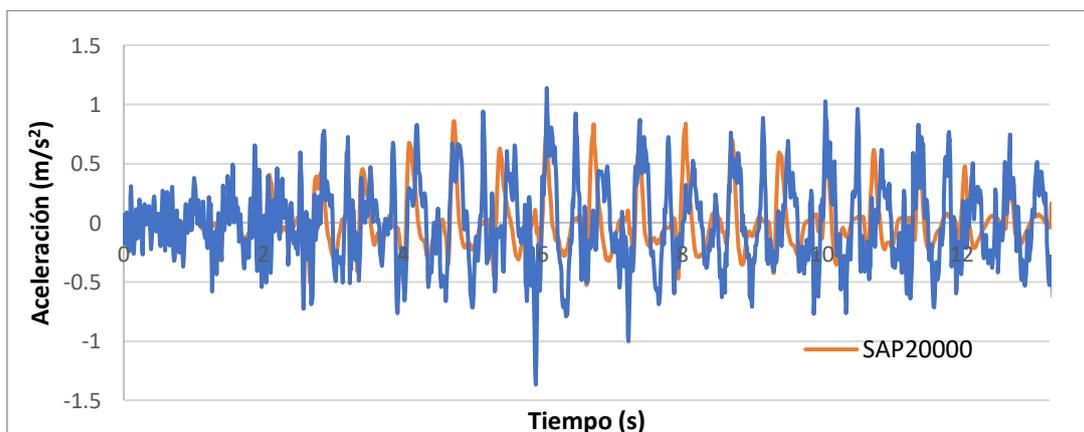


Ilustración 164. Comparativa aceleración punto central caso Tránsito peatonal real C vs T4 C ponderado

Valor máximo aceleración SAP2000 = 0.86073 m/s²

Como se puede observar el valor del desplazamiento es mucho más similar a la realidad y el valor de la aceleración sigue dentro de un rango de valores aceptables. Se puede concluir que el calibrado del modelo para el caso de pisadas cortas a 90 ppm es correcto.

2. Simulaciones de aplicación posteriores al calibrado. Caso pisadas cortas.

2.1. Tránsito real C pero con el peatón con el doble de peso:

Se procede de la misma forma que para el caso anterior de pisadas medianas con un peatón con el doble de peso, pero con el tamaño de pisadas cortas ("C").

Se representan los valores del desplazamiento y la aceleración del punto central y se grafican en las ilustraciones 165 y 166:

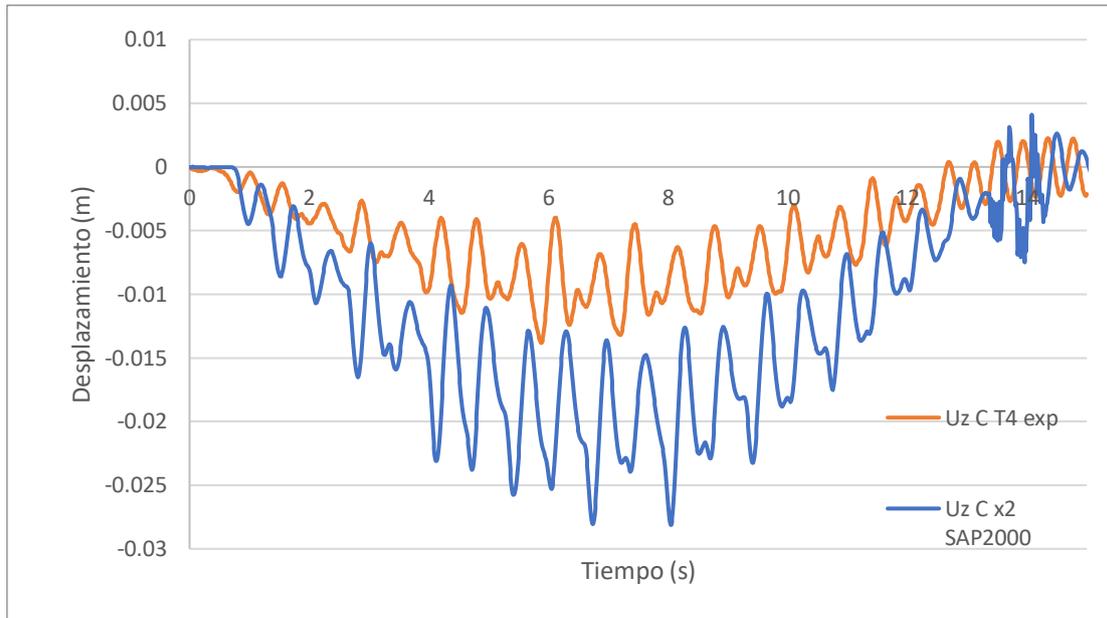


Ilustración 165. Desplazamiento punto central caso Tránsito real peatonal C T4 x 2 vs T4 C

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.02813 m = 28.13 mm → es el doble de valor, es decir, es lineal.

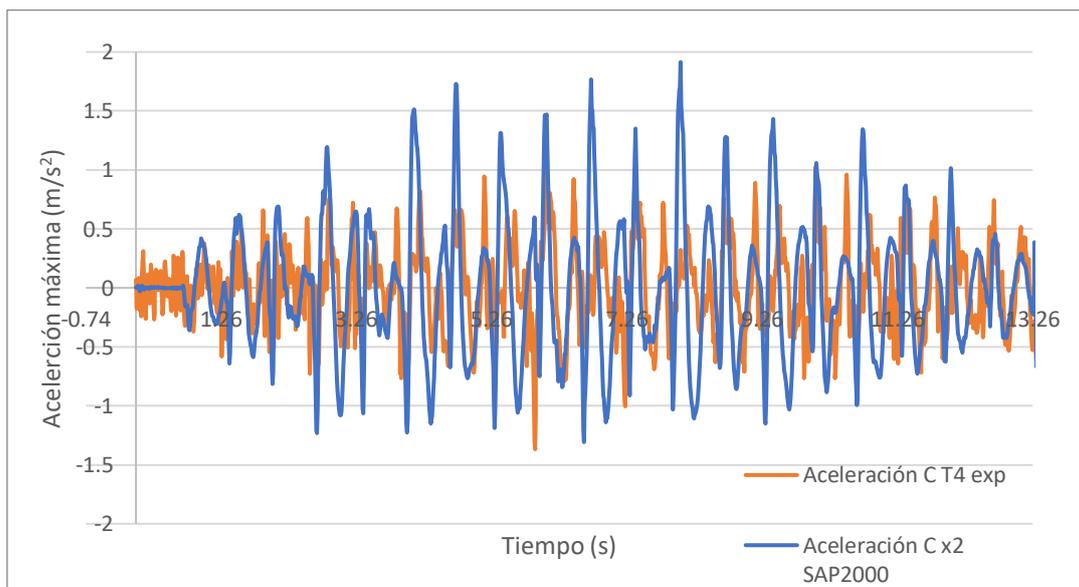


Ilustración 166. Aceleración punto central caso Tránsito real peatonal C T4 x 2 vs T4 C

Valor máximo aceleración SAP2000 = 1.91531 m/s²

2.2. Tránsito real C pero con el peatón con la mitad de peso:

Se procede de la misma forma que para el caso de pisadas medianas con un peatón con la mitad de peso, pero con el tamaño de pisadas cortas ("C").

Se representan los valores del desplazamiento y la aceleración del punto central y se grafican en las ilustraciones 167 y 168:

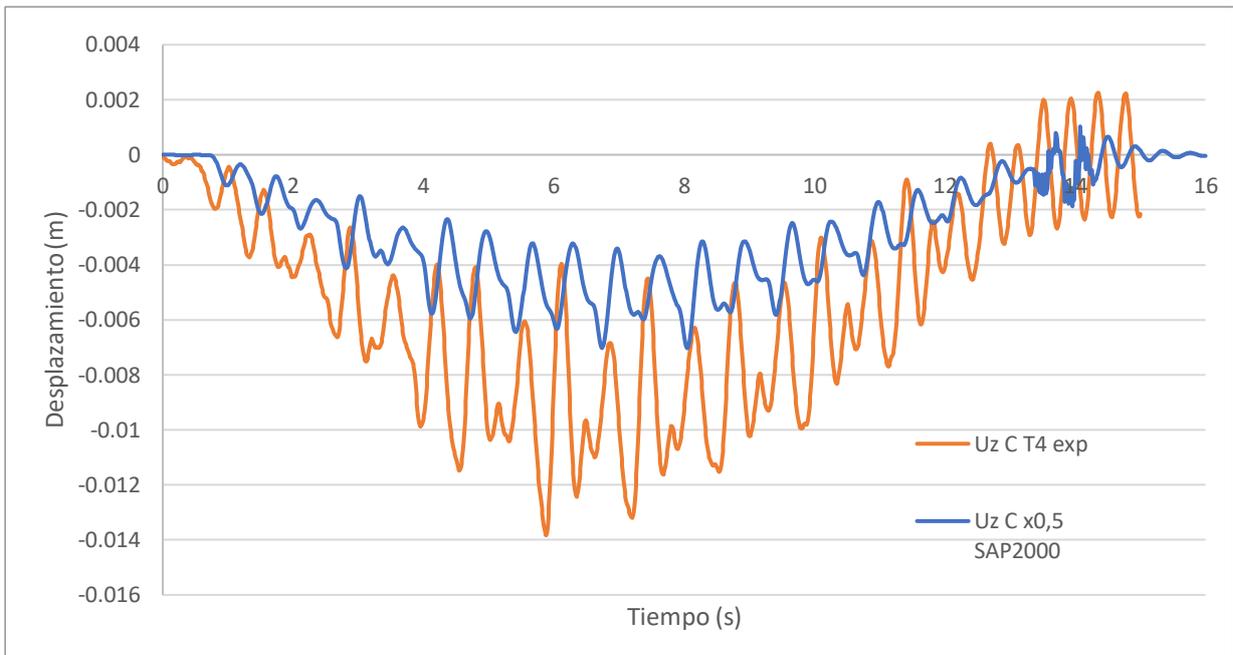


Ilustración 167. Desplazamiento punto central caso Tránsito real peatonal C T4 x 0,5 vs T4 C

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.00703 m = 7.03 mm → es la mitad de valor, es decir, es lineal.

