



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos

Influencia de los elementos separadores entre carril bici y
calzada en la gravedad de los accidentes de
micromovilidad.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Transporte, Territorio y Urbanismo

AUTOR/A: Lince Naranjo, Lina Maria

Tutor/a: Pérez Zuriaga, Ana María

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



**INFLUENCIA DE LOS
ELEMENTOS SEPARADORES
ENTRE CARRIL BICI Y
CALZADA EN LA GRAVEDAD
DE LOS ACCIDENTES DE
MICROMOVILIDAD**

Autora: Lina Maria Lince Naranjo

Tutora: Ana Maria Pérez Zuriaga

**MÁSTER EN TRANSPORTE, TERRITORIO Y
URBANISMO**

VALENCIA, 15/ julio / 2024

1 RESUMEN

Como consecuencia del constante cambio que experimentan actualmente las ciudades, el uso de medios de transporte que hacen parte de la micromovilidad se han convertido en un panorama natural. Específicamente ciclistas y usuarios de patinete eléctrico han experimentado un notable incremento. En este orden de ideas, es digno de estudio la seguridad de estos actores viales en este ámbito de la movilidad.

El presente trabajo pretende exponer un análisis referente a la infraestructura exclusiva por la que circulan los usuarios anteriormente mencionados. Este consiste en determinar la influencia de los elementos separadores entre carril bici y calzada en la accidentabilidad a partir de simulaciones que permiten reconstruir accidentes consistentes en colisiones entre usuarios de patinete eléctrico y bicicleta contra bordillos y bolardos haciendo uso de la herramienta informática PC – Crash. Dichos análisis se realizaron partiendo de datos de entrada que incluyen la complejidad del usuario, las dimensiones de los vehículos (bicicletas y patinetes eléctricos), las configuraciones y geometría de los elementos separadores, ángulos y velocidades de impacto, definiendo esta última en rangos de 5 km/h hasta 25km/h.

Con base en lo anterior, los análisis aquí plasmados pretenden establecer los tipos de elementos separadores y su configuración que suponen una menor gravedad en las lesiones como consecuencia de los accidentes objeto de este estudio. El fundamento del análisis gira entorno a parámetros cuantificables como el indicador Head Injury Criterion – HIC, que de acuerdo con rangos de valores específicos asocia diferentes probabilidades de lesiones en la cabeza y la distancia invadida de la calzada por parte de la víctima, siendo esta una situación que representa un potencial riesgo de atropello.

Los resultados, recomendaciones y conclusiones buscan fortalecer las investigaciones ya existentes referentes a la accidentabilidad en el marco de la micromovilidad que se basan en la reconstrucción de accidentes a partir del uso de herramientas informáticas. Así mismo, establecer recomendaciones de diseño para la infraestructura por la cual discurren los usuarios de micromovilidad. De esta forma, se genera un aporte en el marco de la movilidad sostenible y segura que además aporte a los objetivos de la Agenda 2030.

CONTENIDO

1	RESUMEN	1
2	INTRODUCCIÓN	13
3	OBJETIVOS	14
4	ESTADO DEL ARTE	15
4.1	NORMATIVA DE CIRCULACIÓN VEHÍCULOS DE MICROMOVILIDAD EN ESPAÑA	15
4.1.1	Circulación de patinetes eléctricos	15
4.1.2	Circulación de bicicletas	16
4.2	NORMATIVA DE CIRCULACIÓN VEHÍCULOS DE MICROMOVILIDAD EN VALENCIA	16
4.2.1	Circulación de patinetes eléctricos	16
4.2.2	Circulación de bicicletas	17
4.3	ACCIDENTABILIDAD DE LOS VEHÍCULOS DE MICROMOVILIDAD EN ESPAÑA	18
4.3.1	Patinetes eléctricos	18
4.3.2	Bicicletas	20
4.4	ELEMENTOS SEPARADORES	21
4.5	INFLUENCIA DE ELEMENTOS SEPARADORES EN LA ACCIDENTABILIDAD	31
5	METODOLOGÍA	32
5.1	FLUJO DE TRABAJO	32
5.2	SOFTWARE PC-CRASH	32
5.2.1	Modelo de trayectorias	33
5.2.2	Modelo de colisión	35
5.2.3	Modelo multibody	35
5.2.4	Parámetros aplicados en las simulaciones	37
5.3	USUARIOS MODELIZADOS	38
5.4	VEHÍCULOS MODELIZADOS	41
5.5	ESCENARIOS MODELIZADOS	42
5.5.1	Colisión con bordillo	42
5.5.2	Colisión con bolardo	43
5.6	MEDICIÓN DE LA GRAVEDAD DE LOS ACCIDENTES	44
5.6.1	Head Injury Criterion	44
5.6.2	Distancia de calzada invadida	46
6	ANÁLISIS Y RESULTADOS	46
6.1	Colisión patinete eléctrico-bordillo	47
6.1.1	Usuario masculino	47
6.1.2	Usuaría femenina	58

6.2	Colisión bicicleta-bordillo.....	69
6.2.1	Usuario masculino	69
6.2.2	Usuaría femenina	80
6.3	Colisión patinete eléctrico-bolardo	90
6.3.1	Usuario masculino	90
6.3.2	Usuaría femenina	102
6.4	Colisión bicicleta-bolardo	113
6.4.1	Usuario masculino	113
6.4.2	Usuaría femenina	124
7	DISCUSIÓN	136
7.1	Resultados colisión patinete eléctrico – bordillo	136
7.1.1	Resultados Head Injury Criterion – HIC.....	136
7.1.2	Resultados distancia invadida en la calzada	142
7.2	Resultados colisión bicicleta – bordillo	143
7.2.1	Resultados Head Injury Criterion – HIC.....	143
7.2.2	Resultados distancia invadida en la calzada	148
7.3	Resultados colisión patinete eléctrico – bolardo.....	149
7.3.1	Resultados Head Injury Criterion – HIC.....	149
7.3.2	Resultados distancia invadida en la calzada	154
7.4	Resultados colisión bicicleta – bolardo.....	155
7.4.1	Resultados Head Injury Criterion – HIC.....	155
7.4.2	Resultados distancia invadida en la calzada	160
8	RECOMENDACIONES DE DISEÑO	161
9	CONCLUSIONES	164
10	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	167

ANEXO I: IMÁGENES DE LA RECONSTRUCCIÓN DE LAS COLISIONES

ANEXO II: RESULTADOS OBTENIDOS HEAD INJURY CRITERION - HIC

ANEXO III: RESULTADOS DISTANCIAS INVADIDAS EN LA CALZADA

TABLA DE TABLAS

Tabla 1. Representación cuerpo humano con elipsoides	37
Tabla 2. Relación de articulaciones y elipsoides.....	37
Tabla 3. Antropometría grupo hombres.....	38
Tabla 4. Antropometría grupo mujeres	38
Tabla 5. Talla y peso prom. Hombres	39
Tabla 6. Talla y peso prom. Mujeres	39
Tabla 7. Especificación de peso dummy masculino	40
Tabla 8. Especificación de peso dummy grande masculino	40
Tabla 9. Especificación de peso dummy femenino	40
Tabla 10. Especificaciones Xiaomi 3 Lite.....	41
Tabla 11. Especificaciones bicicleta urbana	41
Tabla 12. Dimensiones elementos separadores.....	42
Tabla 13. Criterio de daño HIC.....	46
Tabla 14. Resultados HIC 15 y HIC 36. Patinete eléctrico usuario masculino – bordillo	137
Tabla 15. Resultados HIC 15 y HIC 36. Patinete eléctrica usuaria femenina – bordillo.....	139
Tabla 16. Resultados HIC 15 y HIC 36. Bicicleta usuario masculino – bordillo.....	144
Tabla 17. Resultados HIC 15 y HIC 36. Bicicleta usuaria femenina – bordillo.....	146
Tabla 18. Resultados HIC 15 y HIC 36. Patinete eléctrico usuario masculino – bolardo	149
Tabla 19. Resultados HIC 15 y HIC 36. Patinete usuario masculino – bolardo	152
Tabla 20. Resultados HIC 15 y HIC 36. Bicicleta usuario masculino – bolardo	156
Tabla 21. Resultados HIC 15 y HIC 36. Bicicleta usuaria femenina – bolardo.....	158
Tabla 22. Dimensiones de resguardo de la infraestructura ciclista. (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2023).....	161

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de vehículos de micromovilidad	15
Figura 2. Evolución de personas fallecidas y heridas hospitalizadas en patinete eléctrico en vías urbanas. España	18
Figura 3. Porcentaje de lesionados graves y/o fallecidos por modo de ocurrencia en accidentes con patinete eléctrico en el año 2023, España.	19
Figura 4. Evolución de personas heridas hospitalizadas en bicicleta en vías urbanas. España	20
Figura 5. Evolución de personas fallecidas en bicicleta en vías urbanas. España.....	20
Figura 6. Pirámide invertida de la movilidad.....	22
Figura 7. Postes delineadores	23
Figura 8. Bolardos.....	23
Figura 9. Barreras en concreto	24
Figura 10. Mediana elevada.....	24
Figura 11. Carril bici elevado.....	25
Figura 12. Plantaciones.....	25
Figura 13. Barreras lineales bajas (barreras usadas en aparcamientos)	26
Figura 14. Estacionamientos para vehículos motorizados	26
Figura 15. Barrera fija continua.....	27
Figura 16. Elemento de perfil longitudinal rectangular	28
Figura 17. Separadores puntuales $h > 15\text{cm}$	29
Figura 18. Hitos cilíndricos / bolardos	29
Figura 19. Bordillo de sección rectangular	30
Figura 20. Resguardo entra la banda de servicio (aparcamiento) y carril bici.....	30
Figura 21. Flujo de trabajo software PC-Crash.....	32
Figura 22. Sistemas de coordenadas PC-Crash.....	35
Figura 23. Visualización modelo multibody usuarios de patinetes eléctricos y bicicletas.....	36

Figura 24. Modelo Hybrid III 50 th Percentile Male	40
Figura 25. Modelo Hybrid III 95 th Percentile Large	40
Figura 26. Modelo Hybrid III 5 th Percentile Female.....	40
Figura 27. Tipos de elementos separadores para el análisis.....	42
Figura 28. Ángulos de la trayectoria de impacto con respecto al bordillo	43
Figura 29. Ángulos de la trayectoria de impacto con respecto al bordillo	43
Figura 30. Posibles mecanismos de lesión en la cabeza	44
Figura 31. Reconstrucción del accidente para la colisión del usuario en patinete eléctrico contra el bordillo a 5km/h.....	47
Figura 32. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /5 km/h).....	48
Figura 33. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /5 km/h).....	48
Figura 34. Distancia invadida en la calzada (10° /5 km/h)	48
Figura 35. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /10 km/h).....	49
Figura 36. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /10 km/h)....	49
Figura 37. Distancia invadida en la calzada (10° /10 km/h)	49
Figura 38. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h).....	50
Figura 39. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h)....	50
Figura 40. Distancia invadida en la calzada (10° /15 km/h)	50
Figura 41. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /20 km/h).....	51
Figura 42. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /20 km/h)	51
Figura 43. Distancia invadida en la calzada (10° /20 km/h).....	51
Figura 44. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /25 km/h).....	52
Figura 45. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /25 km/h)....	52
Figura 46. Distancia invadida en la calzada (10° /25 km/h)	52
Figura 47. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /5 km/h).....	53
Figura 48. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /5 km/h).....	53
Figura 49. Distancia invadida en la calzada (40° /5 km/h).....	53
Figura 50. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /10 km/h).....	54
Figura 51. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /10 km/h)....	54
Figura 52. Distancia invadida en la calzada (40° /10 km/h).....	54
Figura 53. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /15 km/h).....	55
Figura 54. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /15 km/h)....	55
Figura 55. Distancia invadida en la calzada (40° /15 km/h)	55
Figura 56. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /20 km/h).....	56
Figura 57. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /20 km/h)...	56
Figura 58. Distancia invadida en la calzada (40° /20 km/h)	56
Figura 59. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /25 km/h).....	57
Figura 60. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /25 km/h)...	57
Figura 61. Distancia invadida en la calzada (40° /25 km/h)	57
Figura 62. Reconstrucción del accidente para la colisión de la usuaria en patinete eléctrico contra el bordillo a 5km/h.....	58
Figura 63. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /5 km/h).....	59
Figura 64. . Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /5 km/h)....	59
Figura 65. Distancia invadida en la calzada (10° /5 km/h)	59

Figura 66. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /10 km/h).....	60
Figura 67. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /10 km/h)....	60
Figura 68. Distancia invadida en la calzada (10° /10 km/h).....	60
Figura 69. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h).....	61
Figura 70. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h)....	61
Figura 71. Distancia invadida en la calzada (10° /15 km/h).....	61
Figura 72. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /20 km/h).....	62
Figura 73. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /20 km/h) ...	62
Figura 74. Distancia invadida en la calzada (10° /20 km/h).....	62
Figura 75. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /25 km/h).....	63
Figura 76. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /25 km/h)....	63
Figura 77. Distancia invadida en la calzada (10° /25 km/h).....	63
Figura 78. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /5 km/h).....	64
Figura 79. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /5 km/h)	64
Figura 80. Distancia invadida en la calzada (40° /5 km/h).....	64
Figura 81. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /10 km/h).....	65
Figura 82. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /10 km/h) ...	65
Figura 83. Distancia invadida en la calzada (40° /10 km/h).....	65
Figura 84. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /15 km/h).....	66
Figura 85. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /15 km/h).....	66
Figura 86. Distancia invadida en la calzada (40° /15 km/h).....	66
Figura 87. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /20 km/h).....	67
Figura 88. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /20 km/h) ..	67
Figura 89. Distancia invadida en la calzada (40° /20 km/h).....	67
Figura 90. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /25 km/h).....	68
Figura 91. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /25 km/h) ...	68
Figura 92. Distancia invadida en la calzada (40° /25 km/h).....	68
Figura 93. Reconstrucción del accidente para la colisión del usuario en bicicleta contra el bordillo a 5km/h	69
Figura 94. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10°/5 km/h).....	70
Figura 95. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /5 km/h).....	70
Figura 96. Distancia invadida en la calzada (10° /5 km/h).....	70
Figura 97. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /10 km/h).....	71
Figura 98. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /10 km/h)	71
Figura 99. Distancia invadida en la calzada (10° /10 km/h).....	71
Figura 100. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h).....	72
Figura 101. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h)...	72
Figura 102. Distancia invadida en la calzada (10° /15 km/h).....	72
Figura 103. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /20 km/h).....	73
Figura 104. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /20 km/h) .	73
Figura 105. Distancia invadida en la calzada (10° /20 km/h).....	73

Figura 106. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /25 km/h).....	74
Figura 107. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /25 km/h) ..	74
Figura 108. Distancia invadida en la calzada (10° /25 km/h)	74
Figura 109. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /5 km/h).....	75
Figura 110. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /5 km/h)....	75
Figura 111. Distancia invadida en la calzada (40° /5 km/h)	75
Figura 112. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /10 km/h).....	76
Figura 113. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /10 km/h) ..	76
Figura 114. Distancia invadida en la calzada (40° /10 km/h).....	76
Figura 115. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /15 km/h).....	77
Figura 116. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /15 km/h) ..	77
Figura 117. Distancia invadida en la calzada (40° /15 km/h)	77
Figura 118. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /20 km/h).....	78
Figura 119. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /20 km/h) .	78
Figura 120. Distancia invadida en la calzada (40° /20 km/h)	78
Figura 121. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /25 km/h).....	79
Figura 122. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /25 km/h) .	79
Figura 123. Distancia invadida en la calzada (40° /25 km/h).....	79
Figura 124. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10°/5 km/h).....	80
Figura 125. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /5 km/h)	80
Figura 126. Distancia invadida en la calzada (10° /5 km/h).....	80
Figura 127. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /10 km/h).....	81
Figura 128. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /10 km/h) ..	81
Figura 129. Distancia invadida en la calzada (10° /10 km/h).....	81
Figura 130. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h).....	82
Figura 131. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h) ...	82
Figura 132. Distancia invadida en la calzada (10° /15 km/h)	82
Figura 133. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /20 km/h).....	83
Figura 134. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /20 km/h) ..	83
Figura 135. Distancia invadida en la calzada (10° /20 km/h)	83
Figura 136. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /25 km/h).....	84
Figura 137. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /25 km/h) ..	84
Figura 138. Distancia invadida en la calzada (10° /25 km/h)	84
Figura 139. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /5 km/h).....	85
Figura 140. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /5 km/h) ...	85
Figura 141. Distancia invadida en la calzada (40° /5 km/h).....	85
Figura 142. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /10 km/h).....	86
Figura 143. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /10 km/h) .	86
Figura 144. Distancia invadida en la calzada (40° /10 km/h)	86
Figura 145. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /15 km/h).....	87
Figura 146. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /15 km/h) ..	87
Figura 147. Distancia invadida en la calzada (40° /15 km/h).....	87

Figura 148. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /20 km/h).....	88
Figura 149. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /20 km/h) ..	88
Figura 150. Distancia invadida en la calzada (40° /20 km/h).....	88
Figura 151. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /25 km/h).....	89
Figura 152. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /25 km/h) ..	89
Figura 153. Distancia invadida en la calzada (40° /25 km/h)	89
Figura 154. Reconstrucción del accidente para la colisión del ciclista contra el bolardo a 5km/h	91
Figura 155. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10°/5 km/h).....	92
Figura 156. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /5 km/h)	92
Figura 157. Distancia invadida en la calzada (10° /5 km/h)	92
Figura 158. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /10 km/h).....	93
Figura 159. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /10 km/h) ..	93
Figura 160. Distancia invadida en la calzada (10° /10 km/h)	93
Figura 161. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h).....	94
Figura 162. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h) ..	94
Figura 163. Distancia invadida en la calzada (10° /15 km/h)	94
Figura 164. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /20 km/h).....	95
Figura 165. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /20 km/h)..	95
Figura 166. Distancia invadida en la calzada (10° /20 km/h)	95
Figura 167. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /25 km/h).....	96
Figura 168. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /25 km/h)..	96
Figura 169. Distancia invadida en la calzada (10° /25 km/h)	96
Figura 170. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /5 km/h).....	97
Figura 171. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /5 km/h)	97
Figura 172. Distancia invadida en la calzada (0° /5 km/h)	97
Figura 173. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /10 km/h).....	98
Figura 174. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /10 km/h)....	98
Figura 175. Distancia invadida en la calzada (40° /10 km/h)	98
Figura 176. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /15 km/h).....	99
Figura 177. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /15 km/h)	99
Figura 178. Distancia invadida en la calzada (0° /15 km/h).....	99
Figura 179. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /20 km/h).....	100
Figura 180. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /20 km/h) ..	100
Figura 181. Distancia invadida en la calzada (0° /20 km/h)	100
Figura 182. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /25 km/h).....	101
Figura 183. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /25 km/h) ..	101
Figura 184. Distancia invadida en la calzada (0° /25 km/h)	101
Figura 185. Reconstrucción del accidente para la colisión de la ciclista contra el bolardo a 5km/h	102
Figura 186. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10°/5 km/h).....	103
Figura 187. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /5 km/h) ..	103
Figura 188. Distancia invadida en la calzada (10° /5 km/h)	103

Figura 189. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /10 km/h).....	104
Figura 190. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /10 km/h).....	104
Figura 191. Distancia invadida en la calzada (10° /10 km/h)	104
Figura 192. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h).....	105
Figura 193. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h).....	105
Figura 194. Distancia invadida en la calzada (10° /15 km/h).....	105
Figura 195. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /20 km/h).....	106
Figura 196. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /20 km/h).....	106
Figura 197. Distancia invadida en la calzada (10° /20 km/h)	106
Figura 198. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /25 km/h).....	107
Figura 199. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /25 km/h).....	107
Figura 200. Distancia invadida en la calzada (10° /25 km/h).....	107
Figura 201. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /5 km/h).....	108
Figura 202. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /5 km/h).....	108
Figura 203. Distancia invadida en la calzada (0° /5 km/h).....	108
Figura 204. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /10 km/h).....	109
Figura 205. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /10 km/h).....	109
Figura 206. Distancia invadida en la calzada (0° /10 km/h)	109
Figura 207. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /15 km/h).....	110
Figura 208. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /15 km/h).....	110
Figura 209. Distancia invadida en la calzada (0° /15 km/h).....	110
Figura 210. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /20 km/h).....	111
Figura 211. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /20 km/h).....	111
Figura 212. Distancia invadida en la calzada (0° /20 km/h).....	111
Figura 213. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /25 km/h).....	112
Figura 214. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /25 km/h).....	112
Figura 215. Distancia invadida en la calzada (0° /25 km/h)	112
Figura 216. Reconstrucción del accidente para la colisión del usuario en bicicleta contra el bolardo a 5km/h.....	114
Figura 217. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10°/5 km/h).....	114
Figura 218. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /5 km/h).....	114
Figura 219. Distancia invadida en la calzada (10° /5 km/h).....	115
Figura 220. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /10 km/h).....	115
Figura 221. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /10 km/h).....	115
Figura 222. Distancia invadida en la calzada (10° /10 km/h)	116
Figura 223. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h).....	116
Figura 224. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h).....	117
Figura 225. Distancia invadida en la calzada (10° /15 km/h).....	117
Figura 226. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /20 km/h).....	117
Figura 227. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /20 km/h).....	118
Figura 228. Distancia invadida en la calzada (10° /20 km/h)	118
Figura 229. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /25 km/h).....	118

Figura 230. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /25 km/h).....	119
Figura 231. Distancia invadida en la calzada (10° /25 km/h)	119
Figura 232. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /5 km/h).....	119
Figura 233. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /5 km/h) ...	120
Figura 234. Distancia invadida en la calzada (0° /5 km/h).....	120
Figura 235. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /10 km/h).....	120
Figura 236. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /10 km/h) ..	121
Figura 237. Distancia invadida en la calzada (0° /10 km/h)	121
Figura 238. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /15 km/h).....	121
Figura 239. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /15 km/h) .	122
Figura 240. Distancia invadida en la calzada (0° /15 km/h).....	122
Figura 241. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /20 km/h).....	122
Figura 242. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /20 km/h).	123
Figura 243. Distancia invadida en la calzada (0° /20 km/h)	123
Figura 244. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /25 km/h).....	123
Figura 245. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /25 km/h) .	124
Figura 246. Distancia invadida en la calzada (0° /25 km/h).....	124
Figura 247. Reconstrucción del accidente para la colisión de la usuaria en bicicleta contra el bolardo a 5km/h.....	125
Figura 248. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10°/5 km/h).....	126
Figura 249. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /5 km/h) .	126
Figura 250. Distancia invadida en la calzada (10° /5 km/h)	126
Figura 251. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /10 km/h).....	127
Figura 252. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /10 km/h).	127
Figura 253. Distancia invadida en la calzada (10° /10 km/h)	127
Figura 254. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h).....	128
Figura 255. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h)	128
Figura 256. Distancia invadida en la calzada (10° /15 km/h).....	128
Figura 257. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /20 km/h).....	129
Figura 258. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /20 km/h)	129
Figura 259. Distancia invadida en la calzada (10° /20 km/h).....	129
Figura 260. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /25 km/h).....	130
Figura 261. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /25 km/h)	130
Figura 262. Distancia invadida en la calzada (10° /25 km/h).....	130
Figura 263. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /5 km/h).....	131
Figura 264. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /5 km/h)	131
Figura 265. Distancia invadida en la calzada (0° /5 km/h).....	131
Figura 266. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /10 km/h).....	132
Figura 267. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /10 km/h) .	132
Figura 268. Distancia invadida en la calzada (0° /10 km/h).....	132
Figura 269. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /15 km/h).....	133
Figura 270. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /15 km/h) .	133

Figura 271. Distancia invadida en la calzada (0° /15 km/h).....	133
Figura 272. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /20 km/h).....	134
Figura 273. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /20 km/h).....	134
Figura 274. Distancia invadida en la calzada (0° /20 km/h)	134
Figura 275. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /25 km/h).....	135
Figura 276. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /25 km/h).....	135
Figura 277. Distancia invadida en la calzada (0° /25 km/h)	135
Figura 278. HIC vs tiempo. Usuario patinete eléctrico masculino colisión con bordillo (10° - 20 km/h).	137
Figura 279. HIC vs tiempo. Usuario patinete eléctrico masculino colisión con bordillo (40° - 5 km/h).	138
Figura 280. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. (patinete eléctrico usuario masculino – ángulo 10 °).....	138
Figura 281. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. (patinete eléctrico usuario masculino – ángulo 40 °).....	139
Figura 282. HIC vs tiempo. Usuario patinete eléctrico mujer colisión con bordillo (10° - 10 km/h).....	140
Figura 283. HIC vs tiempo. Usuario patinete eléctrico mujer colisión con bordillo (10° - 25 km/h).....	140
Figura 284. HIC vs tiempo. Usuario patinete eléctrico mujer colisión con bordillo (40° - 25 km/h).....	141
Figura 285. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. (patinete eléctrico usuaria femenina – ángulo 10 °)	141
Figura 286. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. (patinete eléctrico usuaria femenina – ángulo 40 °).....	142
Figura 287. Evolución de la distancia invadida en la calzada en función de la velocidad (patinete eléctrico usuario masculino colisión bordillo).....	142
Figura 288. Evolución de la distancia invadida en la calzada en función de la velocidad (patinete eléctrico usuaria femenina colisión bordillo)	143
Figura 289. HIC vs tiempo. Ciclista masculino colisión con bordillo (40° - 15 km/h).	144
Figura 290. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. (usuario ciclista – ángulo 10 °).....	145
Figura 291. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. (usuario ciclista – ángulo 40 °)	145
Figura 292. HIC vs tiempo. Ciclista femenina colisión con bordillo (10° - 10 km/h).	146
Figura 293. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. (usuaria ciclista – ángulo 10 °).....	147
Figura 294. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. (usuaria ciclista – ángulo 40 °)	147
Figura 295. Evolución de la distancia invadida en la calzada en función de la velocidad (bicicleta usuario masculino colisión bordillo).....	148
Figura 296. Evolución de la distancia invadida en la calzada en función de la velocidad (bicicleta usuaria femenina colisión bordillo)	148
Figura 297. HIC vs tiempo. Usuario patinete eléctrico hombre colisión con bolardo (10° - 25 km/h).....	150
Figura 298. HIC vs tiempo. Usuario patinete eléctrico hombre colisión con bolardo (0° - 15 km/h).....	150
Figura 299. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. (patinete eléctrico usuario masculino – ángulo 10 °).....	151
Figura 300. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. (patinete eléctrico usuario masculino – ángulo 0 °)	151

Figura 301. HIC vs tiempo. Usuario patinete eléctrico mujer colisión con bolardo (10° - 25 km/h).....	152
Figura 302. HIC vs tiempo. Usuario patinete eléctrico mujer colisión con bolardo (0° - 20 km/h).....	153
Figura 303. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. (patinete eléctrico usuaria femenina – ángulo 10 °)	153
Figura 304. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. (patinete eléctrico).....	154
Figura 305. Evolución de la distancia invadida en la calzada en función de la velocidad (patinete eléctrico usuario masculino colisión bolardo).....	154
Figura 306. Evolución de la distancia invadida en la calzada en función de la velocidad (patinete eléctrico usuaria femenina colisión bolardo).....	155
Figura 307. HIC vs tiempo. Ciclista masculino colisión con bolardo (0° - 25 km/h).	156
Figura 308. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. (bicicleta usuario masculino – ángulo 10 °)	157
Figura 309. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. (bicicleta usuario masculino – ángulo 0 °)	157
Figura 310. HIC vs tiempo. Ciclista femenina colisión con bolardo (0° - 5 km/h).	158
Figura 311. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. (ciclista femenina – ángulo 10 °).....	159
Figura 312. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. Ciclista femenina – ángulo 0 °)	159
Figura 313. Evolución de la distancia invadida en la calzada en función de la velocidad (bicicleta usuario masculino colisión bolardo).....	160
Figura 314. Evolución de la distancia invadida en la calzada en función de la velocidad (bicicleta usuaria femenina colisión bolardo)	160
Figura 315. Propuesta de diseño distancias mínimas de resguardo carril bici/calzada caso bordillo.....	162
Figura 316. Propuesta de diseño distancias mínimas de resguardo carril bici/calzada caso bolardo.....	162

2 INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha observado un incremento en la accidentabilidad de usuarios de micromovilidad, toda vez que el número de personas en zonas urbanas que optan por estos medios de transporte ha aumentado significativamente por factores principalmente relacionados con el crecimiento demográfico en las ciudades, el aumento del tráfico y los desafíos que supone el cambio climático. En este sentido, uno de los elementos para analizar es la infraestructura exclusiva para la circulación de este tipo de usuarios, la cual debe estar dispuesta de tal forma que garantice la seguridad, no sólo para ellos, sino también para aquellos con los que interactúan en materia de movilidad.

Dado que las caídas y la colisión contra obstáculos son las principales causas de accidentabilidad de usuarios de bicicleta y patinetes eléctricos, en este documento se lleva a cabo un análisis de las colisiones de estos usuarios con los elementos separadores entre calzada y carril bici. Para ello, se exponen las principales afectaciones físicas mediante simulaciones realizadas con la herramienta informática PC-Crash a partir de diferentes datos de entrada como, la complejidad del usuario, las dimensiones de los vehículos (bicicletas y patinetes eléctricos), las configuraciones y geometría de los elementos separadores, ángulos y velocidades de impacto, definiendo esta última en rangos de 5 km/h hasta 25km/h. Este ejercicio permite analizar la influencia de los elementos separadores en la accidentabilidad e identificar cuáles suponen una menor gravedad en las lesiones en caso de una eventual colisión, aplicando mejoras identificadas para el caso de la red de infraestructura ciclista de la ciudad de Valencia.

En virtud de lo anteriormente expuesto, es preciso indicar que, con los resultados producto del análisis en mención en el presente trabajo, se genera información que aporta al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible para la Agenda 2030, ya que algunos de estos se relacionan directamente con la mitigación de accidentes y el incentivo del uso de medios de transporte más sostenibles y amigables con el medio ambiente:

- **Objetivo 3 – Salud y Bienestar:** Se abarcan metas relacionadas con el fortalecimiento de la salud mental y el bienestar (Naciones Unidas, s. f.). La implementación de medidas que promuevan la seguridad de los usuarios de micromovilidad incide positivamente en la reducción de accidentes y, por ende, en la preservación de la salud física y mental de las personas.
- **Objetivo 11 – Ciudades y Comunidades Sostenibles:** Se trazan metas que buscan un desarrollo urbano inclusivo con acceso, entre otros servicios, a un sistema de transporte seguro, asequible, accesible, eficiente y sostenible para todos y todas. (Naciones Unidas, s. f.). La instauración de infraestructura para micromovilidad segura incentiva su uso sin limitar edades, género ni condición física.
- **Objetivo 13 – Acción por el Clima:** Las metas están enfocadas en reducir de forma sustancial, rápida y sostenida las emisiones de gases efecto invernadero - G.E.I

(Naciones Unidas, s. f.). Lo cual se vería beneficiado al promover medios de transporte sostenibles como la bicicleta y el patinete eléctrico, contribuyendo así a la disminución de la huella ambiental asociada al transporte convencional.

De otra parte, es esencial destacar casos de éxito en cuanto a la inversión en infraestructura ciclista por parte de diferentes ciudades de la Unión Europea, cuya dinámica y mejora se convierte en un referente.

Países como Polonia, Bélgica, Francia, Italia, Hungría y, en particular, España, han implementado medidas significativas para mejorar la movilidad urbana. Un ejemplo destacado es la ciudad de Valencia, donde se planificó y desarrolló una densa red de carriles bici en el centro. Esta iniciativa aumentó significativamente el volumen diario de ciclistas y redujo sustancialmente el tráfico motorizado. Según la guía mencionada, esto representa una respuesta efectiva a una de las principales problemáticas de movilidad que enfrentan muchas ciudades mediterráneas. (EU Cycle - Interreg Europe, 2023).

Es así como, este trabajo no solo busca mejorar la seguridad de los usuarios de micro movilidad, sino también contribuir al logro de metas globales orientadas hacia un futuro más sostenible, seguro y equitativo.

3 OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es estudiar la influencia de los elementos separadores de los carriles bici en las consecuencias de los accidentes producidos por una colisión con estos. Para su consecución es necesario considerar los siguientes objetivos secundarios:

- Utilizar la herramienta informática PC-Crash, utilizada usualmente para la reconstrucción de accidentes y simulación de los mismos en el ámbito de la micromovilidad.
- Simular y caracterizar las caídas de usuarios de micromovilidad producto de colisiones con los elementos separadores.
- Analizar las consecuencias de los accidentes simulados con la herramienta PC-Crash.
- Establecer recomendaciones en el diseño y operación de carriles bici con elementos separadores.

4 ESTADO DEL ARTE

A través de los años las ciudades se han enfrentado a desafíos en cuanto a la movilidad debido a factores como el crecimiento demográfico, el incremento del tráfico y los impactos del cambio climático. Esta situación ha llevado a las personas a explorar alternativas de transporte que sean económicas, prácticas y cómodas. Por lo que, en los últimos años ha habido un notable aumento en la cantidad de usuarios que optan por la micromovilidad.