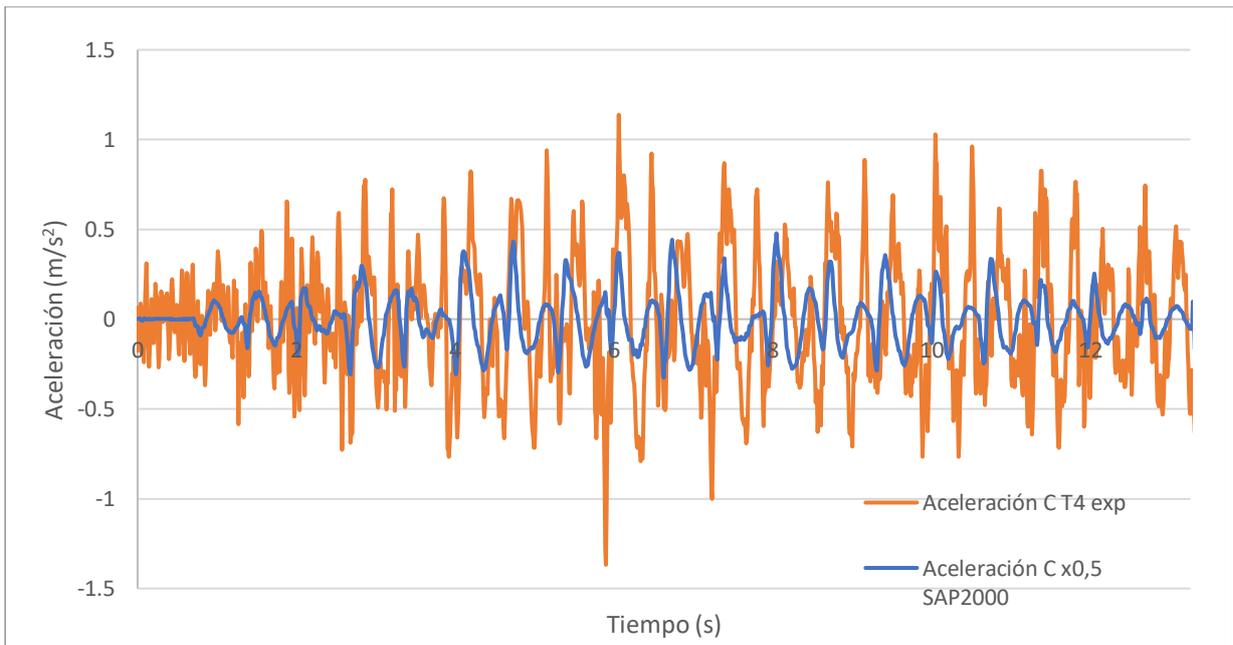


Ilustración 168. Aceleración punto central caso Tránsito real peatonal C T4 x 0,5 vs T4 C

Valor máximo aceleración SAP2000 = 0.47883 m/s²

2.3. Tránsito real C pero peatón caminado justo sobre el extremo lateral de la plataforma:

Se procede de la misma forma que para el caso anterior de pisadas medianas con un peatón caminando sobre el extremo del lateral de la plataforma, pero con el tamaño de pisadas cortas ("C").

Se representan los valores del desplazamiento y la aceleración del punto central y se grafican en las ilustraciones 169 y 170:

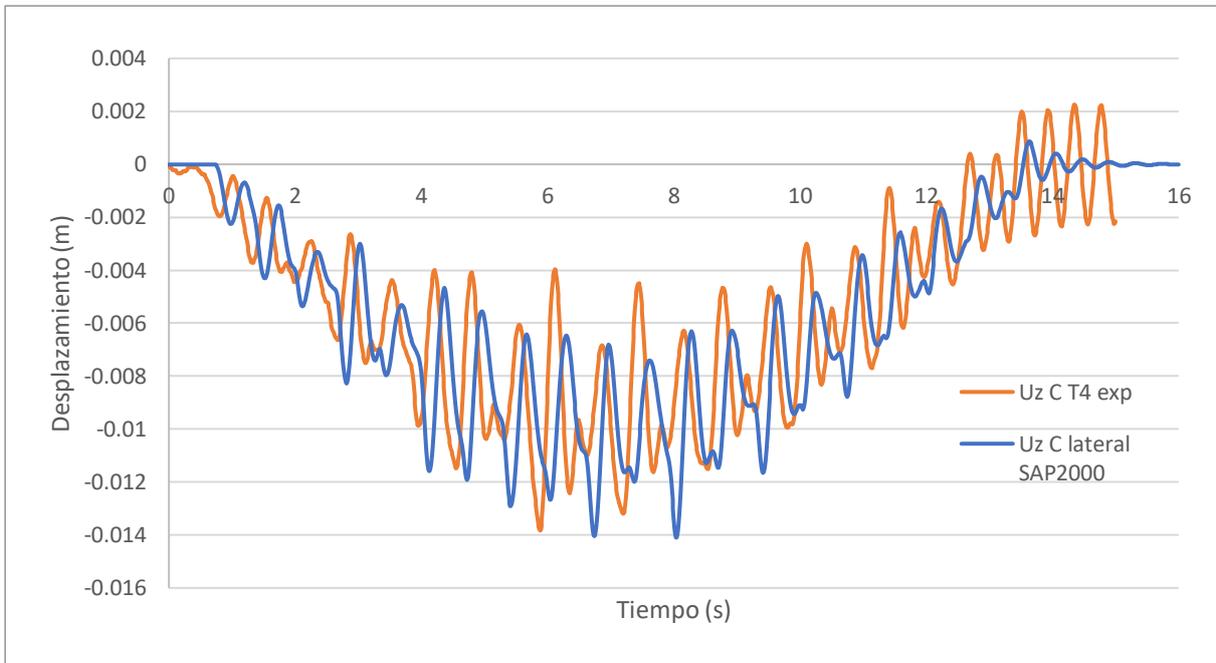


Ilustración 169. Desplazamiento punto central caso Tránsito real peatonal C T4 lado derecho vs T4 C

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.0141 m = 14.1 mm → es prácticamente el mismo valor, a 90 ppm no se excita la torsión.

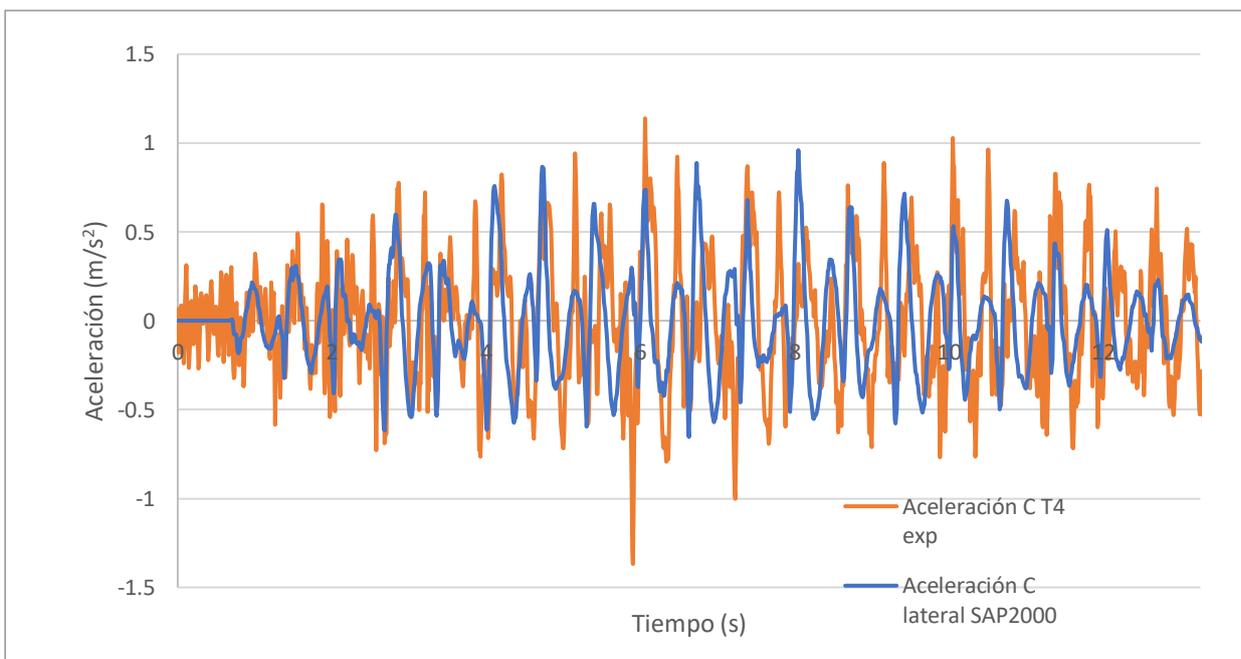


Ilustración 170. Aceleración punto central caso Tránsito real peatonal C T4 lado derecho vs T4 C

Valor máximo aceleración SAP2000 = 0.95945 m/s²

2.4. Tránsitos simplificados laterales:

2.4.1. Caso "Shaker" lateral:

Se debe aplicar la carga unitaria en el centro de la plataforma, pero en el extremo del lateral.