Ahora bien, ¿qué se entiende por micromovilidad?, es un término utilizado para asociar los vehículos ligeros con una masa de no más de 350 kg (771 lb) y un diseño de velocidad no mayor a 45 km/h. Esta definición limita la energía cinética a 57 kJ, lo cual es cien (100) veces menor que la energía cinética alcanzada por un auto compacto a su mayor velocidad. Esta definición incluye vehículos con tracción humana y eléctrica como bicicletas, e-bikes, scooters, e-scooters, skateboards, tablas de equilibrio de una rueda, y microvehículos de cuatro (4) ruedas. (International Transport Forum, 2020).







	Powered Bicycle	Powered Standing Scooter	Powered Seated Scooter	Powered Self-Balancing Board	Powered Non-Self-Balancing Board	Powered Skates
						
Center column	Y	Y	Y	Possible	N	N
Seat	Y	N	Y	N	N	N
Operable pedals	Y	N	N	N	N	N
Floorboard / foot pegs	Possible	Y	Y	Y	Y	Y
Self-balancing ²	N	N	N	Y	N	Possible

Figura 1. Tipos de vehículos de micromovilidad

Fuente: (Society of Automotive Engineers - SAE International, s. f.).

Dado que los análisis entorno al presente trabajo se realizaron tomando como caso de estudio la ciudad de Valencia, se indaga a cerca de la normativa que rige la circulación de los tipos de vehículos presentados en la Figura 1, en España, como también la accidentabilidad en esta misma ubicación. Además, es importante destacar las investigaciones que se han realizado en materia. Esta información se presenta a continuación.

4.1 NORMATIVA DE CIRCULACIÓN VEHÍCULOS DE MICROMOVILIDAD EN ESPAÑA

La información disponible relacionada con la normativa vigente en España, que rige la circulación, específicamente de bicicletas y patinetes eléctricos, se relaciona a continuación:

4.1.1 Circulación de patinetes eléctricos

Una de las más recientes normativas estipuladas por la Dirección General de Tráfico – DGT (Dirección General de Tráfico - DGT, 2024) gira entorno a estándares de calidad y seguridad con los cuales deben contar los patinetes eléctricos según Resolución del 12 de

enero de 2022, la cual establece que a partir del 22 de enero de 2024 no podrán comercializarse patinetes eléctricos que no cumplan con el manual de características específicas lo que incluye un certificado de circulación y una identificación, previo a la comercialización del patinete eléctrico. Además, la Resolución en mención, indica que los patinetes eléctricos antiguos podrán seguir circulando hasta el 22 de enero de 2027. (Dirección General de Tráfico - DGT, 2024).

Sumado a lo anterior, los patinetes eléctricos se han categorizado jurídicamente como vehículos, lo que supone prohibiciones en cuanto a la invasión de las aceras, consumo de alcohol, uso de auriculares, además no se permite su circulación por carreteras y el límite de velocidad es de 25 km/h. (Dirección General de Tráfico - DGT, 2024)

Ahora bien, la DGT establece como uno de los pilares más importantes en la Resolución que se ha cristalizado en enero del año 2024, la educación, ya que no todos los usuarios de patinete eléctrico comprenden la responsabilidad de conducir este tipo de vehículo a una velocidad de 25 km/h y sumado a esto, una cifra considerable de estos, la comprenden personas muy jóvenes. (Dirección General de Tráfico - DGT, 2024).

4.1.2 **Circulación de bicicletas**

Los carriles bici deben ser utilizados si la ruta cuenta con estos, de lo contrario se permite la circulación por el arcén o al costado derecho de la calzada. Con relación a los elementos de seguridad, se encuentra el casco (obligatorio para menores de 16 años y en general para circulación en vías interurbanas) y dependiendo de las condiciones de luz, gafas protectoras, luces de visibilidad y chaleco reflectante. Además, se prohíbe expresamente el uso del teléfono móvil, de auriculares y estar bajo efectos del alcohol mientras se conduce. También se indica en cuanto a pasajeros, deben ser menores de 7 años y disponer de sillas homologadas y en este caso, el conductor debe ser mayor de edad. (Dirección General de Tráfico - DGT, 2022b)

Existen normas de circulación que incluyen lineamientos para realizar maniobras básicas en ciudad y vías interurbanas, como por ejemplo en grupo, es posible circular como máximo en columna de dos (Dirección General de Tráfico - DGT, 2022a), entre otros parámetros que expone la entidad en mención en materia de circulación de ciclistas.

4.2 **NORMATIVA DE CIRCULACIÓN VEHÍCULOS DE MICROMOVILIDAD EN VALENCIA**

4.2.1 **Circulación de patinetes eléctricos**

En general, lo establecido a nivel de Comunidad Autónoma para el caso de Valencia, en materia de circulación de vehículos de movilidad personal - VMP no difiere en gran medida de lo que se ha definido para el caso de España, sin embargo, se recalcan algunas de las medidas, de acuerdo con la Ordenanza de movilidad para los municipios del área metropolitana de Valencia (Ordenanza tipo de movilidad para los municipios integrantes del área metropolitana de Valencia, s. f.)

- La edad para circular en patinetes eléctricos por vías y espacios públicos se establece como mínimo a 16 años.
- Se prohíbe el uso de auriculares y móviles mientras se esté circulando en el vehículo (patinete eléctrico).
- No se permite circular con mayor cantidad de ocupantes a la que está establecida en el diseño del vehículo.
- Se debe circular por la derecha en carriles bici y calzadas autorizadas.
- En el caso de circulación por un carril bici a nivel de acera, la velocidad tendrá que ser como máximo 15km/h. Y el espacio de circulación para peatones en la acera, no puede ser invadido.
- Sólo en el carril bici el patinete eléctrico tiene prioridad sobre los peatones, a excepción del cruce de peatones.
- En calzadas se prohíbe su circulación por túneles que no dispongan de carril bici, salvo existencia de señalización.
- Utilizarán preferentemente el carril derecho. Si existen carriles reservados, circularán por el carril adyacente.

Como recomendaciones específicas a nivel de C.A, se define según la Ordenanza (Ordenanza tipo de movilidad para los municipios integrantes del área metropolitana de Valencia, s. f.):

- Registro en el Ayuntamiento: En caso de robo, accidente o estacionamiento indebido, es importante que los patinetes eléctricos se encuentren registrados en el Ayuntamiento, brindando información del vehículo como, marca, modelo y número de serie.
- Seguro de responsabilidad civil: Para casos en los cuales se requiera cubrir daños a terceros en caso de accidente.

4.2.2 **Circulación de bicicletas**

En cuanto a la circulación de usuarios de bicicleta, se establece para la Comunidad Valencia lo siguiente, según la Ordenanza (Ordenanza tipo de movilidad para los municipios integrantes del área metropolitana de Valencia, s. f.):

- Tienen prioridad frente a los vehículos motorizados, si: circulan por un carril bici y/o ciclocalles, y en giros por parte de los vehículos motorizados. En los demás casos, se aplican las normas generales de prioridades de paso.
- Se prohíbe realizar maniobras que dificulten el control de la bicicleta, como circular sobre una rueda, sujetarse de vehículos en movimiento, transportar objetos pesados y/o sobredimensionados.
- Se prohíbe la circulación con auriculares reproductores de sonido.
- Se prohíbe el uso de móviles al momento de la conducción.
- Sólo en el carril bici las bicicletas tienen prioridad sobre los peatones, a excepción del cruce de peatones.
- Se prohíbe la circulación por el carril reservado al transporte público, salvo tramos con sobrecancho.
- En calzadas se prohíbe su circulación por túneles que no dispongan de carril bici, salvo existencia de señalización.

- Preferentemente su circulación debe ser por el carril derecho, y de requerirse otros carriles en la calzada, realizar maniobras con precaución.

Como recomendaciones específicas a nivel de C.A, se define según la Ordenanza (Ordenanza tipo de movilidad para los municipios integrantes del área metropolitana de Valencia, s. f.):

- Registro en el Ayuntamiento: En caso de robo, accidente o estacionamiento indebido, es importante que los patinetes eléctricos se encuentren registrados en el Ayuntamiento, brindando información del vehículo como, marca, modelo y número de serie.
- Seguro de responsabilidad civil: Para casos en los cuales se requiera cubrir daños a terceros en caso de accidente.

4.3 **ACCIDENTABILIDAD DE LOS VEHÍCULOS DE MICROMOVILIDAD EN ESPAÑA**

4.3.1 **Patinetes eléctricos**

En lo que respecta a información histórica, se dispone de información relacionada con accidentes mortales y lesionados graves que circulaban en patinetes eléctricos a partir del año 2020, publicada por la DGT (Dirección General de Tráfico - DGT, 2022a), y su evolución se observa en la Figura 2.

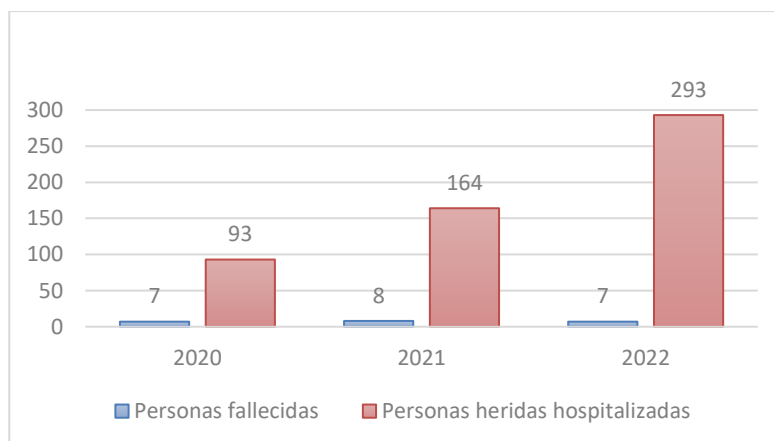


Figura 2. Evolución de personas fallecidas y heridas hospitalizadas en patinete eléctrico en vías urbanas. España
Fuente: Elaboración propia.(Dirección General de Tráfico - DGT, 2022a)

De acuerdo con las cifras presentadas en la Figura 2 y con análisis realizados por la Fundación MAPFRE en colaboración con CESVIMAP, Centro I+D de dicha organización (Fundación MAPFRE/CESVIMAP, 2023), es preciso indicar que, si bien la cifra correspondiente a los fallecidos en patinete eléctrico entre el año 2020 y 2022 no ha evidenciado notables fluctuaciones, los heridos hospitalizados han aumentado de forma muy considerable, lo cual representa que este comportamiento tiende a mantenerse, si no se toman las medidas pertinentes.

Ahora bien, otro de los parámetros para analizar, es la forma en que se han producido los accidentes, toda vez que esto permite tener un acercamiento más detallado en cuanto al comportamiento de estos usuarios.

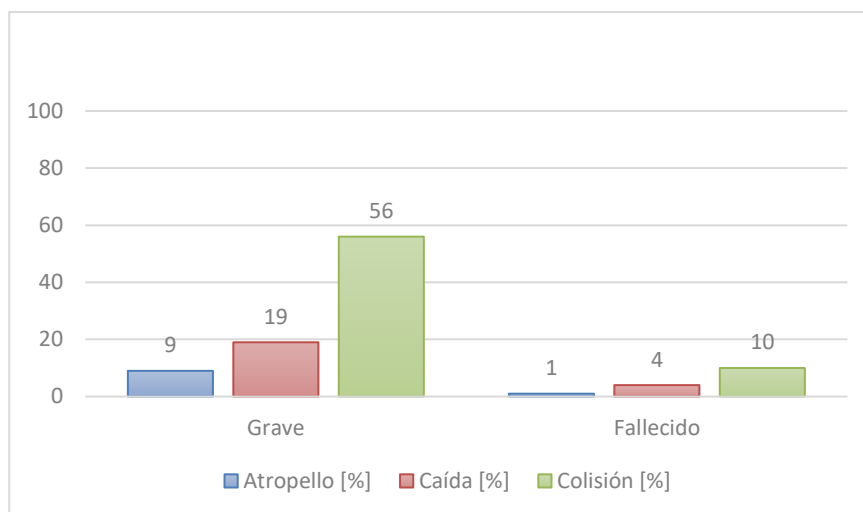


Figura 3. Porcentaje de lesionados graves y/o fallecidos por modo de ocurrencia en accidentes con patinete eléctrico en el año 2023, España.

Fuente: Elaboración. (Fundación MAPFRE/CESVIMAP, 2023)

Las cifras presentadas en la Figura 3 muestran que los siniestros se dan, en su mayoría, debido a una colisión con otros vehículos y, en segundo lugar, los afectados son producto de caídas. De otra parte, agregando que en general, según el estudio realizado por la Fundación MAPFRE (Fundación MAPFRE/CESVIMAP, 2023), el 54% de los accidentes registrados en este medio de transporte se generan en las calzadas de las vías urbanas. Esto permite inferir que es muy importante analizar y tomar acciones en el espacio por el cual circulan estos usuarios en las calzadas, por lo cual este tipo de infraestructura toma relevancia.

De otra parte, los accidentes de usuarios que se desplazan en patinete eléctrico van en aumento y como consecuencia, una de las típicas lesiones son impactos en la cabeza, según se expone en el estudio llevado a cabo por parte de investigadores de universidades y laboratorios en Francia y Canadá, el cual además se enfoca en el análisis de este tipo de lesiones y en el desempeño del casco que se usa comúnmente como equipo de protección para circular en este medio de transporte.

En el estudio en mención, se desarrolló un modelo de elementos finitos utilizando un prototipo de usuario Hybrid III percentil 50th, un patinete tipo siguiendo las especificaciones de uno de los modelos Xiaomi, al ser de la marca más utilizada y se evaluaron las lesiones y la secuencia de las caídas para usuarios con y sin casco colisionando contra un bordillo a diferentes velocidades y ángulos de impacto. Para el caso de usuarios sin casco se estudiaron velocidades y ubicaciones de impacto entre la cabeza y el suelo y para usuarios con casco se estudió mediante la reducción de las métricas de lesiones en la cabeza.

Los resultados obtenidos indican que las caídas en patinete eléctrico siempre generaron un impacto oblicuo entre la cabeza y el suelo, con un 78% en la frente, y así mismo, con el uso del casco se redujo la aceleración lineal de la cabeza, pero no la aceleración angular. Es decir, aún con el uso de este tipo de protección las métricas obtenidas indicaron que las lesiones en la cabeza estaban por encima de los límites de lesiones graves. (Wei et al., 2023).

Sumado a lo anterior, según un estudio ortopédico realizado a los pacientes con fracturas tras un accidente en este medio de transporte en el Hospital de Formación e Investigación de Taksim ubicado en el corazón de Estambul, se expone que, los usuarios de patinete eléctrico han aumentado de forma notable, debido a su versatilidad, bajo costo y fácil manejo. Los accidentes con traumas severos relacionados con este medio de transporte también han aumentado, situación que refleja la necesidad de que las autoridades gubernamentales fortalezcan la legislación implementada referente a su uso, ya que se evidencia insuficiencia para abordar la problemática, agregando supervisión a las compañías de renta de este tipo de vehículos. (Kültür, 2023).

4.3.2 **Bicicletas**

De acuerdo con la información disponible publicada por la DGT (Dirección General de Tráfico - DGT, 2022a), relacionada con las cifras de accidentabilidad de ciclistas en zonas urbanas de España, se presenta la Figura 4 y Figura 5.

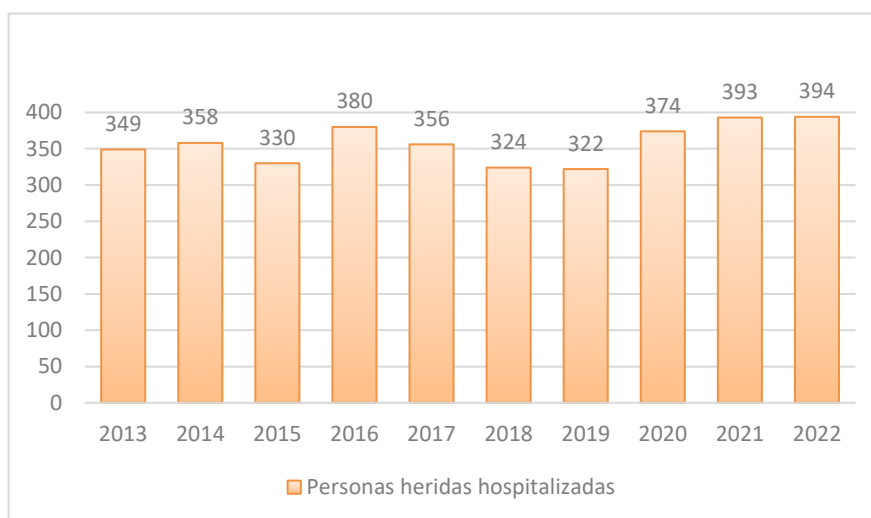


Figura 4. Evolución de personas heridas hospitalizadas en bicicleta en vías urbanas. España
Fuente: Elaboración propia. (Dirección General de Tráfico - DGT, 2022a)

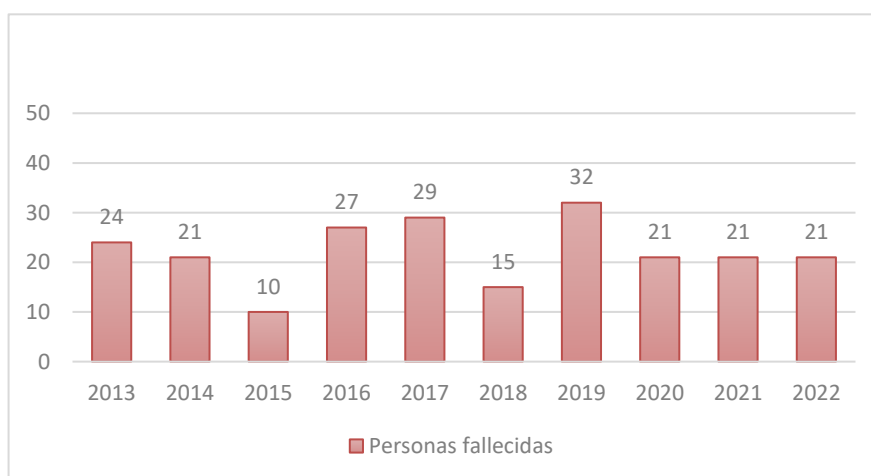


Figura 5. Evolución de personas fallecidas en bicicleta en vías urbanas. España
Fuente: Elaboración propia. (Dirección General de Tráfico - DGT, 2022a)

De acuerdo con la información presentada en la Figura 4 y Figura 5, el número de personas que sufrieron un accidente desplazándose en bicicleta resultando hospitalizadas, va en aumento desde el año 2019. Así mismo, las cifras de víctimas mortales en este mismo medio de transporte no se han logrado disminuir desde el año 2020.

En cuanto a los datos generales presentados por la entidad competente, es preciso resaltar que las personas usuarias de medios vulnerables (bicicletas y patinetes) registran el 50% respecto al total de las personas fallecidas en 2022, representando el 81% de las personas fallecidas en vías urbanas y el 39% de las personas fallecidas en vías interurbanas. (Dirección General de Tráfico - DGT, 2022a).

Ahora bien, de acuerdo con estudios y análisis de accidentes en los cuales se ven afectados los ciclistas sin involucrar otros vehículos, se encuentra un estudio realizado en Suecia en el Laboratorio de Seguridad en Colisiones - VTI Crash Safety Laboratory, el cual se basó en una serie de simulaciones que incluyen principalmente dos escenarios de accidentes en bicicleta; frenadas inesperadas y desplazamiento lateral de la rueda delantera partiendo de diferentes datos de entrada como:

- Tipo de bicicleta: para este estudio se utilizaron cuatro; bicicleta para dama (lady's bicycle), bicicleta urbana (uso diario), bicicleta eléctrica asistida y bicicleta reclinada.
- Velocidad: la simulación de accidentes se realizó con velocidades de 15 y 25 km/h.
- Prototipo de ciclista: se utilizó un dummy Hybrid II percentil 50th.

Con la información anterior, se analizó principalmente dos parámetros cuantificables, la máxima resultante de la aceleración de la cabeza del prototipo medida una vez choca con el suelo y partiendo de estos valores se calculó y analizó el HIC – Head Injury Criterion, con lo cual se concluyó que es posible examinar accidentes de bicicleta que no involucran otros vehículos utilizando pruebas de choque, aunque la configuración es sensible a pequeñas diferencias en los datos de entrada y la variación aleatoria en los valores de impacto en la cabeza resultantes puede ser grande.

Las caídas laterales con las bicicletas detenidas fueron más fáciles de realizar con una buena repetibilidad e indicaron una influencia de la altura del asiento en el impacto en la cabeza. Así mismo, se categorizan las caídas por frenadas inesperadas más severas, ya que en este caso el ciclista caería por encima del manubrio causando un impacto más fuerte en la cabeza en comparación con una caída lateral. (Anna Niska & Wenäll, 2019).

4.4 **ELEMENTOS SEPARADORES**

Existen diferentes tipos de elementos físicos que segregan o separan los carriles exclusivos para usuarios de micromovilidad de las calzadas por las cuales circulan vehículos motorizados. Su principal función es proteger a usuarios más vulnerables de acuerdo con la pirámide invertida de la movilidad mostrada en la Figura 6, estos son, peatones, ciclistas y usuarios de patinete eléctrico, buscando así, mejorar la percepción de un espacio exclusivo para los usuarios en mención.

Además, los elementos separadores pueden variar, siendo los más utilizados, bordillos elevados o divisiones, bolardos, paisajismo o jardineras (U.S Department of Transportation - Federal Highway Administration, 2015). Sin embargo, estos elementos en sí mismos, representan un riesgo para los usuarios de micromovilidad ya que son elementos rígidos que por su material, diseño y disposición pueden agravar los accidentes ocurridos por impactos de usuarios contra estos.

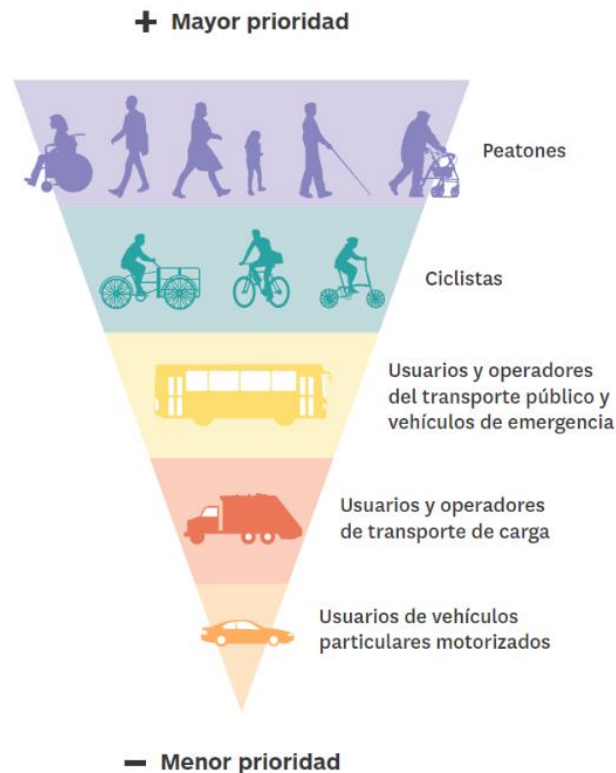


Figura 6. Pirámide invertida de la movilidad
Fuente: (Universidad de Monterrey, 2019)

Ahora bien, existen diferentes tipos de elementos separadores y su diseño se encuentra incluido en diferentes guías por parte de las administraciones de infraestructura en las ciudades, como es el caso de la guía para la Planificación y Diseño de Carriles Ciclistas por la FHWA de los Estados Unidos (U.S Department of Transportation - Federal Highway Administration, 2015). Los separadores que allí se presentan y su respectivo diseño, se expone a continuación.

- **Postes delineadores:** Las principales ventajas se enmarcan en su visibilidad, costo-efectividad y fácil instalación. De otra parte, los desafíos más comunes para las administraciones de infraestructura entorno a este tipo de elementos en un carril bici se relaciona con aspectos como, su mantenimiento, durabilidad y estética.



Figura 7. Postes delineadores

Fuente: (U.S Department of Transportation - Federal Highway Administration, 2015)

- **Bolardos:** Las ventajas y desventajas relacionadas con este tipo de elemento separador son muy similares a las mencionadas en la viñeta anterior correspondiente a los postes delineadores. Sin embargo, dependiendo del distanciamiento entre bolardos, esta forma de segregación puede resultar en un incremento de costos comparado con otras, y adicionalmente, puede no ser apropiada en vías con una velocidad de operación alta.



Figura 8. Bolardos

Fuente: (U.S Department of Transportation - Federal Highway Administration, 2015)

- **Barreras en concreto:** Se resalta su notable durabilidad ya que tienen una larga vida útil y son resistentes, por lo cual requieren menor mantenimiento y además ofrecen una protección robusta. Sin embargo, este tipo de barreras puede resultar menos atractiva operacionalmente al requerir drenaje, limpieza constante y soluciones para vehículos de servicio, así mismo, su flexibilidad es reducida.



Figura 9. Barreras en concreto

Fuente: (U.S Department of Transportation - Federal Highway Administration, 2015)

- **Mediana elevada:** Proporcionan una protección robusta y continua para los carriles bici, pueden mejorar la estética urbana ya que es posible integrar vegetación y también son estructuras duraderas requiriendo menor mantenimiento. Algunas de sus desventajas son altos costos por su construcción e instalación, tienen además flexibilidad y acceso de emergencia limitados, como también dificultades por la acumulación de agua, nieve y/o basuras. Cabe resaltar que, los bordillos montables son una opción en caso de requerirse acceso de vehículos de emergencia.



Figura 10. Mediana elevada

Fuente: (U.S Department of Transportation - Federal Highway Administration, 2015)

- **Carril bici elevado:** Los carriles bici también pueden ser diseñados como una infraestructura elevada bien sea a nivel de la acera o en un nivel intermedio. Si el diseño es a nivel de la acera, será necesaria la instalación de diferentes tipos de pavimentos, demarcaciones, o inclusive elementos segregadores para mantener la separación entre peatones y ciclistas y/o usuarios de patinete. Si se opta por la opción de ubicar el carril bici en un nivel intermedio, serán necesarios bordillos montables para así permitir el acceso a equipamientos de barrido. (U.S Department of Transportation - Federal Highway Administration, 2015).



Figura 11. Carril bici elevado

Fuente: (U.S Department of Transportation - Federal Highway Administration, 2015)

- **Plantaciones:** Este tipo de elemento separador proporciona estética al paisaje urbano, así mismo una barrera vertical sostenible, reduce el ruido, general control de la temperatura y de rápida instalación. Sin embargo, dependiendo de la ubicación, esta opción, como separador, requiere mantenimiento regular, apta clasificación de las especies ya que pueden dificultar eventualmente la circulación y no ser de clima local.



Figura 12. Plantaciones

Fuente: (U.S Department of Transportation - Federal Highway Administration, 2015)

- **Barreras lineales bajas (barreras usadas en aparcamientos):** Una de sus principales características es que no interfieren con la línea de visión tanto de conductores como de usuarios de micromovilidad, además tienen un alto nivel de durabilidad, proporcionan una separación continua, y son una buena solución cuando se dispone de un ancho mínimo de protección. Sin embargo, es importante tener en cuenta que usando el mínimo ancho no se ofrece el mismo nivel de confort y protección debido a su baja altura y a la proximidad que tienen los ciclistas con el tráfico motorizado.



Figura 13. Barreras lineales bajas (barreras usadas en aparcamientos)

Fuente: (U.S Department of Transportation - Federal Highway Administration, 2015)

- **Estacionamientos para vehículos motorizados:** Los vehículos por sí mismos representan una barrera y pueden proporcionar un nivel adicional de protección y confort para los ciclistas. Se requiere como mínimo un ancho de protección de 3 pies $\approx 0,92$ m, para así permitir la apertura de puertas y otras maniobras. Adicionalmente, elementos verticales como postes delineadores, deberían complementar esta opción. Barreras que obstruyan la apertura de puertas y representen riesgo de tropiezos, deben evitarse en este caso. (U.S Department of Transportation - Federal Highway Administration, 2015).

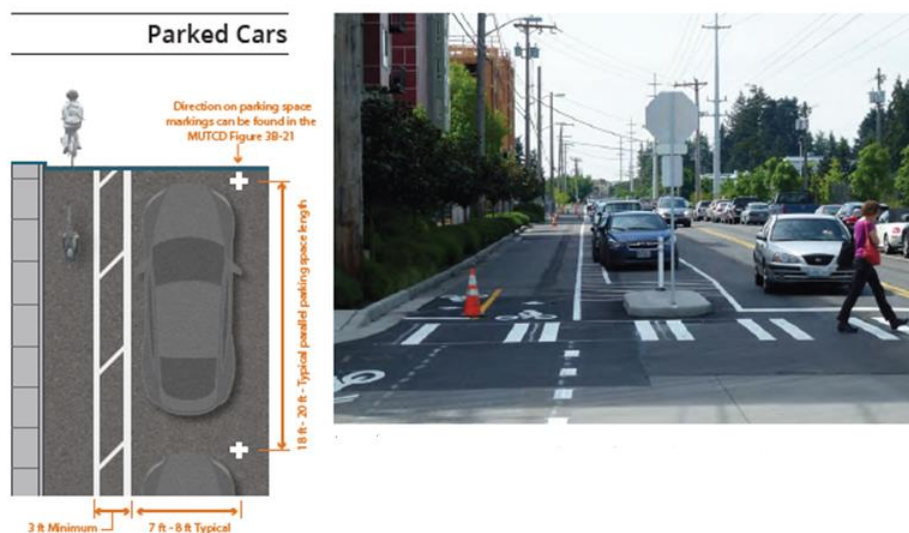


Figura 14. Estacionamientos para vehículos motorizados

Fuente: (U.S Department of Transportation - Federal Highway Administration, 2015).

- **Combinación de elementos separadores:** Otra de las opciones utilizadas por las administraciones de infraestructura incluye la combinación de los tipos de elementos separadores mencionados en las viñetas anteriores, ya que, de acuerdo con las condiciones del entorno, estas pueden complementarse entre sí.

Ahora bien, existen otras guías de diseño para la infraestructura exclusiva de usuarios de micromovilidad, y en este sentido, puede haber ciertas variaciones a los elementos separadores presentados en las viñetas anteriores, como es el caso de la Guía de Recomendaciones Para el Diseño de Infraestructura Ciclista por el Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana del Gobierno de España (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2023), en la cual se clasifican los elementos en mención en continuos y discontinuos.

Protección de forma continua: este tipo de elementos suelen tener alturas variables y al ser continuos dificultan sustancialmente que el carril bici sea invadido por otros actores de la movilidad, como vehículos motorizados e inclusive peatones.

Los tipos de separadores continuos más comunes son las barreras de hormigón o “new jersey” en zonas interurbanas y los tipo “aleta de tiburón” en zonas urbanas. (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2023).

- **Barrera fija:** las principales ventajas que brinda este tipo de elemento separador es el alto nivel de protección a los usuarios de micromovilidad, evitando invasiones por parte de vehículos motorizados. Sin embargo, el coste de instalación es alto, también representan menor permeabilidad para ingreso de vehículos de emergencia y dificultad de maniobra para evadir obstáculos en el carril bici por parte de los usuarios. Así mismo, es preciso resaltar que este tipo de elemento separador también se propone en la guía para la Planificación y Diseño de Carriles Ciclistas por la FHWA mostrado en la Figura 9.

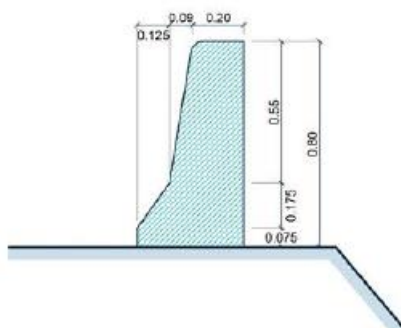


Figura 15. Barrera fija continua

Fuente: (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2023)

Protección de forma discontinua: la principal característica de este tipo de separadores es la distancia entre sí, lo cual facilita la accesibilidad peatonal, y con una separación adecuada (superior a 1,5 m) permite que los ciclistas maniobren por dentro y fuera del carril bici. Los más comunes son los tipo hitos “H-75” y las divisiones de baja altura con sección transversal redondeada.

- **Elementos de perfil longitudinal curvo:** su diseño permite que sean fácilmente sobrepasados por usuarios de micromovilidad, lo que facilita la maniobrabilidad, pero a su vez esto representa una desventaja, ya que el carril bici puede ser invadido por vehículos motorizados (incluidos los vehículos de emergencia, a los cuales se les permite este tipo de maniobras). De otra parte, se

destaca el bajo costo en cuanto a su instalación y la mitigación en la gravedad de las lesiones en caso de impacto por parte de algún usuario. Su disposición puede ser paralela oblicua (recomendación 15°) o paralela al eje del carril.