Se representan los valores del desplazamiento y la aceleración del punto central y se grafican en las ilustraciones 171 y 172:

Pisadas cortas:

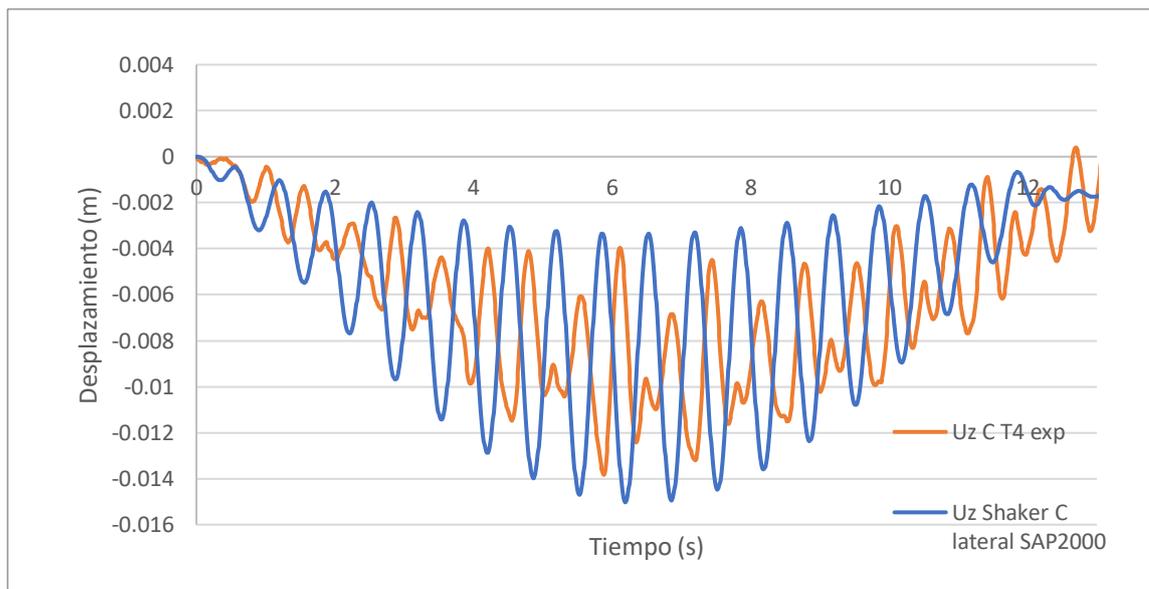


Ilustración 171. Desplazamiento punto central caso Shaker C lateral vs T4 C

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.01503 m = 15.03 mm

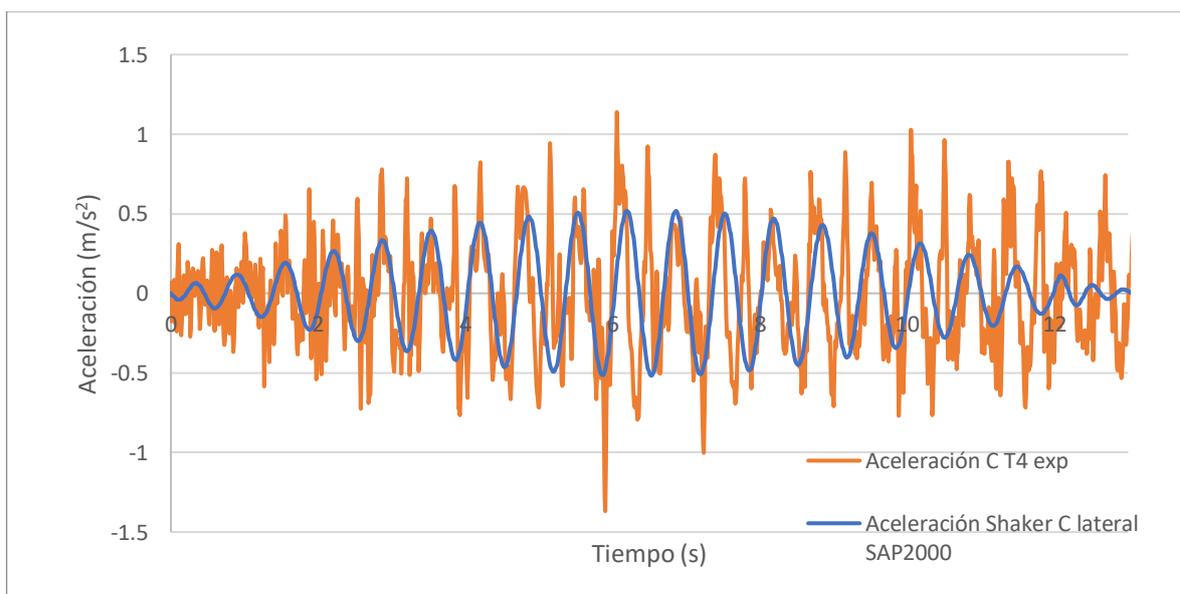


Ilustración 172. Aceleración punto central caso Shaker C lateral vs T4 C

Valor máximo aceleración SAP2000 = 0.51818 m/s²

2.4.2. Caso deslizante lateral:

Se representan los valores del desplazamiento y la aceleración del punto central y se grafican en las ilustraciones 173 y 174:

Pisadas cortas:

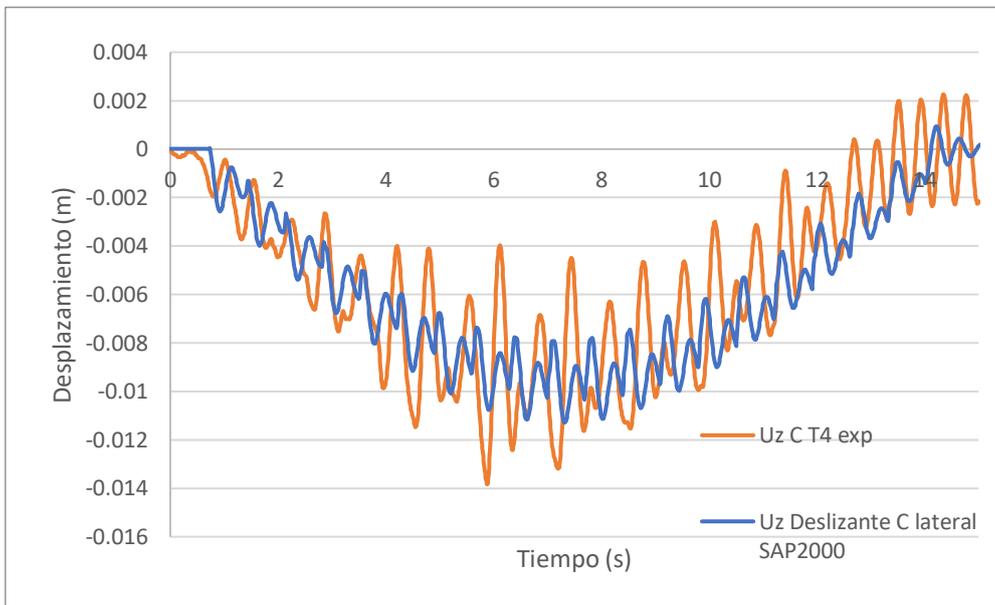


Ilustración 173. Desplazamiento punto central caso Deslizante C lateral vs T4 C

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.01129 m = 11.29 mm

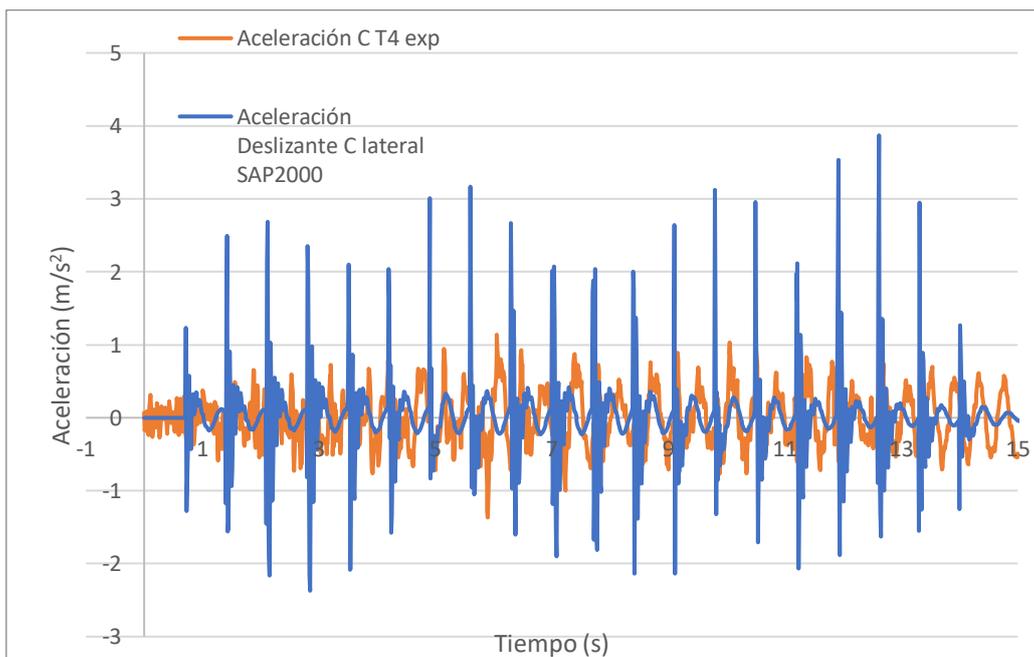


Ilustración 174. Aceleración punto central caso Deslizante C lateral vs T4 C

Valor máximo aceleración SAP2000 = 3.87051 m/s²

2.4.3. Caso pulsante lateral

Se representan los valores del desplazamiento y la aceleración del punto central y se grafican en las ilustraciones 175 y 176:

Pisadas cortas:

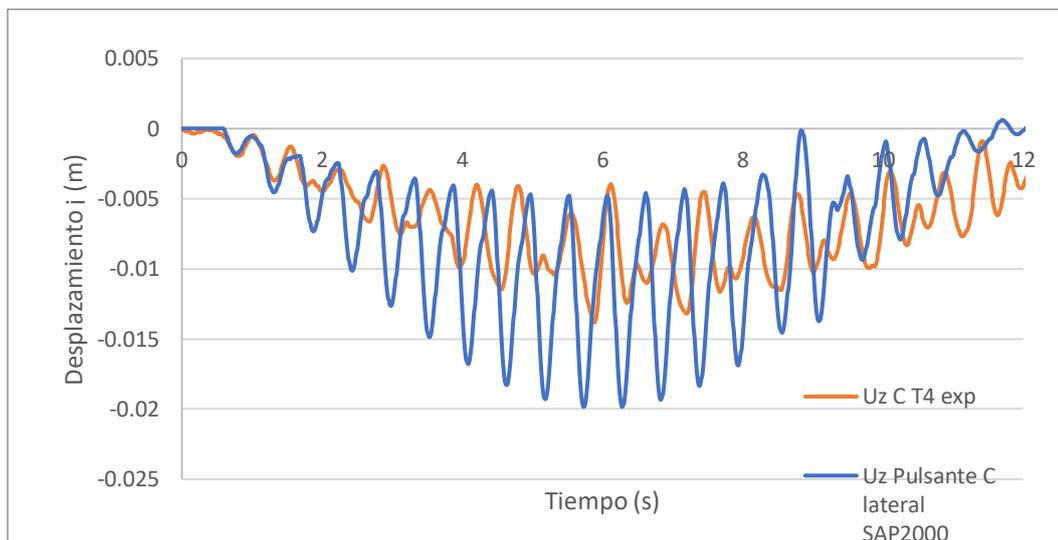


Ilustración 175. Desplazamiento punto central caso Pulsante C lateral vs T4 C

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.01985 m = 19.85 mm

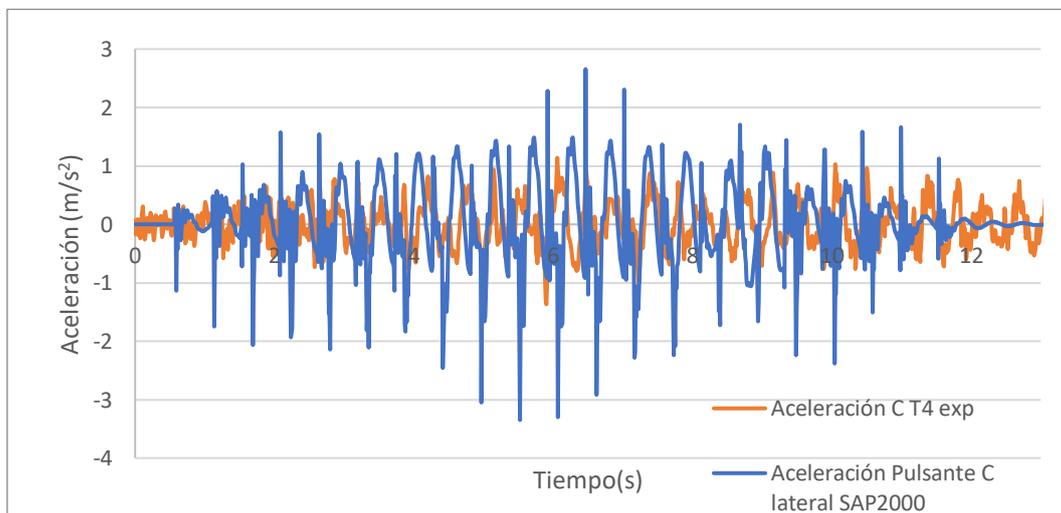


Ilustración 176. Aceleración punto central caso Pulsante C lateral vs T4 C

Valor máximo aceleración SAP2000 = 3.34938 m/s²

2.4.4. Caso robot lateral:

Se representan los valores del desplazamiento y la aceleración del punto central y se grafican en las ilustraciones 177 y 178:

2.4.4.1. Robot 1 paso D6:

Pisadas cortas:

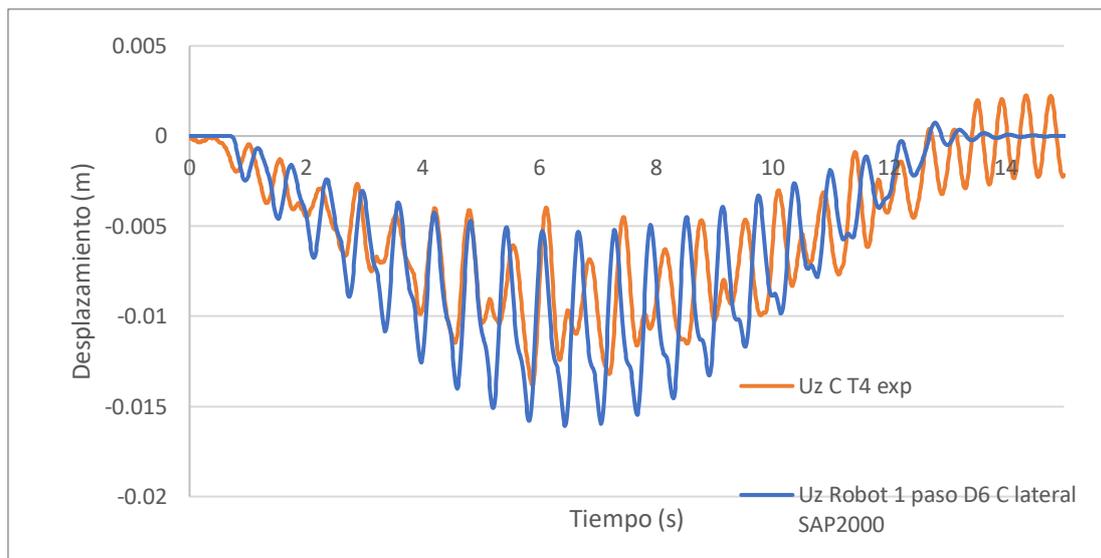


Ilustración 177. Desplazamiento punto central caso Robot 1 paso D6 C lateral vs T4 C

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.01609 m = 16.09 mm

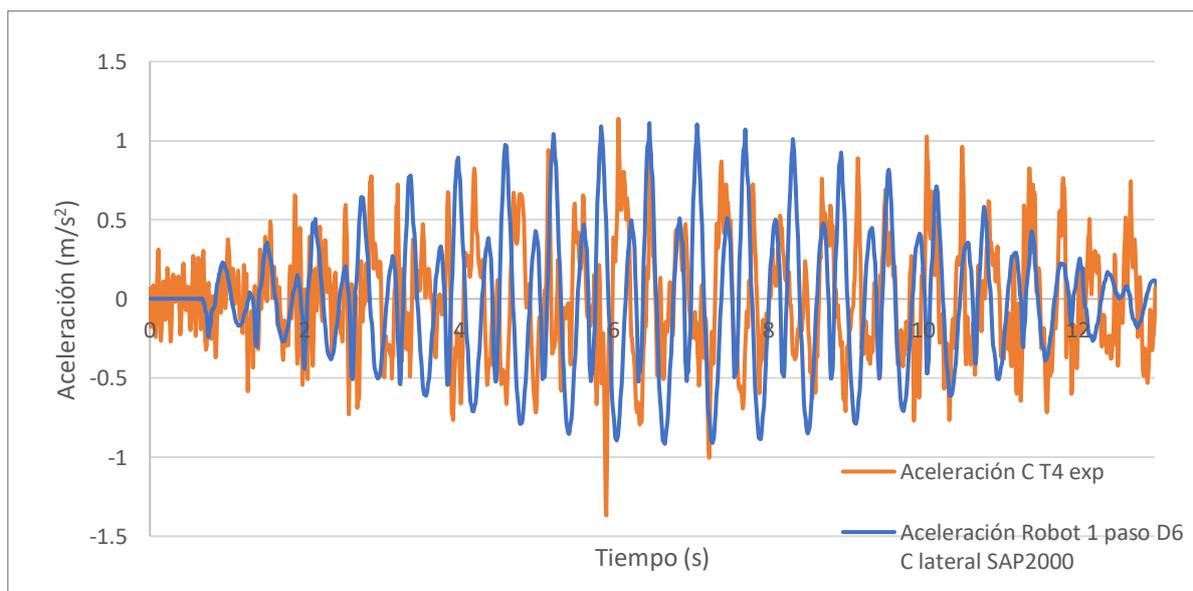


Ilustración 178. Aceleración punto central caso Robot 1 paso D6 C lateral vs T4 C

Valor máximo aceleración SAP2000 = 1.11116 m/s²

2.4.4.2. Robot 2 pasos D6 I6:

Pisadas cortas:

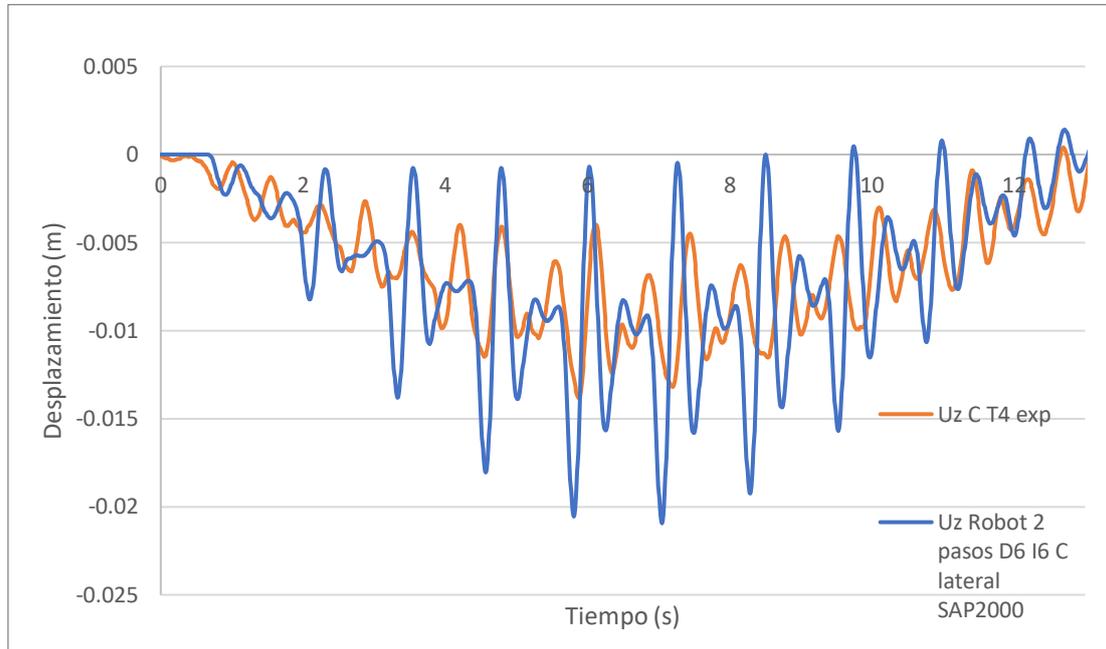


Ilustración 179. Desplazamiento punto central caso Robot 2 pasos D6 I6 C lateral vs T4 C

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.02094 m = 20.94 mm

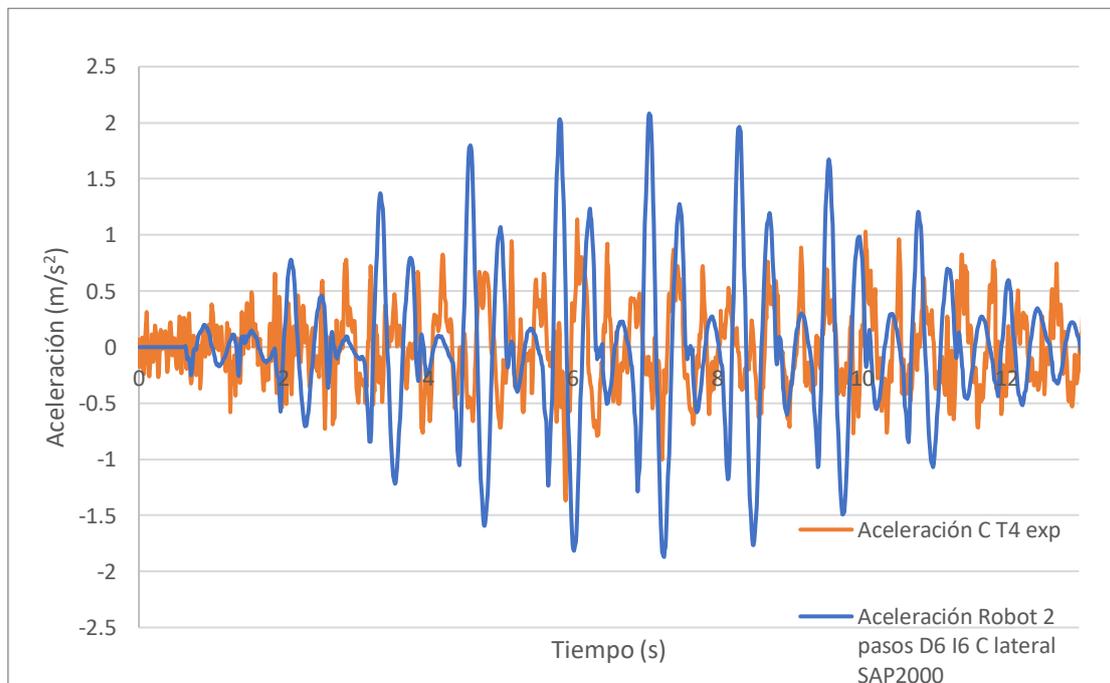


Ilustración 180. Aceleración punto central caso Robot 2 pasos D6 I6 C lateral vs T4 C

Valor máximo aceleración SAP2000 = 2.08243 m/s²

3. Comprobación resultados mediante el software de cálculo “CsiBridge”:

El software de cálculo “CsiBridge” se trata de un software de modelado, análisis y dimensionado de estructuras basado en elementos finitos pero que además permite representar puentes en un único modelo. Permitiendo profesionalizar el modelo al representar más fidedignamente el comportamiento de este tipo de estructuras.

A pesar de que el TFM se ha realiza mediante el software de cálculo “SAP2000”, que ha permitido representar de manera “real” los tránsitos peatonales simulados, se va a proceder a comprobar los resultados mediante el software de cálculo “CsiBridge”.

Al ser el objeto de estudio del presente documento una plataforma peatonal, esta puede asemejarse a un puente de menores dimensiones, por lo que es interesante comparar los resultados que proporciona el software de cálculo “CsiBridge”.

El entorno de trabajo de este software tiene grandes similitudes con el entorno de SAP2000, se trata de un programa tridimensional que permite implementar las características constructivas de la estructura, al igual que las hipótesis que definen el caso de carga a estudiar.

En la ilustración 181 se pueden observar los diferentes menús a los que este permite acceder:

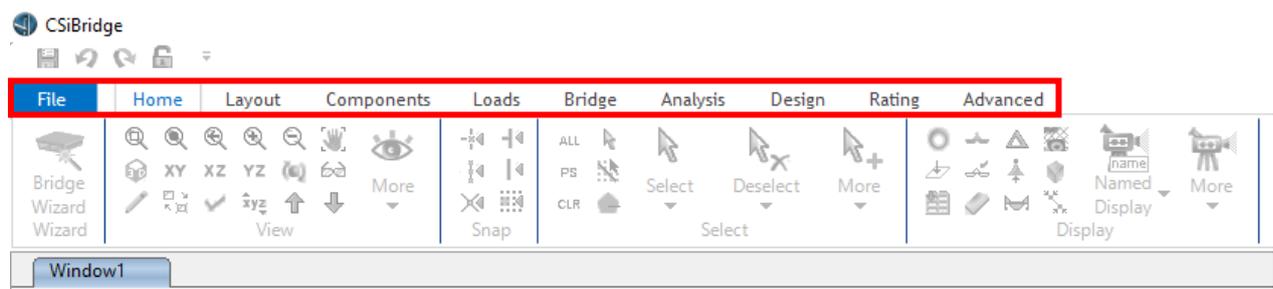


Ilustración 181. Menú principal CsiBridge

Cada uno de los diferentes menús tiene una función, sirven para implementar las características constructivas de la estructura y definir las hipótesis de carga.

Apoyándose en diferentes herramientas para definir la geometría y poder guardar los resultados del cálculo realizado durante la simulación.

El objetivo de este epígrafe es comprobar que los resultados obtenidos entre el software de cálculo “SAP2000” coinciden con los obtenidos mediante “CsiBridge”.

Para ello hay dos opciones para realizar las simulaciones en “CsiBridge”:

- Crear el modelo desde cero, definir las características constructivas y la geometría de la plataforma real, y definir las hipótesis de carga que corresponden con los tránsitos peatonales experimentales.
- O bien, importar los ficheros de las simulaciones realizadas mediante “SAP2000”.

La primera opción permite además de comprobar que ambos softwares proporcionan los mismos resultados, verificar que las simulaciones realizadas previamente en “SAP2000” son correctas.

Pero la validación de las simulaciones realizadas anteriormente en “SAP2000”, se ha realizado previamente comparándolo con los registros experimentales.

Por lo que se selecciona la segunda opción, ya que permite comprobar que ambos softwares funcionan de igual manera y los resultados coinciden, que es el objetivo fundamental del presente epígrafe.

Procedimiento para importar ficheros desde "SAP2000" a "CsiBridge":

1. Una vez realizada y guardada la simulación en SAP2000, se debe exportar a un archivo ".S2k", que se trata de un archivo de texto, en la ilustración 182 se detalla:

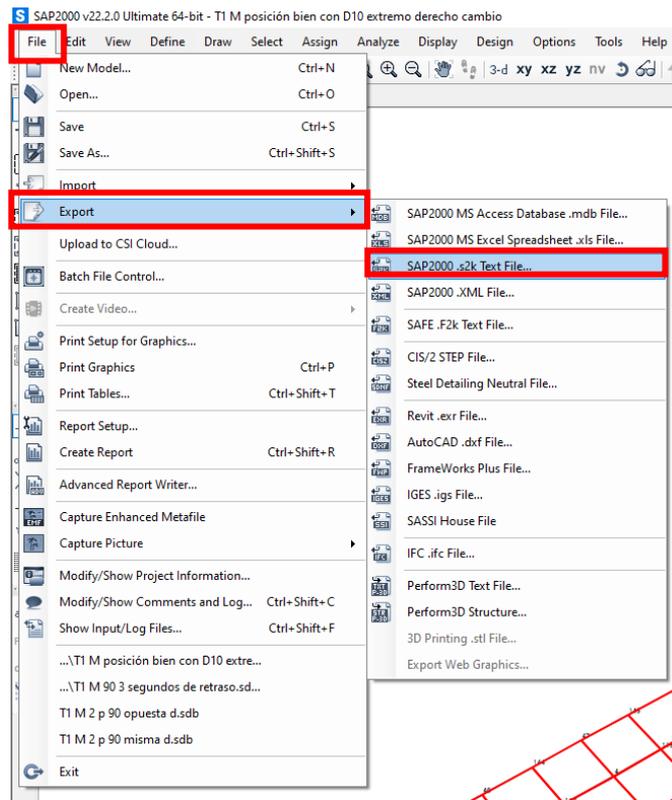


Ilustración 182. Exportar fichero SAP2000 a archivo ".S2k"