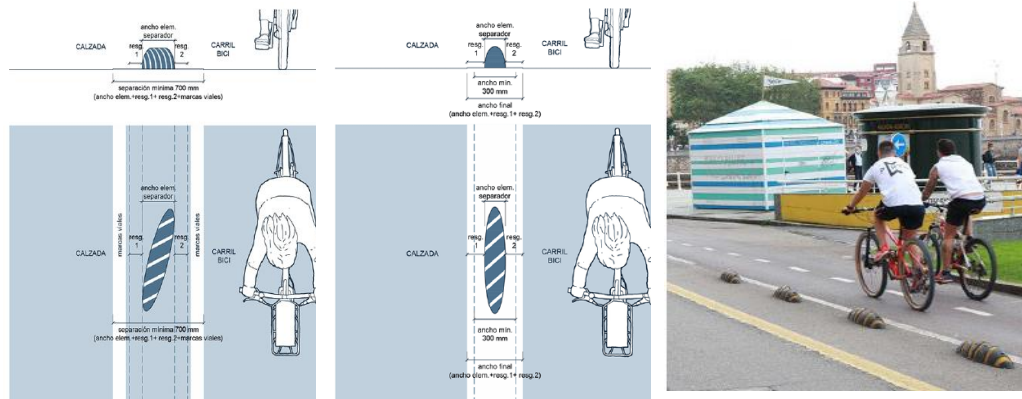


Figura 16. Elemento separador de perfil longitudinal curvo
Fuente: (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2023)

- **Elementos de perfil longitudinal rectangular:** esta puede ser una opción versátil ya que es usual ubicar piezas de perfil transversal asimétrico en la cara adyacente al carril bici, lo que facilita que el separador sea sobrepasado por ciclistas y por la cara hacia la calzada, al mantener una geometría rectangular, se dificulta la invasión por parte de vehículos motorizados. Las ventajas y desventajas son similares a las ya mencionadas en la viñeta anterior.



Figura 16. Elemento de perfil longitudinal rectangular
Fuente: (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2023)

- **Separadores puntuales $h > 15\text{cm}$:** al tener una altura mayor genera, por un lado, dificultad de invasión por parte de los vehículos motorizados y de otra parte, favorece la gravedad de las lesiones en caso de impacto por parte de usuarios de micromovilidad. Representan mayor coste de instalación y mantenimiento.



Figura 17. Separadores puntuales $h > 15\text{cm}$
Fuente: (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2023)

- Hitos cilíndricos / bolardos: pueden ubicarse espaciados para segregar, pero usualmente se utilizan para reforzar las separaciones ya instaladas con elementos de altura baja de perfiles longitudinal redondo y rectangular. Si son flexibles, el carril bici puede estar expuesto a una invasión por vehículo motorizado de una forma más sencilla y por otro lado, también mitiga la gravedad de las lesiones por impactos y/o colisiones por parte de los usuarios, caso contrario si se trata de un hito de material rígido. De otra parte, la guía para la Planificación y Diseño de Carriles Ciclistas por la FHWA también propone este tipo de elementos como elementos separadores (ver Figura 7 y Figura 8).



Figura 18. Hitos cilíndricos / bolardos
Fuente: (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2023)

Otro tipo de elemento separador discontinuo de baja altura es el de sección transversal rectangular, comúnmente conocido como “bordillo”. Este, se presenta en la guía para la Planificación y Diseño de Carriles Ciclistas por la FHWA como “parking stops” (ver Figura 13) ya que es comúnmente usado para tal función. Sin embargo, presenta ciertas características que permiten su utilización como elemento separador.

- Elementos de perfil transversal rectangular: a diferencia de los elementos de perfil longitudinal curvo, estos dificultan la invasión de vehículos motorizados al

carril bici y de otra parte, su discontinuidad permite la maniobrabilidad de los usuarios de micromovilidad. Su función como ya se mencionó en otro tipo de elementos, es segregar el flujo vehicular de usuarios de micromovilidad.



Figura 19. Bordillo de sección rectangular

Fuente: Elaboración propia

- **Bandas de servicio para aparcamiento como elemento separador:** cuando en las vías urbanas una calzada se ha dispuesto con carril bici y el diseño de la sección transversal de la vía incluye banda de servicio, la cual, usualmente es destinada para el aparcamiento de vehículos motorizados, esta en sí misma representa un elemento separador entre la calzada y carril bici. Sin embargo, es imprescindible tener en cuenta las denominadas distancias de resguardo en la banda de servicio y el carril bici, ya que la apertura de puertas demanda cierto nivel de espacio, según se muestra en la Figura 20.

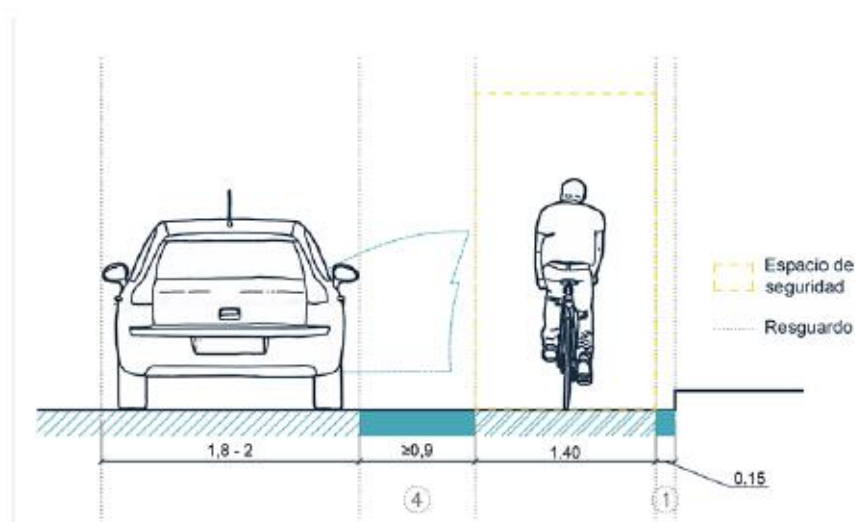


Figura 20. Resguardo entra la banda de servicio (aparcamiento) y carril bici

Fuente: (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2023)

De acuerdo con los tipos de elementos separadores presentados anteriormente, es preciso resaltar que, en el ámbito urbano, la Guía de Infraestructura Ciclista recomienda que los elementos separadores para protección de usuarios de micromovilidad deben definirse en función de la intensidad, velocidad del tráfico motorizado, para así disponer de la infraestructura para usuarios de micromovilidad más adecuada al caso específico de cada entorno.

Así mismo, la elección de este tipo de elementos está directamente relacionada con factores como: presencia de aparcamientos en la calzada, ancho total de la calle y la zona de influencia, durabilidad, estética, velocidad del tráfico, acceso a vehículos de emergencia, mantenimiento, entre otros. (Portland State University, 2014).

4.5 INFLUENCIA DE ELEMENTOS SEPARADORES EN LA ACCIDENTABILIDAD

Un análisis realizado entorno al costo hospitalario atribuible a los accidentes de ciclistas en los que no hay otro vehículo involucrado en Dinamarca, expone “...si bien el cambio de viajes cortos en automóvil a viajes en bicicleta ha disminuido el número de muertes de ciclistas causadas por accidentes entre automóviles y bicicletas, el número de muertes de ciclistas excluyendo los vehículos de motor ha aumentado”.(Olesen et al., 2021).

Esto sugiere que, hay otros factores en la accidentabilidad que no están relacionados con la forma en que los vehículos motorizados interactúan con los usuarios de micromovilidad, entre estos se encuentran el comportamiento mutuo de estos usuarios y el diseño y estado de la infraestructura dispuesta para facilitar su desplazamiento. En lo relacionado con la infraestructura, según un estudio realizado a través de encuestas a personas afectadas en accidentes en bicicleta en Suecia, es preciso resaltar que, en general la construcción y el diseño de carriles bici es deficiente, sumado a esto, los bordillos constituyen un factor importante que contribuye notablemente con la generación de los accidentes de ciclistas. (Ohlin et al., 2019)

Uno de los estudios y análisis incluidos en la International Cycling Safety Conference se centra en la modelización de accidentes de usuarios de micromovilidad, en el cual se destaca la importancia de la infraestructura exclusiva por la cual circulan los usuarios en mención, toda vez que en sí misma representa un riesgo, como es el caso de los elementos separadores entre calzada y carril bici, con los cuales se generan principalmente dos consecuencias, lesiones en la cabeza e invasión en la calzada por parte del usuario de micromovilidad afectado, parámetros que son cuantificables haciendo uso de herramientas informáticas, y como resultado del estudio en particular se indica; en general, montar en bicicleta es más seguro que montar en un patinete eléctrico ya que el HIC-Head Injury Criterion observado es más bajo. Sin embargo, al colisionar con un bordillo pequeño (continuo o no), la bicicleta sobre pasa el bordillo gracias al tamaño de sus ruedas e invade mayor distancia de la calzada. Esta situación aumenta el riesgo de ser atropellado. (Pérez-Zuriaga et al., 2023)

En virtud de lo anteriormente expuesto, es preciso resaltar la importancia de la infraestructura ciclista, su inversión y mantenimiento por parte de las administraciones competentes, ya que su influencia en los accidentes de usuarios de micromovilidad es directa.

5 METODOLOGÍA

Con el propósito de obtener información relacionada con parámetros cuantificables referentes a la severidad de los accidentes que puede afectar a los usuarios de bicicletas y patinetes eléctricos, en particular, en colisiones con los elementos separadores, se llevó a cabo simulaciones empleando el programa informático PC-Crash, las cuales se basaron en la modelización de diferentes escenarios que permitieran exponer la secuencia de las caídas y su gravedad.

5.1 FLUJO DE TRABAJO

Para ejecutar el proceso descrito, se siguió un flujo de trabajo en el software el cual se aplicó a los usuarios, vehículos y escenarios que se detallan en capítulos siguientes del presente trabajo.

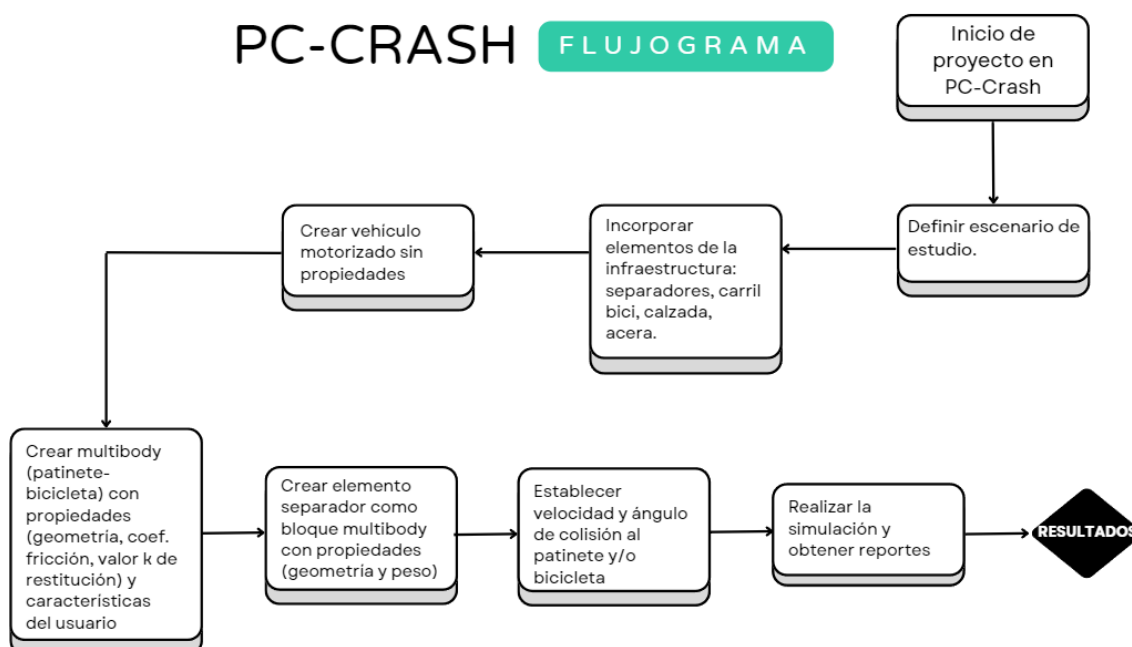


Figura 21. Flujo de trabajo software PC-Crash
Fuente: Elaboración propia.

5.2 SOFTWARE PC-CRASH

Es una herramienta informática creada en 1990 por la empresa DSD (Dr. Steffan Datentechnik GmbH) en Linz, Austria. Diseñada para la reconstrucción de accidentes. Se basa principalmente en modelos de trayectorias y colisión, los cuales rigen la dinámica previa, durante y posterior al impacto de los vehículos en estudio, permitiendo su análisis a través de simulaciones en avance (paso del tiempo positivo) o en retroceso (paso del tiempo negativo). (PC Crash Software, 2024).

De otra parte, con el fin de simular el comportamiento del cuerpo humano en la colisión por medio del software, se utiliza el modelo multibody, el cual consiste en configuraciones de

elipsoides que están interconectadas y el efecto que se produzca sobre una se transfiere a las demás partes del cuerpo. Cabe resaltar que, este modelo está validado por la Sociedad de Ingenieros del Automóvil – Society of Automotive Engineers, Inc (Society of Automotive Engineers - SAE International, s. f.).

A continuación, se exponen los modelos en mención, según se presenta en el manual técnico del software (PC Crash Software, 2024).

5.2.1 **Modelo de trayectorias**

Este tipo de modelo incluye dos conceptos para simular el movimiento del vehículo en estudio, comprendido por las simulaciones en avance y en retroceso.

Para **simulaciones en avance**, en el modelo cinemático, las fuerzas dinámicas del vehículo no están tenidas en cuenta, asumiendo una aceleración principal, con base en la Ecuación 1:

$$a = g \frac{\sum F_{x''i}}{\sum F_{z''i}}$$

donde:

g : aceleración de la gravedad.

$F_{x''i}$: fuerza de frenado de cada rueda.

$F_{z''i}$: carga normal de cada rueda.

Ecuación 1. Aceleración modelo cinemático

Para el caso del modelo cinético (por defecto), se tienen en cuenta todas las fuerzas dinámicas que actúan sobre el vehículo en estudio, y en este sentido, la simulación tiene lugar de acuerdo con lo siguiente:

- Las fuerzas laterales y longitudinales de los neumáticos se calculan a partir del ángulo de deslizamiento lateral y las fuerzas de frenado o aceleración.
- La aceleración del centro de gravedad y las aceleraciones rotacionales se calculan en función de las fuerzas externas. Estas están definidas en el sistema de coordenadas local (relacionado con el vehículo).
- Las aceleraciones se transforman luego del sistema de coordenadas local al sistema global.
- Las ecuaciones de movimiento se integran numéricamente durante un paso de tiempo predefinido (por defecto = 5 ms).
- Se calcula el cambio de velocidad y las nuevas coordenadas del centro de gravedad.
- Se calculan las nuevas cargas de los neumáticos para todas las ruedas, basadas en los parámetros de la suspensión

Para **simulaciones en retroceso**, el modelo cinemático es idéntico al aplicado para las simulaciones en avance, sin embargo, es pertinente aclarar que, para este caso, los cálculos se basan en el paso del tiempo negativo. En lo que respecta al modelo cinético, se tienen en cuenta algunas consideraciones, debido a la condición de “no linealidad” de las ecuaciones

aplicadas, ya que pueden existir varias soluciones que cumplen con un mismo límite y/o con unas mismas condiciones, por lo cual se requiere encontrar una físicamente posible, y en este sentido el software entrega un buen resultado en dos casos, según se presenta en el manual del software:

- Vehículo en deslizamiento: Para este escenario, el modelo opera óptimamente únicamente cuando las ruedas del vehículo están bloqueadas. En caso contrario, el modelo se vuelve extremadamente sensible, ya que incluso pequeñas variaciones en el ángulo de deslizamiento lateral pueden provocar cambios notables en la dirección de las fuerzas ejercidas sobre las ruedas parcialmente frenadas.
- Conducción del vehículo: Este modelo opera efectivamente solo cuando ninguna de las ruedas del vehículo está deslizándose, fundamentándose en un algoritmo predictor-corrector. Desde el instante de tiempo actual, se establecen los valores asumidos del paso previo. A partir de esta hipotética posición, se lleva a cabo una simulación hacia adelante (paso predictor). Posteriormente, en una segunda etapa, se contrasta el resultado de dicha simulación con la posición correcta, corrigiendo las suposiciones basadas en las discrepancias (paso corrector). Este proceso se repite hasta minimizar la diferencia entre la posición calculada y la posición correcta. No obstante, PC-Crash no garantiza que en todas las circunstancias se pueda realizar una simulación inversa precisa.

Ahora bien, dentro del modelo de trayectorias es preciso resaltar otros parámetros que son relevantes para las simulaciones relacionados con las fuerzas externas que afectan al vehículo en estudio, además de aquellas producidas por la colisión. Estas fuerzas externas son:

- Fuerzas en los neumáticos: estas son principalmente la fuerza normal, lateral y longitudinal.
- Resistencia del aire.
- Gravedad.
- Fuerzas de enganche del remolque. (no aplicable al presente estudio)
- Fuerzas de contacto multibody.

Otro aspecto importante que comprende el modelo de trayectorias es el sistema de coordenadas, y para simplificar las definiciones geométricas, se utilizan tres tipos de sistemas de coordenadas. El sistema de coordenadas global fijo x_i , un segundo sistema x'_i que está conectado al vehículo y un tercer sistema x''_i conectado a cada una de las ruedas del vehículo.

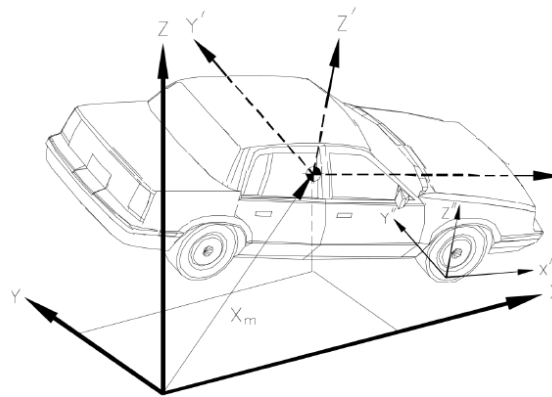


Figura 22. Sistemas de coordenadas PC-Crash

Fuente: (PC Crash Software, 2024)

5.2.2 **Modelo de colisión**

El modelo de impacto predeterminado en PC-Crash es un modelo de 2 o 3 dimensiones basado en el momento que utiliza la restitución en lugar de los coeficientes de aplastamiento o rigidez del vehículo. Este enfoque supone un intercambio de las fuerzas de impacto en un punto único durante un paso de tiempo infinitesimal, conocido como "punto de impulso". En lugar de analizar las fuerzas de impacto a lo largo del tiempo, se considera únicamente la integral de la curva fuerza-tiempo, es decir, el impulso.

Asimismo, el modelo de impacto facilita el cálculo de los parámetros post-impacto una vez definida la fase pre-impacto (velocidades y posiciones).

De acuerdo con la definición de Newton, un impacto se puede dividir en dos etapas: la etapa de "compresión" y la etapa de "restitución". En un impacto, al concluir la etapa de compresión, las velocidades de ambos vehículos en el punto de contacto son iguales. Debido a la elasticidad de las estructuras de los vehículos, estos se separarán nuevamente. El coeficiente de restitución se define como la relación entre el impulso durante la restitución y el impulso durante la compresión.

5.2.3 **Modelo multibody**

En la simulación de colisiones de accidentes de tráfico con programas de simulación cinética en 3D, los vehículos motorizados se suelen tratar como cuerpos rígidos. Esta simplificación es adecuada para modelar colisiones entre vehículos, entre vehículos y remolques, y entre vehículos y obstáculos rígidos como árboles o paredes. No obstante, esta aproximación no es precisa para colisiones que involucren a peatones, ocupantes u objetos pequeños con múltiples componentes. Para obtener resultados más precisos, es necesario representar a los peatones y muchos otros objetos como sistemas multibody.

Un sistema multibody es un conjunto de cuerpos rígidos conectados por articulaciones. Con este enfoque, los impactos entre vehículos y peatones, así como con otros sistemas multibody, se pueden modelar con la misma facilidad que las colisiones entre vehículos.

Además, el uso de sistemas multibody permite correlacionar las lesiones de peatones y ocupantes con las áreas de daño del vehículo.

El modelo puede adaptarse a diferentes estaturas de peatones (tamaño y masa) y a diversas condiciones iniciales (de pie, caminando, corriendo). La forma del vehículo influye significativamente en la dinámica del peatón, por lo que el modelo permite el uso de distintas configuraciones de vehículos.

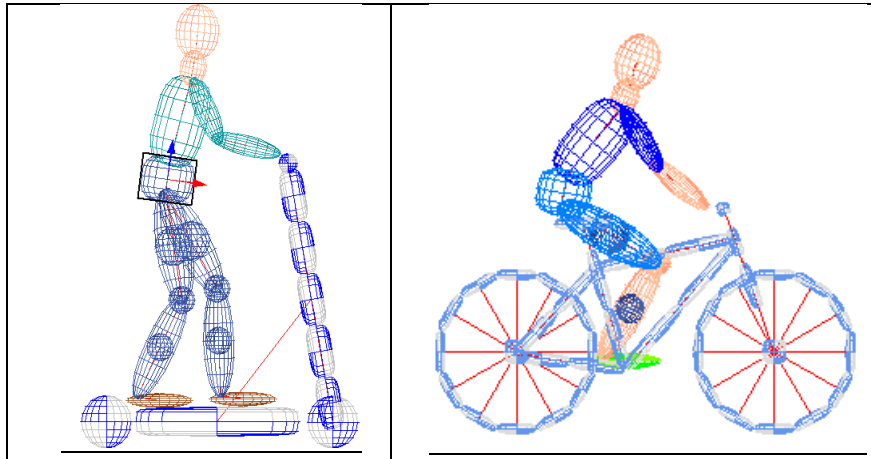


Figura 23. Visualización modelo multibody usuarios de patinetes eléctricos y bicicletas

De acuerdo con la Figura 23, los segmentos (elipsoides) del cuerpo del peatón en un sistema multibody (como la cabeza, el torso, la pelvis, etc.) están conectados por articulaciones pivotantes. Cada segmento posee diversas propiedades, tales como geometría, masa, rigidez de contacto y coeficientes de fricción. La geometría de cada segmento se define utilizando un elipsoide general de grado n .

La cantidad de segmentos y articulaciones empleadas afecta el tiempo requerido para los cálculos. Se necesitó hallar un equilibrio entre el tiempo de cálculo y el nivel de detalle del modelo. Por ejemplo, los modelos de multibody para peatones y ocupantes están compuestos por 20 elipsoides conectadas mediante 19 articulaciones según Tabla 1.

Elipsoide	Correspondencia	Articulación	Unión elipsoides
0	Torso	0	Elipsoides 0-1
1	Cadera	1	Elipsoides 0-12
2	Fémur izquierdo	2	Elipsoides 0-10
3	Pierna inferior izq.	3	Elipsoides 0-8
4	Pie izquierdo	4	Elipsoides 4-12
5	Fémur derecho	5	Elipsoides 1-5
6	Pierna inferior der.	6	Elipsoides 2-3
7	Pie derecho	7	Elipsoides 3-4
8	Brazo superior der.	8	Elipsoides 5-6
9	Brazo inferior der.	9	Elipsoides 6-7
10	Brazo superior izq.	10	Elipsoides 8-9
11	Brazo inferior izq.	11	Elipsoides 10-11

12	Cuello	12	Elipsoides 12-13
13	Cabeza	13	Elipsoides 2-14
14	Rodilla izquierda	14	Elipsoides 5-15
15	Rodilla derecha	15	Elipsoides 3-16
16	Pierna inferior izq.	16	Elipsoides 6-17
17	Pierna inferior der.	17	Elipsoides 2-18
18	Fémur izquierdo	18	Elipsoides 5-19
19	Fémur derecho		

Tabla 1. Representación cuerpo humano con elipsoides

Tabla 2. Relación de articulaciones y elipsoides

Fuente: Elaboración propia. (PC Crash Software, 2024)

De acuerdo con la información presentada, en la Tabla 1, los elipsoides 16 a 19 (filas resaltadas) son modelos de prueba para piernas que tienen una forma más redondeada en comparación con los elipsoides 2, 3, 5 y 6. Estas últimas se utilizan para detectar y simular las fuerzas de contacto de las piernas. Sin embargo, los elipsoides 2, 3, 5 y 6 son demasiado alargadas para representar adecuadamente las fuerzas de impacto del parachoques en ciertos casos.

De otra parte, la Tabla 2 indica la relación entre elipsoides y su articulación asignada, por ejemplo, los elipsoides 0 y 1 correspondientes a torso y cadera, respectivamente, están unidos por la articulación número 0 y los número 1 y 5, pertenecientes a la cadera y fémur izquierdo, están unidos por la articulación número 5.

5.2.4 **Parámetros aplicados en las simulaciones**

- El coeficiente de rozamiento dinámico utilizado para interacción entre las ruedas de los vehículos (patinete eléctrico y bicicleta) y el pavimento es de 0.8 (Serway & Jewett, s. f.).
- Para el caso del patinete eléctrico, la altura del peatón en el eje z se mantuvo para todas las simulaciones con un valor de 14cm, correspondientes a la altura que hay entre el suelo y la plataforma del patinete.
- Para el ciclista, la altura de la planta del pie con el pedal en el plano horizontal respecto del suelo se estableció en 27cm.
- El modelo del software por defecto genera una unión entre el manillar del patinete eléctrico y las manos del usuario, esta unión se elimina eligiendo el instante de tiempo en el cual, por efecto de la colisión, el usuario se suelta del manillar.
- Las simulaciones se establecieron con una duración de 2s (en algunos casos específicos se varió este límite a un tiempo mayor pero menor a 3s), tiempo en el cual es posible observar la dinámica de la colisión.
- Se utilizó un intervalo de integración (periodo de tiempo en el cual es software realiza un cálculo) de 0.5 ms.
- Se configuró el centro de gravedad de los bordillos simulados como elementos tipo bloque en coordenadas x e y (0.5 , 1.0).

- Los bolardos se configuraron de forma prismática rectangular, toda vez que las características del software no cuentan con el tipo de propiedades geométricas para modelar este elemento con sus particularidades.

5.3 USUARIOS MODELIZADOS

Uno de los factores clave considerados en las simulaciones realizadas es la complejidad física de los usuarios de bicicleta y patinete eléctrico. Dado que estas simulaciones se centran en escenarios urbanos en España, se agrega a continuación información proveniente de un ejercicio investigativo de la Universidad Complutense de Madrid (Marrodán et al., 2013), en el cual se recopiló datos antropométricos de hombres y mujeres en España en el periodo comprendido entre febrero y noviembre de 2011.

Hombres	
Edad	Media
18 a 24	
Talla [cm]	176,08
Peso [kg]	90,41
25 a 34	
Talla [cm]	174,73
Peso [kg]	87,37
35 a 44	
Talla [cm]	173,22
Peso [kg]	90,88
45 a 54	
Talla [cm]	171,56
Peso [kg]	91,14
55 a 64	
Talla [cm]	170,37
Peso [kg]	91,32
65 a 75	
Talla [cm]	168,31
Peso [kg]	93,4

Tabla 3. Antropometría grupo hombres

Mujeres	
Edad	Media
18 a 24	
Talla [cm]	162,90
Peso [kg]	71,02
25 a 34	
Talla [cm]	162,56
Peso [kg]	72,45
35 a 44	
Talla [cm]	161,39
Peso [kg]	73,7
45 a 54	
Talla [cm]	159,93
Peso [kg]	74,19
55 a 64	
Talla [cm]	157,95
Peso [kg]	75,32
65 a 75	
Talla [cm]	156,97
Peso [kg]	77,25

Tabla 4. Antropometría grupo mujeres

Fuente: Elaboración propia. (Marrodán et al., 2013)

De acuerdo con la información presentada en la Tabla 3 y Tabla 4, los valores promedio con relación al tamaño de la muestra compuesta por personas entre 18 a 54 años, se muestran en la Tabla 5 y Tabla 6.

Hombres	
Muestra total (N = 1.222)	Media
Talla [cm]	172,6
Peso [kg]	90,06

Tabla 5. Talla y peso prom. Hombres

Mujeres	
Muestra total (N = 8.072)	Media
Talla [cm]	160,34
Peso [kg]	73,97

Tabla 6. Talla y peso prom. Mujeres

Fuente: Elaboración propia. (Marrodán et al., 2013)

De otra parte, es preciso agregar que los prototipos humanos en los cuales se basan los laboratorios de pruebas de colisiones son dummies que cuentan con antropometría homologada para evaluar la seguridad de los vehículos. Al respecto, existen grandes ventajas entorno a su utilización (mayormente hablando del ámbito automotriz) estas son:

- Simulación realista de humanos: Los dummies están diseñados para imitar las características físicas y biomecánicas del cuerpo humano, incluyendo el peso, la forma y la articulación de las diferentes partes del cuerpo. Esto permite evaluar cómo un cuerpo humano real podría reaccionar durante un accidente.
- Medición de fuerzas y lesiones: Los dummies están equipados con sensores que miden las fuerzas y aceleraciones experimentadas en diferentes partes del cuerpo durante una colisión. Esto ayuda a determinar el riesgo de lesiones y a identificar las áreas del vehículo que necesitan mejoras de seguridad.
- Evaluación de la eficacia de los sistemas de seguridad: Los dummies permiten probar y evaluar la eficacia de los sistemas de seguridad del vehículo, como cinturones de seguridad, airbags y estructuras de absorción de impactos. Las pruebas con dummies ayudan a asegurar que estos sistemas protejan adecuadamente a los ocupantes en caso de accidente.
- Normas y regulaciones: Las pruebas de choque con dummies son una parte esencial de los procedimientos de certificación para cumplir con las normas y regulaciones de seguridad vehicular establecidas por organizaciones como la National Highway Traffic Safety Administration - NHTSA en los Estados Unidos y European New Car Assessment Programme - Euro NCAP en Europa.
- Investigación y desarrollo: Los fabricantes de automóviles utilizan dummies en el desarrollo de nuevos vehículos para identificar y solucionar problemas de seguridad antes de que el vehículo llegue al mercado. Esto permite mejorar continuamente el diseño y la seguridad de los vehículos.
- Comparabilidad y repetibilidad: Las pruebas de choque con dummies proporcionan resultados comparables y repetibles, lo que es crucial para evaluar la seguridad de diferentes vehículos y configuraciones de manera consistente.

Los prototipos humanos (dummies) más utilizados por parte de uno de los fabricantes y sus características se muestran en la Tabla 7, Tabla 8, Tabla 9, Figura 24, Figura 25 y Figura 26.

Hybrid III 50th Percentile Male Dummy

Peso [kg] $77,700 \pm 1,180$

Tabla 7. Especificación de peso dummy masculino
Fuente: Elaboración propia. (Jasti Co., LTD., s. f.)



Figura 24. Modelo Hybrid III 50th Percentile Male
Fuente: (Jasti Co., LTD., s. f.)

**Hybrid III 95th Percentile
Large Male Dummy**

Peso [kg] $101,24 \pm 1,63$

Tabla 8. Especificación de peso dummy grande
masculino

Fuente: Elaboración propia. (Jasti Co., LTD., s. f.)



Figura 25. Modelo Hybrid III 95th Percentile Large
Fuente: (Jasti Co., LTD., s. f.)

Hybrid III 5th Percentile Female Dummy

Peso [kg] $49,050 \pm 0,91$

Tabla 9. Especificación de peso dummy femenino
Fuente: Elaboración propia. (Jasti Co., LTD., s. f.)

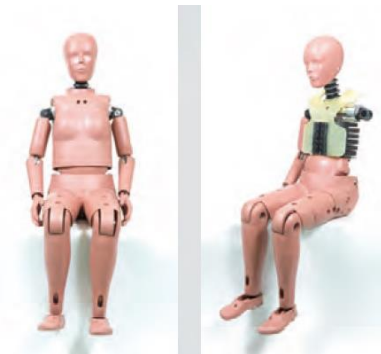


Figura 26. Modelo Hybrid III 5th Percentile
Female

Fuente: (Jasti Co., LTD., s. f.)

De acuerdo con la información presentada en la Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9 los pesos que se indican corresponden, para el caso masculino, al percentil 50 para el prototipo promedio lo cual quiere decir que el 50% de los valores de peso se encuentran por debajo 77,7 kg y el 50% por encima, el percentil 95 para el prototipo grande lo cual indica que el 95% se encuentra por debajo de 101,24 kg y el 5% por encima y para el caso femenino al percentil 5, estando el 5% por debajo de 49,05 kg y el 95% por encima de este valor.

Con relación a dummies para pruebas de accidentes que involucran peatones, el catálogo indica que se utilizan los prototipos relacionados en la Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9 en

posición de pie con algunas modificaciones en partes de la pelvis, espina dorsal y rodilla lo cual no genera cambios en el peso que se ha relacionado en las tablas mencionadas. (Jasti Co., LTD., s. f.).

Ahora bien, los datos relativos a la complejidad de los usuarios para llevar a cabo las simulaciones, serán los que se presentan en la Tabla 5 y Tabla 6 producto de la investigación realizada por la Universidad Complutense de Madrid (Marrodán et al., 2013), ya que la aplicación de las mejoras en cuanto a elementos separadores para carriles bici identificadas en el presente trabajo serán aplicadas en la ciudad de Valencia. Así mismo, es preciso notar que los datos en mención no difieren en gran medida con respecto a la información presentada en la Tabla 7, Tabla 8 y Tabla 9 correspondiente a la antropometría de los dummies para pruebas de accidentes.

De otra parte, con relación a simulaciones que involucren prototipos para niños, estos no se tuvieron en cuenta en el estudio, toda vez que no representan el común denominador de los usuarios de bicicletas y patinetes eléctricos en zonas urbanas.

5.4 VEHÍCULOS MODELIZADOS

De acuerdo con lo mencionado previamente, el presente estudio se centra en los vehículos de micromovilidad más utilizados en la actualidad, estos son, los patinetes eléctricos y las bicicletas. Dado que al momento de la colisión uno de los factores determinantes en el desarrollo de la misma, es las dimensiones de los vehículos en mención y su peso, se tuvo en cuenta estas características para los modelos más comunes, los cuales se describen en la Tabla 10 y Tabla 11.