2. Se debe exportar todo el fichero, seleccionando la siguiente lista de la ilustración 183:



Ilustración 183. Lista a exportar a archivo ".S2k" en SAP2000

- Una vez hecho esto, se debe abrir el archivo correspondiente con el bloc de notas del PC, como se puede observar en la ilustración 184:

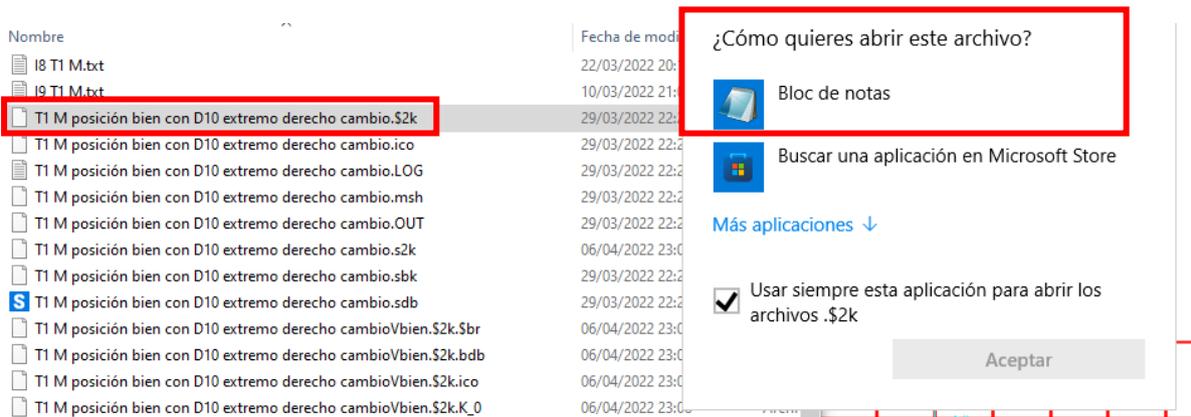


Ilustración 184. Abrir archivo ".S2k" con el bloc de notas del PC

- Se deben ajustar las versiones entre ambos softwares, es decir, el fichero de texto exportado desde SAP2000 debe coincidir con la versión instalada de CsiBridge. Si las versiones entre ambos softwares coinciden, este paso no es necesario, pero se debe comprobar.

En este caso la versión de SAP2000 es la "22.1.0" y la de CsiBridge "21.2.0", por lo tanto se debe ajustar a esta versión el archivo ".S2k".

Una vez abierto con el bloc de notas, se debe buscar la zona del archivo, como la mostrada en la ilustración 185, donde aparece la Tabla del control del programa y ajustar la versión, sin modificar el resto del texto:

```
TABLE: "PREFERENCES - STEEL DESIGN - AISC 360-16"
  THDesign=Envelopes FrameType=SMF PatLLF=0,75 SRatioLimit=0,95 MaxIter=1 SDC=
  AMethod="Direct Analysis" SOMethod="General 2nd Order" SRMethod="Tau-b Fixed"
  CheckDefl=No DLRat=120 SDLAndLLRat=120 LLRat=360 TotalRat=240 NetRat=24
```

```
TABLE: "PROGRAM CONTROL"
  ProgramName=SAP2000 Version=21.2.0 CurrUnits="N, m, C" SteelCode="AISC 360-16"
```

```
TABLE: "PROJECT INFORMATION"
  Item="Company Name" Data=uva
  Item="Client Name"
  Item="Project Name"
  Item="Project Number"
  Item="Model Name"
  Item="Model Description"
  Item="Revision Number"
  Item="Frame Type"
  Item=Engineer
  Item=Checker
  Item=Supervisor
  Item="Issue Code"
  Item="Design Code"
```

```
TABLE: "REBAR SIZES"
  RebarID=#2 Area=3,2258E-05 Diameter=0,00635
```

Ilustración 185. Equiparar versiones entre SAP2000 y CsiBridge

- Se debe guardar en “.txt” el fichero “.S2k” para esto basta con abrirlo con el bloc de notas del PC y guardarlo como “.txt”.
- Se debe acceder a CsiBridge y seleccionar “importar un fichero de texto” como se muestra en la ilustración 186:

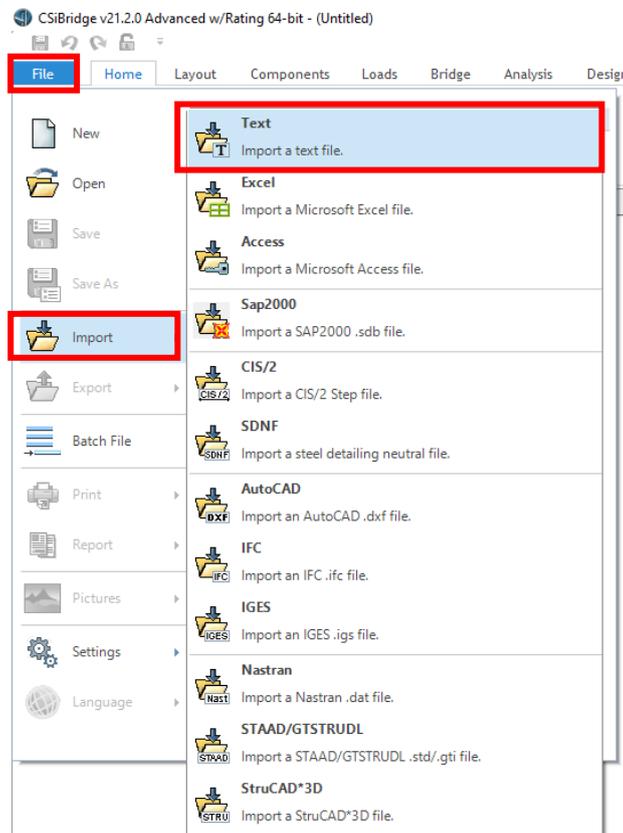


Ilustración 186. Importar fichero “.txt” en CsiBridge

- Se debe seleccionar el archivo “.txt” guardado anteriormente con la versión correspondiente, en la ilustración 187 se observa un ejemplo de cómo se debe proceder con el archivo “.txt”:

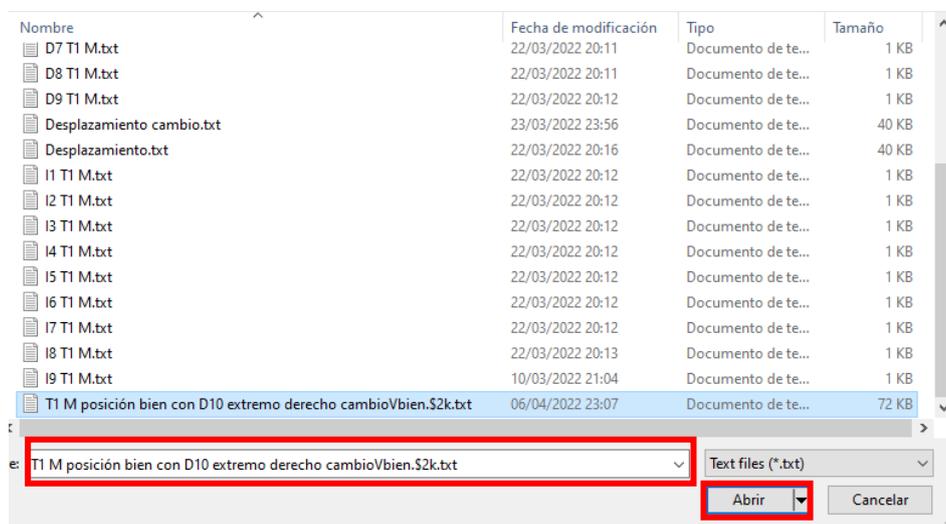


Ilustración 187. Seleccionar archivo “.txt” para abrirlo en CsiBridge

8. Una vez hecho esto, aparece el siguiente menú, se debe seleccionar lo indicado en la ilustración 188:

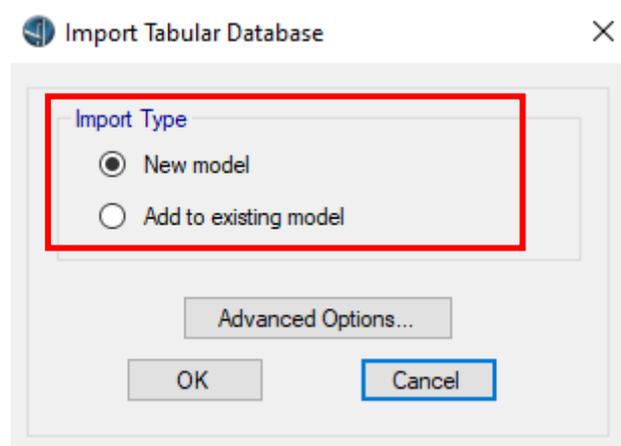


Ilustración 188. Aceptar tipo de importación a CsiBridge

9. Si se realiza el procedimiento de manera correcta, debería saltar el mensaje que se muestra en la ilustración 189, indicando que no hay ningún error, ni ningún aviso ni informe:

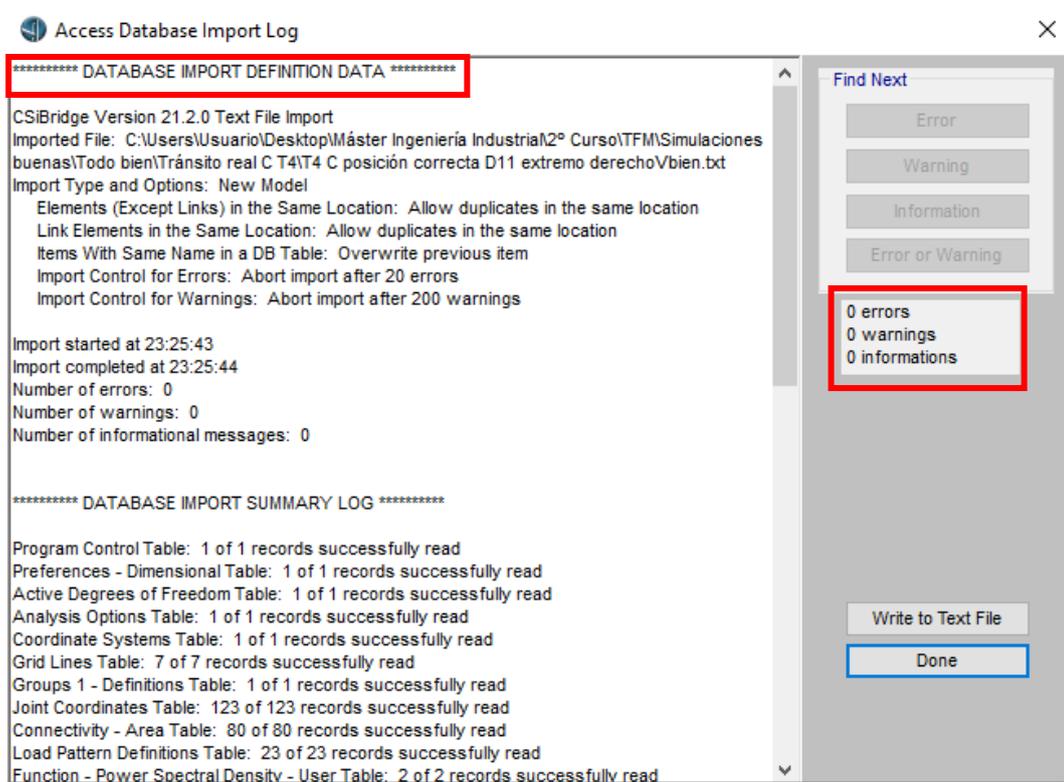


Ilustración 189. Lista de errores, avisos, informes al importar a CsiBridge

10. Una vez importado el modelo, se procede a realizar la simulación como se indica en la ilustración 190:

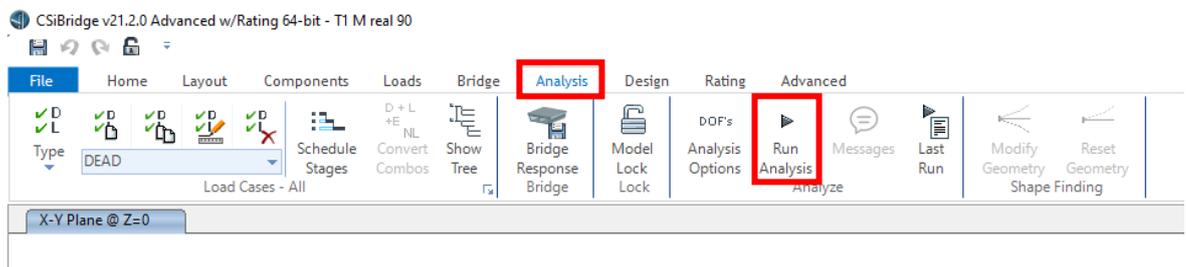


Ilustración 190. "Run analysis" CsIBridge

11. Para poder graficar los resultados, en este caso, el desplazamiento y la aceleración del punto central de la plataforma, se accede al submenú indicado en la ilustración 191:

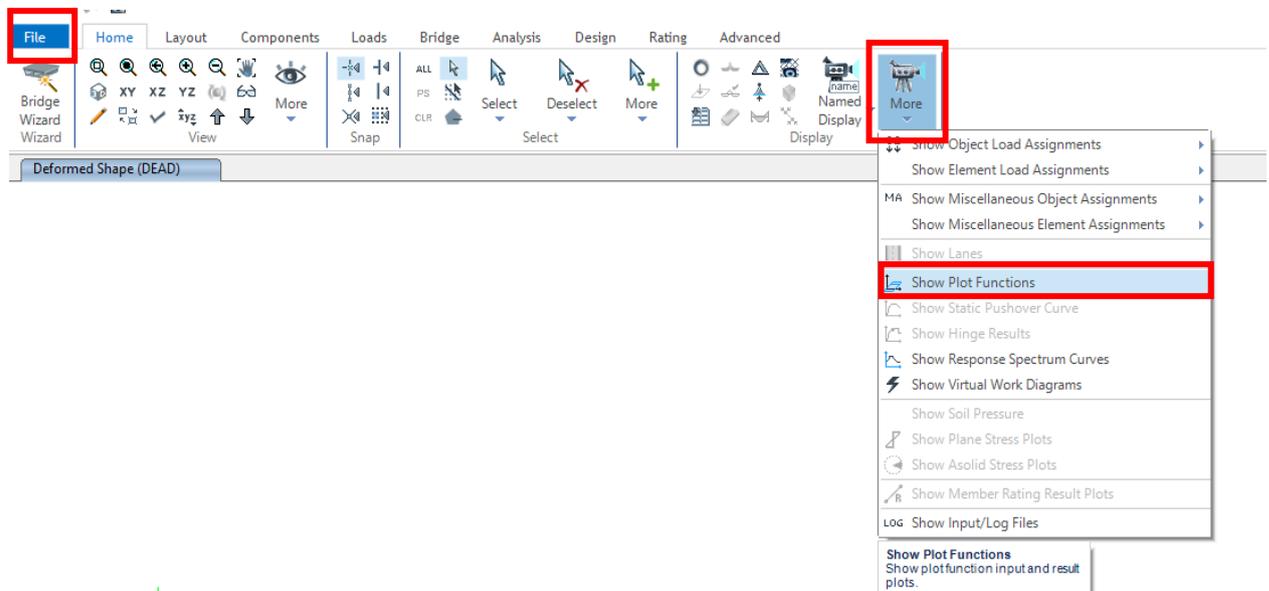


Ilustración 191. "Show plot functions" en CsIBridge

Al hacer click, salta una pestaña igual que al realizar "show plot functions" en SAP2000, para definir el punto de estudio, y los resultados que se quieren obtener mediante la simulación.

Comprobación de que los softwares “SAP2000” y “CsiBridge” registran los mismos resultados a partir del mismo modelo:

Ahora se procederá a obtener los resultados de dos de las simulaciones realizadas anteriormente en SAP2000, pero esta vez en CsiBridge. De esta manera se podrá comprobar que ambos softwares permiten obtener los mismos resultados a partir del mismo modelo.

Se importan desde SAP2000 a CsiBridge (siguiendo el procedimiento anterior), las simulaciones de los tránsitos peatonales experimentales T1 M a 90 ppm y T4 C a 90 ppm.

De nuevo se graficará el valor del desplazamiento y la aceleración del punto central de la plataforma a lo largo del tránsito peatonal simulado.

Se compararán con los resultados experimentales registrados en los ensayos experimentales en el laboratorio.

Además, tener en cuenta, que para las funciones de las pisadas se han importado los ficheros “.txt” en los que se almacena el valor de la fuerza de cada pisada en función del tiempo.

Por lo que en CsiBridge al igual que en SAP2000, a la hora de importar las funciones desde ficheros “.txt” se debe asegurar que están correctamente seleccionados los archivos y el software es capaz de leerlos e importarlos.

Caso T1 M a 90 ppm:

Los resultados del desplazamiento y la aceleración del punto central de la plataforma se grafican en las ilustraciones 192 y 193 respectivamente:

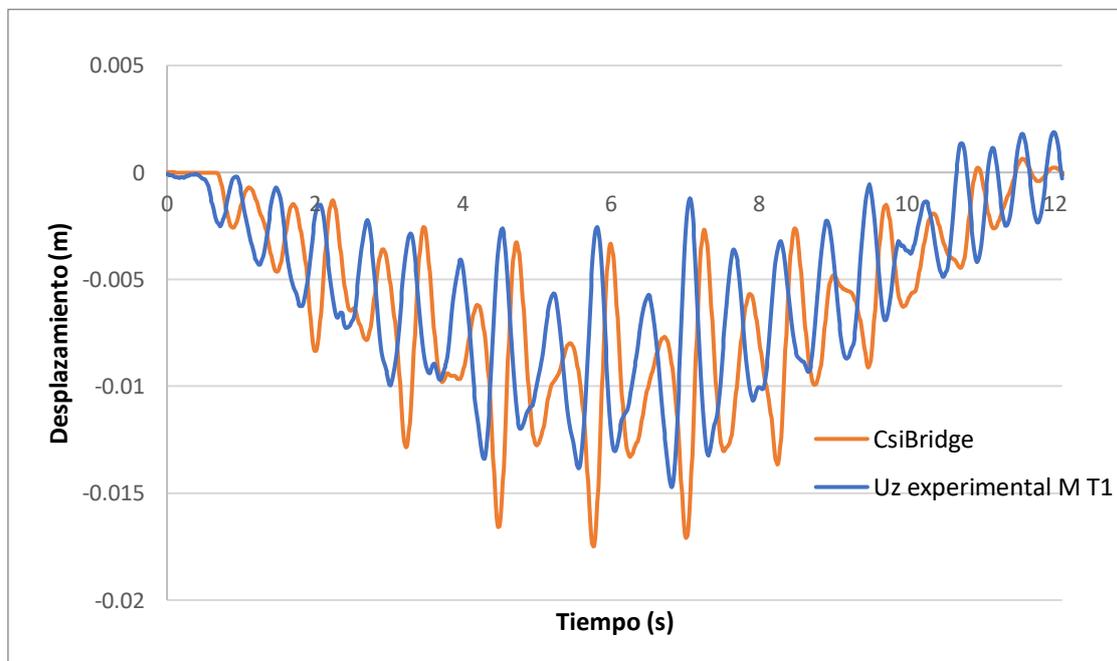


Ilustración 192. Comprobación desplazamiento T1 M 90 real entre SAP2000, CsiBridge y experimental