Patinete eléctrico Xiaomi 3 Lite	
Altura [m]	1,10
Longitud [m]	1,14
Ancho [m]	0,43
Peso [kg]	13

Tabla 10. Especificaciones Xiaomi 3 Lite
Fuente: Elaboración propia. (Xiaomi, s. f.)

Bicicleta urbana	
Altura [m]	1,00
Longitud [m]	1,90
Ancho [m]	0,60
Peso [kg]	14

Tabla 11. Especificaciones bicicleta urbana

Fuente: Elaboración propia. (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2023).

5.5 ESCENARIOS MODELIZADOS

Las simulaciones se realizaron generando colisiones de usuarios de bicicleta y patinete eléctrico con elementos separadores, en este caso, se tuvieron en cuenta los elementos más comunes presentes en la infraestructura ciclista de la ciudad de Valencia, los que a su vez también se presentan en el numeral 4.4 y en la Figura 27 de forma puntual.

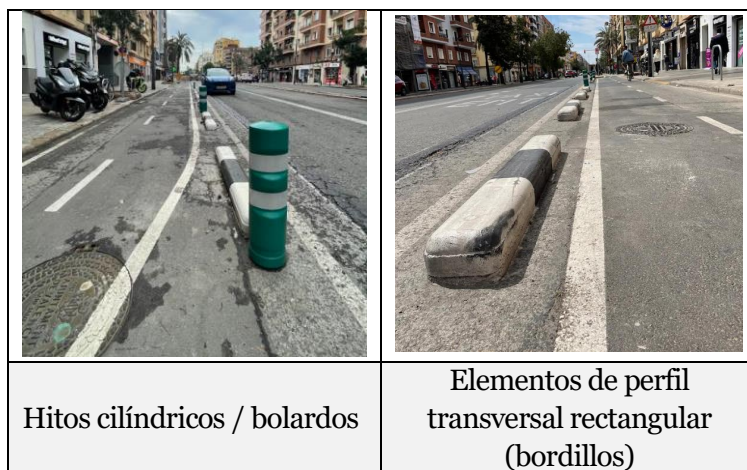


Figura 27. Tipos de elementos separadores para el análisis

Acorde con lo anterior, la información de entrada requerida en el software PC – Crash corresponde a las dimensiones del elemento separador, por lo cual se utilizaron los datos presentados en la Tabla 12.

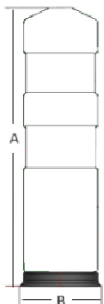
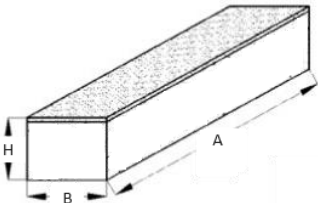
Hitos cilíndricos / bolardos		A [cm]: 75 B [cm]: 20
Elementos de perfil transversal rectangular (bordillo)		A [m]: 1,5 B [cm]: 20 H [cm]: 13

Tabla 12. Dimensiones elementos separadores

Fuente: Elaboración propia. Tomado de: (Benito Urban, s. f.)

5.5.1 Colisión con bordillo

Las simulaciones realizadas variaron para cada tipo de usuario (ciclista – patinete eléctrico) el ángulo de la trayectoria de impacto según se muestra en la Figura 28, los cuales se escogieron con el objetivo de simular trayectorias de choque, por una parte, en sentido

longitudinal al elemento separador (10°) y en ángulo más obtuso con relación a la trayectoria (40°), estos ángulos fueron tenidos en cuenta con respecto al eje x según se muestra en la siguiente figura. En rangos de velocidad cada 5km/h (5km/h, 10km/h, 15km/h, 20km/h y 25km/h).

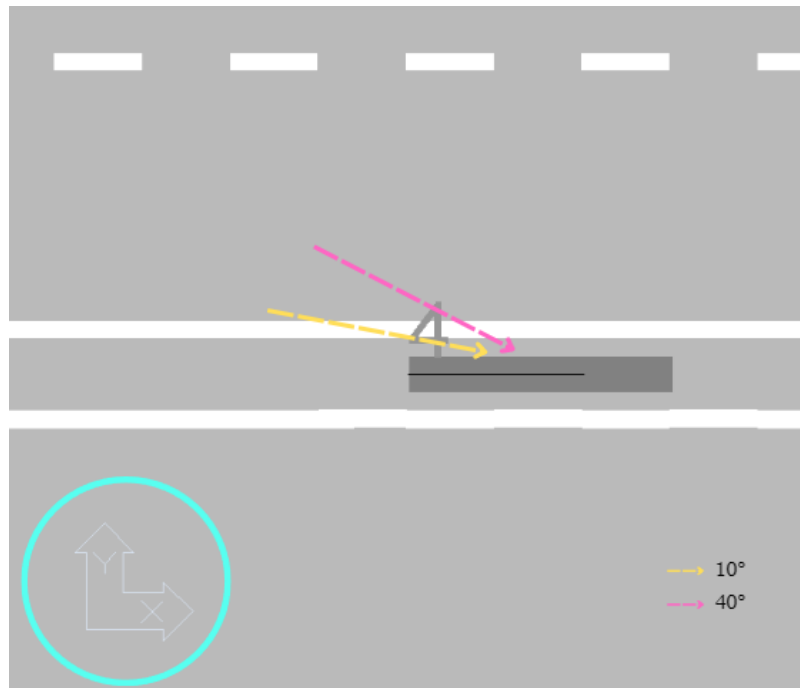


Figura 28. Ángulos de la trayectoria de impacto con respecto al bordillo

5.5.2 Colisión con bolardo

Para este caso, por la geometría del bolardo como elemento separador, se escogieron dos (2) ángulos en la trayectoria de colisión con respecto al eje x, según se muestra en la Figura 29. Las simulaciones realizadas variaron para cada tipo de usuario (ciclista – patinete eléctrico) rangos de velocidad cada 5km/h (5km/h, 10km/h, 15km/h, 20km/h y 25km/h).

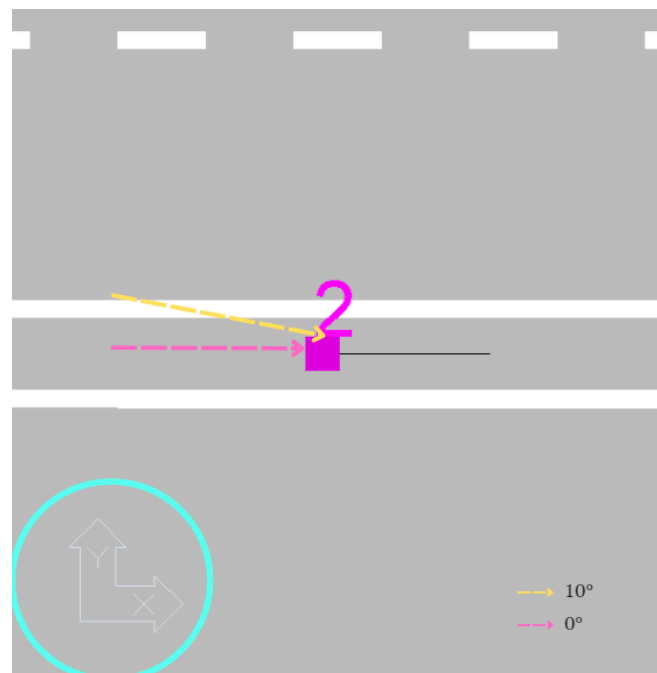


Figura 29. Ángulos de la trayectoria de impacto con respecto al bordillo

5.6 MEDICIÓN DE LA GRAVEDAD DE LOS ACCIDENTES

Con el fin de establecer mediante parámetros numéricos, la gravedad de los accidentes analizados en el presente estudio, los cuales corresponden a colisiones de usuarios de micromovilidad (patinetes eléctricos y ciclistas) contra elementos separadores, se analizaron como aspectos de daño relevantes, el daño encefálico producido por el choque y la posible distancia en la calzada que puede llegar a invadir la víctima del accidente, a continuación, se detallan estos criterios.

5.6.1 Head Injury Criterion

Existen diferentes tipos de lesiones en la cabeza posterior a un impacto las cuales están relacionadas directamente con el mecanismo de la lesión, este tipo de relación se muestra en la Figura 30.

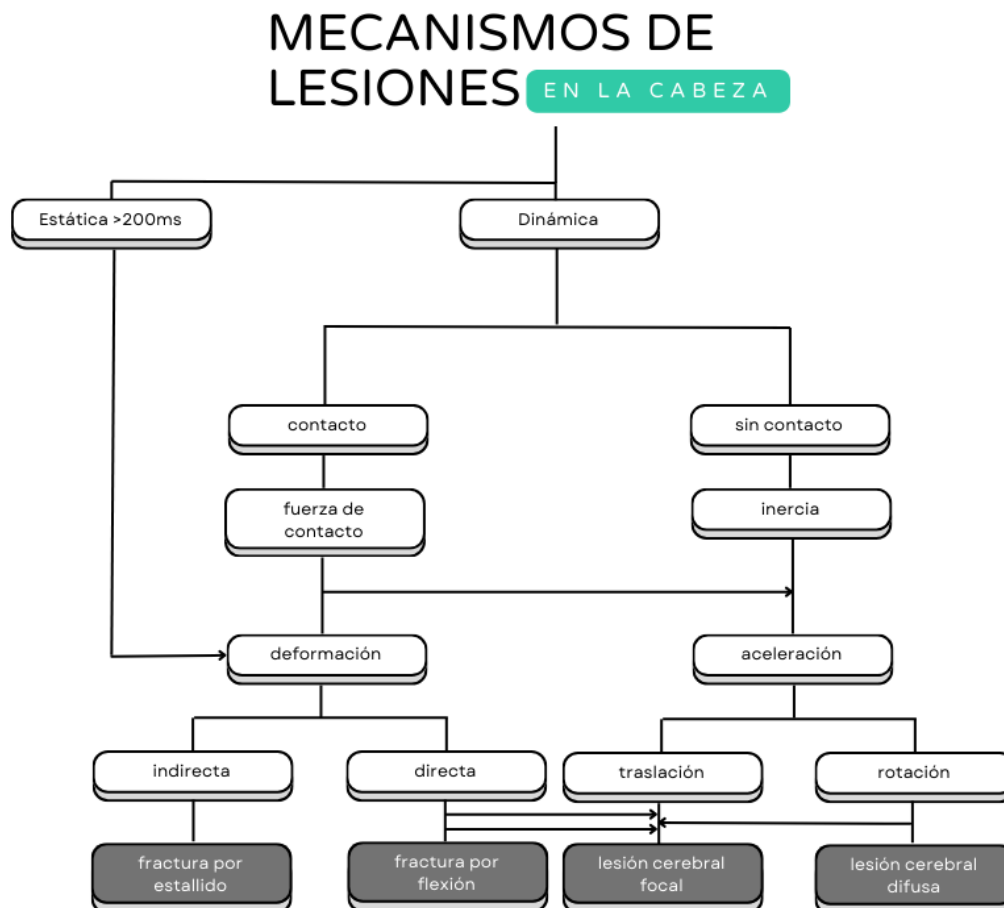


Figura 30. Posibles mecanismos de lesión en la cabeza
Fuente: Elaboración propia. Tomado de (Schmitt et al., 2004)

Según la información presentada en la Figura 30, en el contexto de los tipos de colisiones analizados en el presente trabajo, las lesiones en la cabeza son comúnmente causadas por cargas dinámicas en lugar de estáticas, ya que las cargas estáticas se aplican durante más de 200 ms. Además, este tipo de caída suele ocurrir sin contacto, lo que implica que la única

carga aplicada proviene de las propiedades inerciales de la cabeza, es decir, aceleración o deceleración. Esto puede generar un efecto de traslación, que generalmente causa lesiones cerebrales focales, o un efecto de rotación, que puede resultar en lesiones cerebrales difusas.

Ahora bien, se han propuesto diversos métodos para medir la aceleración debido a que se enfrentan dos escenarios, en primer lugar los acelerómetros no pueden ser ubicados en el centro de gravedad de la cabeza y en segundo lugar, la cabeza no es un cuerpo rígido, por lo cual como resultado de extensos análisis experimentados en cadáveres enfocados en aceleración de la cabeza se obtuvo una curva denominada Wayne State University Cerebral Concussion Tolerance Curve – WSTC (Schmitt et al., 2004).

A partir de esto, se establece una amplia base histórica entorno a este tipo de investigaciones y principalmente enfocadas en un índice que brinde como criterio la severidad de las lesiones en la cabeza, la cual está comprendida en un periodo aproximadamente entre los años 1961 y 1993, con la investigación de diferentes colaboradores en materia, se resalta el trabajo de Gadd (1961) (Eppinger et al., 1999), quien utilizó la WSTC (1960), con lo cual desarrolló posteriormente el Índice de Severidad de Gadd – GSI para evaluar lesiones encefálicas basándose en la aceleración traslacional resultante promedio de la cabeza, análisis que posteriormente evolucionó concluyendo que, al medir la tolerancia del cráneo a las cargas de fractura se obtiene la tolerancia de lesiones cerebrales. Finalmente, la National Highway Traffic Safety Administration -NHTSA propuso el Head Injury Criterion - HIC como un reemplazo al GSI en la Federal Motor Vehicle Safety Road 208 – FMVSS 208, siendo esta última una regulación americana referente a la protección de los ocupantes de un vehículo ante una eventual colisión. El HIC en mención se calcula mediante la Ecuación 2 (Eppinger et al., 1999).

$$HIC = \max \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1)$$

Dónde:

t_1 y t_2 [s]: tiempos entre los cuales la aceleración promedio es la máxima.

Ecuación 2. Cálculo HIC

Ahora bien, cuantitativamente el HIC son dos cosas, el *HIC number* que es el valor numérico obtenido por medio del cálculo de valores de aceleración experimentada por la cabeza durante un impacto, considerando tanto la magnitud como la duración de dicha aceleración, y el *HIC criterion* que asocia diferentes probabilidades de lesiones en la cabeza a diferentes rangos de valores del *HIC number* (Rablau, 2016).

Es preciso resaltar que, no existen límites de valores del HIC que representen directamente lesiones o traumatismos encefálicos, pero valores más altos equivalen a una mayor probabilidad de traumatismo. En este sentido, la NHTSA ha especificado un límite de 1000 para el HIC en un periodo de 36 milisegundos para el percentil 50 masculino, y también, en el año 1998, estableció un límite de 700 para un periodo de 15 milisegundos para el percentil 50, lo cual indica que el 50% de los heridos sufrirá un nivel de trauma permanente. (Anna Niska & Wenäll, 2019)

En línea con lo anterior, el criterio de daño del HIC tomado para las simulaciones realizadas se presenta en la Tabla 13.

Criterio de daño HIC	
HIC	≥ 1000
Periodo de tiempo [miliseg.]	36
HIC	≥ 700
Periodo de tiempo [miliseg.]	15

Tabla 13. Criterio de daño HIC
Fuente: Elaboración propia

5.6.2 Distancia de calzada invadida

En segundo lugar, se tuvo en cuenta, como dato cuantitativo para evaluar la gravedad de las caídas simuladas, la distancia de calzada invadida por el usuario, siendo este un escenario potencialmente mortal, debido a la alta probabilidad de impacto por un vehículo motorizado.

Con la información obtenida de las simulaciones con relación a la distancia de calzada invadida, es posible definir el ancho más recomendable para la zona de servicio con la finalidad de establecer un diseño de infraestructura ciclista dispuesto para posibles eventualidades, como las colisiones de usuarios de micromovilidad con los elementos separadores.

6 ANÁLISIS Y RESULTADOS

Según las simulaciones realizadas y los escenarios planteados en numerales anteriores, se presentan los siguientes resultados, teniendo en cuenta que se aplicaron parámetros de configuración mencionados en el numeral 5.2.4, toda vez que el software utilizado está diseñado principalmente para reconstrucción de accidentes automovilísticos y se adaptaron las herramientas y bondades del software en este sentido.

Ahora bien, posterior a cada simulación, es posible obtener información de salida de interés que permite analizar aspectos importantes de cada una de las colisiones simuladas. A continuación, se presentan para cada una de las simulaciones, la fuerza de contacto (N) vs tiempo (s), con lo cual es posible conocer el instante del tiempo en el que la cabeza impacta con el pavimento luego de colisionar con el elemento separador, la gráfica de aceleración (m/s^2) vs tiempo (s) de la cabeza y la distancia invadida en la calzada del usuario o usuaria correspondiente a la posición final tras el accidente.