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.01749 m = 17.49 mm

Valor máximo desplazamiento CsiBridge = 0.01749 m = 17.49 mm

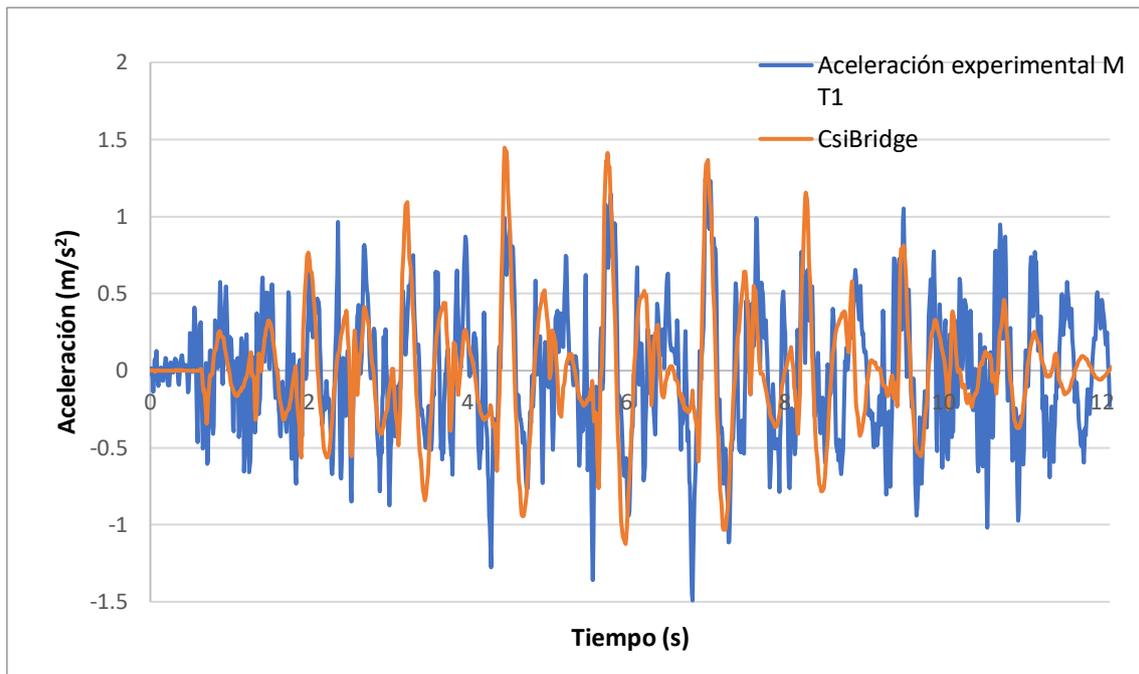


Ilustración 193. Comprobación aceleración T1 M 90 real entre SAP2000, CsiBridge y experimental

Valor máximo aceleración SAP2000 = 1,44657 m/s²

Valor máximo aceleración CsiBridge = 1,44657 m/s²

Caso T4 C a 90 ppm:

Los resultados del desplazamiento y la aceleración del punto central de la plataforma se grafican en las ilustraciones 194 y 195 respectivamente:

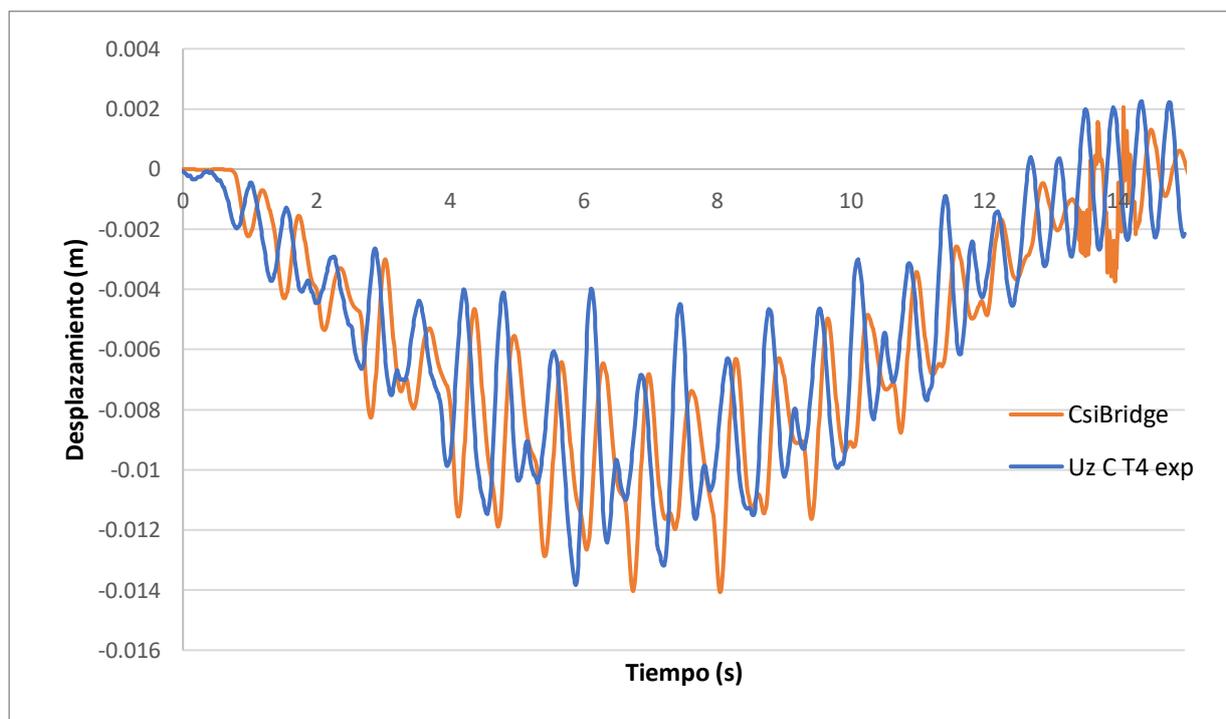


Ilustración 194. Comprobación desplazamiento T4 C 90 real -SAP2000, CsiBridge y experimental

Valor máximo desplazamiento SAP2000 = 0.01407 m =14.07 mm

Valor máximo desplazamiento CsiBridge = 0.01407 m =14.07 mm

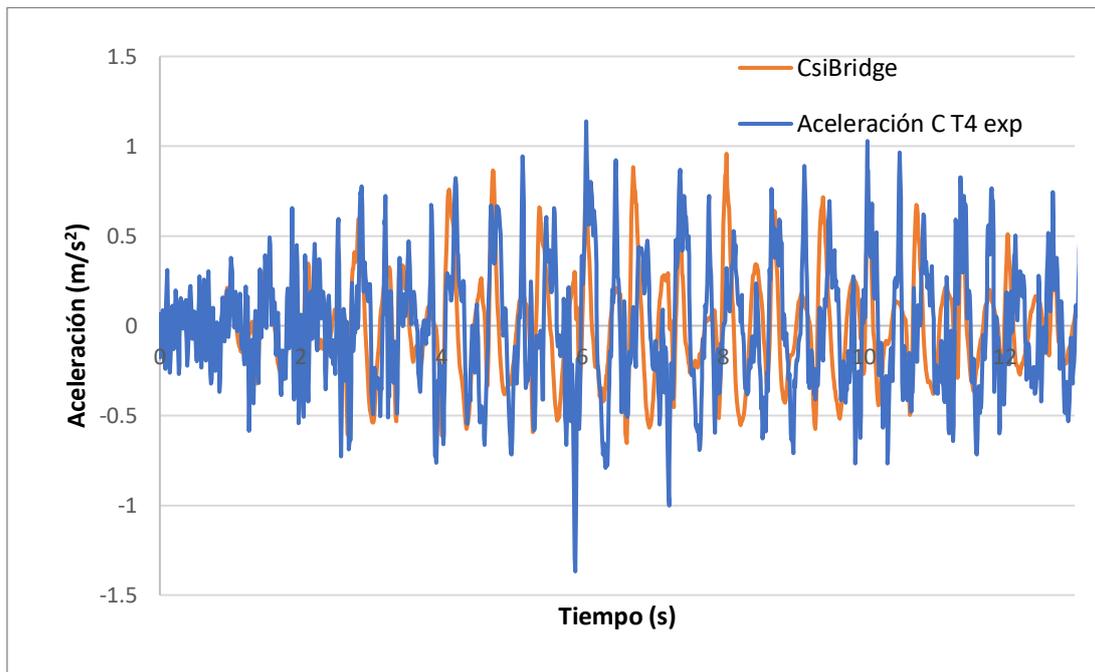


Ilustración 195. Comprobación aceleración T4 C 90 real entre SAP2000, CsiBridge y experimental

Valor máximo aceleración SAP2000 = 0.95765 m/s²

Valor máximo aceleración CsiBridge = 0.95765 m/s²

Como se puede observar, los resultados coinciden con los obtenidos mediante el software de cálculo SAP2000.

Por lo tanto, se puede concluir con que ambos softwares permiten obtener los mismos resultados ante el mismo modelo de simulación.