6.1 Colisión patinete eléctrico-bordillo

6.1.1 Usuario masculino

6.1.1.1 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 5 km/h

Para esta simulación, se incluyen imágenes relacionadas con la reconstrucción del accidente provenientes del software utilizado, para las simulaciones subsiguientes, las imágenes en mención se relacionan en el ANEXO I. Es preciso resaltar que las zonas rojas de los multibodies simulados, representan contacto.

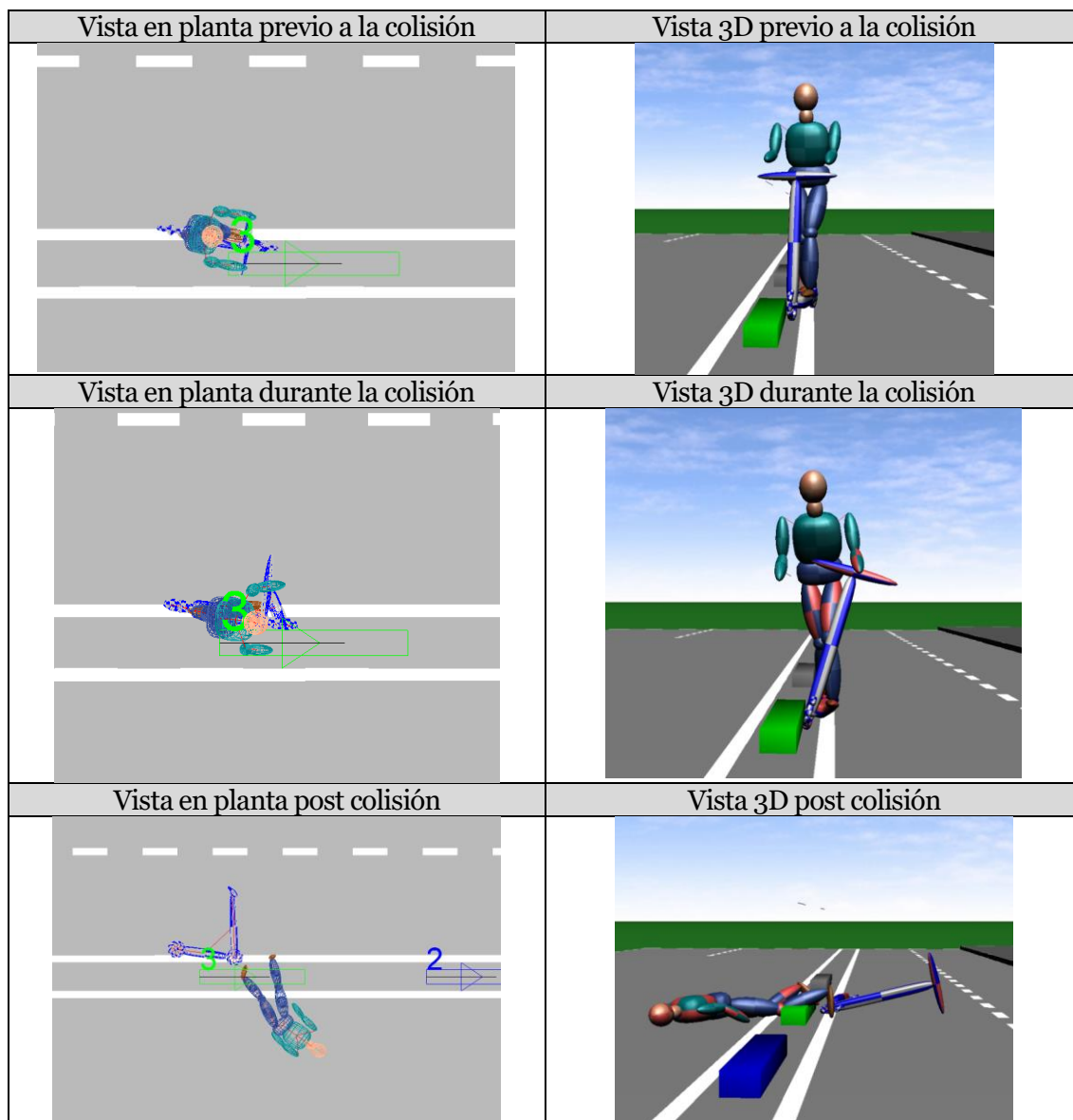


Figura 31. Reconstrucción del accidente para la colisión del usuario en patinete eléctrico contra el bordillo a 5km/h

FUERZA DE CONTACTO

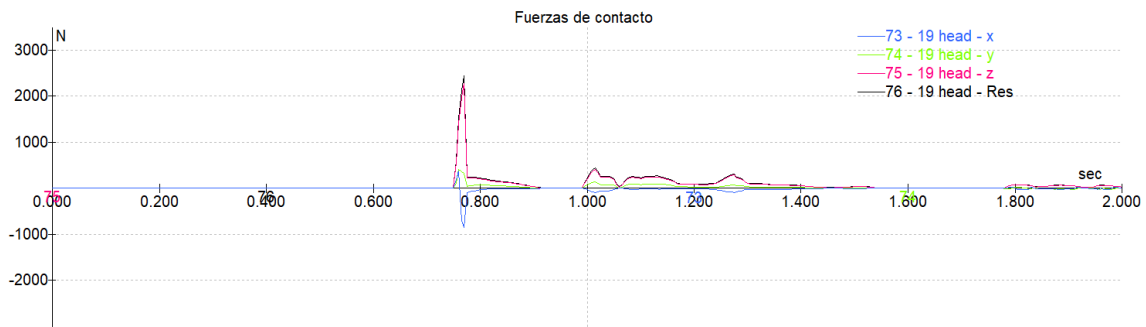


Figura 32. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída ($10^\circ / 5 \text{ km/h}$)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.77 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

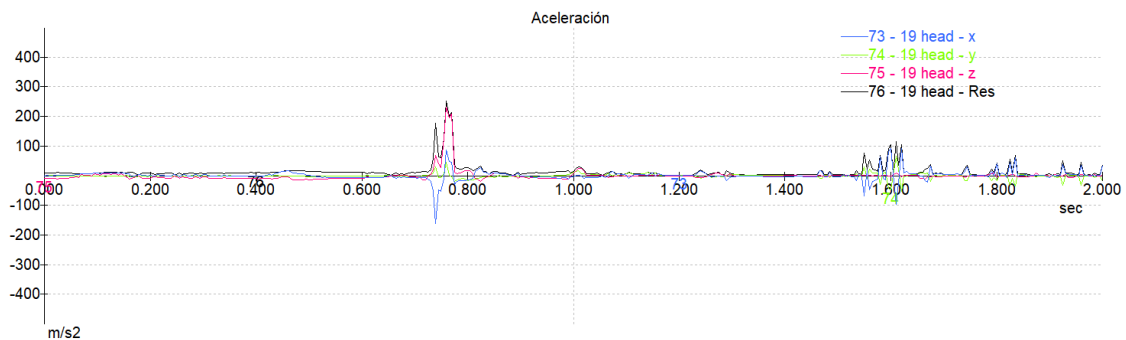


Figura 33. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída ($10^\circ / 5 \text{ km/h}$)

Se observa la mayor aceleración para el tiempo de mayor fuerza de contacto mencionada.

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

Se midió la parte del cuerpo que más expuesta quedó en la calzada con respecto a los elementos separadores, posterior al accidente.

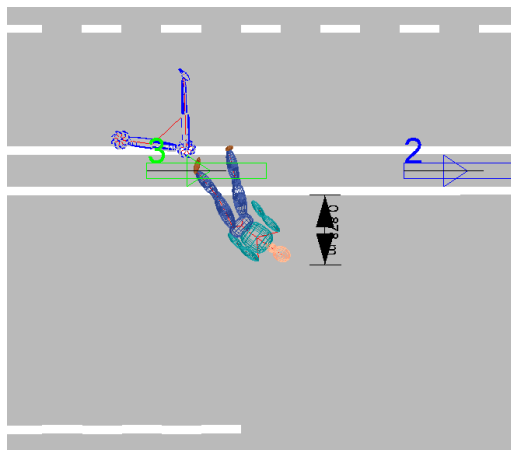


Figura 34. Distancia invadida en la calzada ($10^\circ / 5 \text{ km/h}$)

Distancia de calzada invadida: 0.88 m

6.1.1.2 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 10 km/h

FUERZA DE CONTACTO



Figura 35. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° / 10 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.67 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

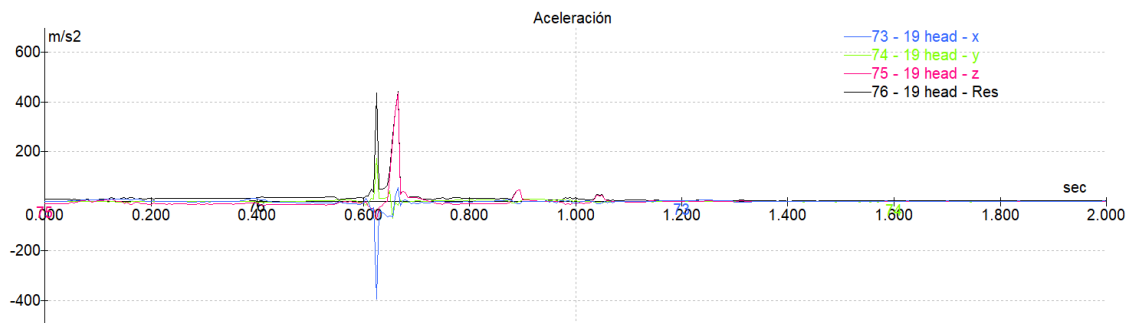


Figura 36. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° / 10 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

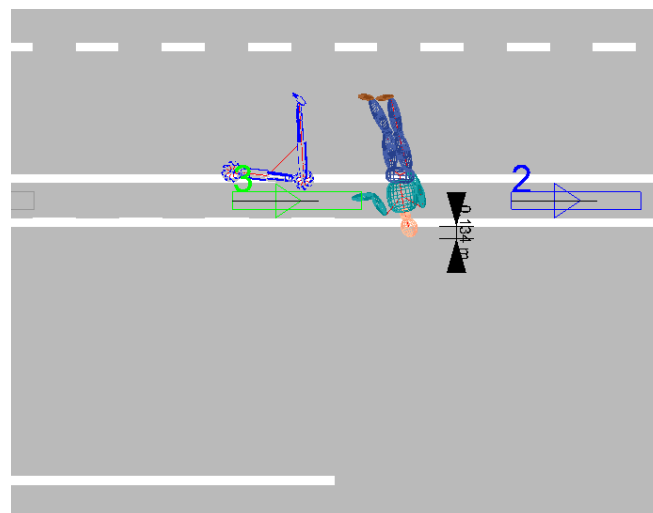


Figura 37. Distancia invadida en la calzada (10° / 10 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.13 m

6.1.1.3 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 15 km/h

FUERZA DE CONTACTO

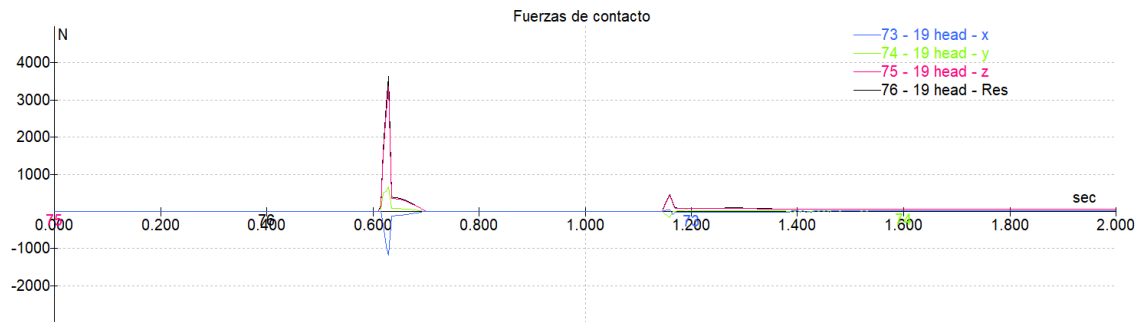


Figura 38. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.63 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

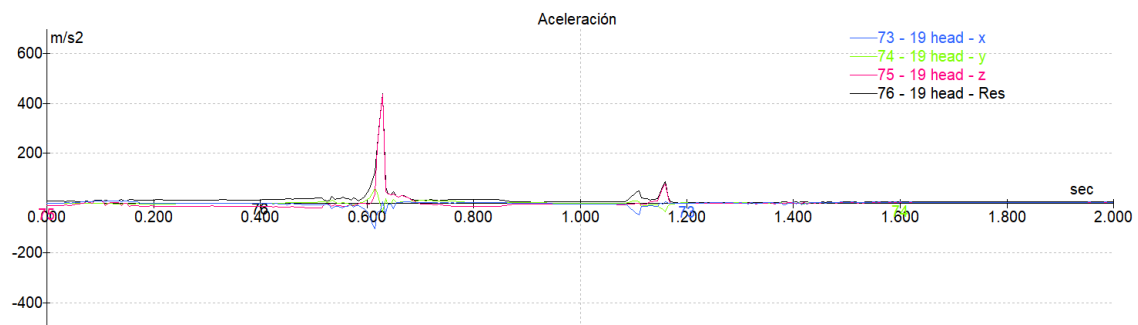


Figura 39. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

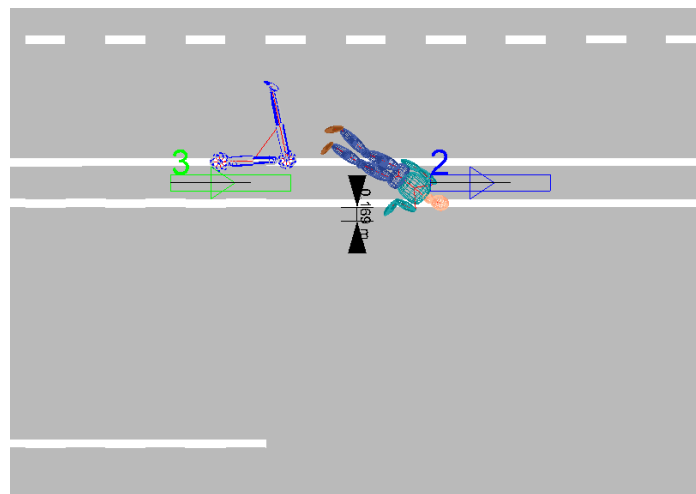


Figura 40. Distancia invadida en la calzada (10° /15 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.17 m

6.1.1.4 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 20 km/h

FUERZA DE CONTACTO

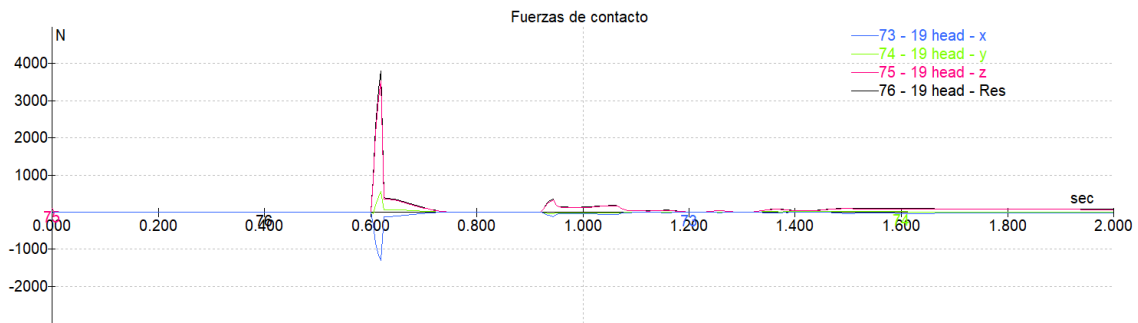


Figura 41. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° / 20 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.62 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

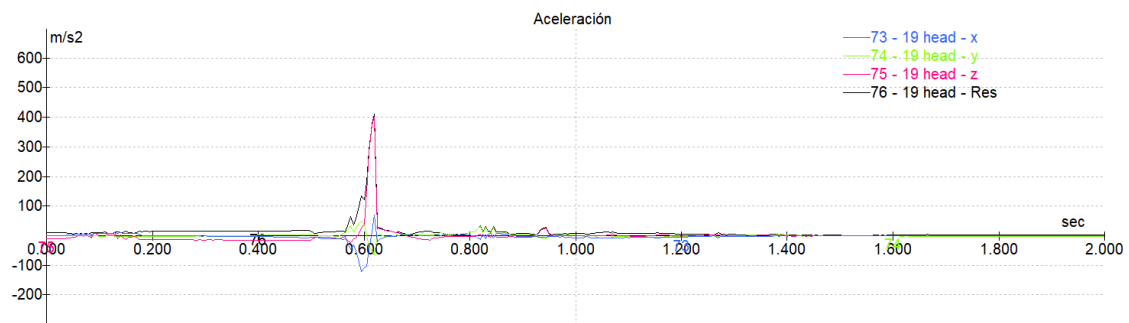


Figura 42. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° / 20 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

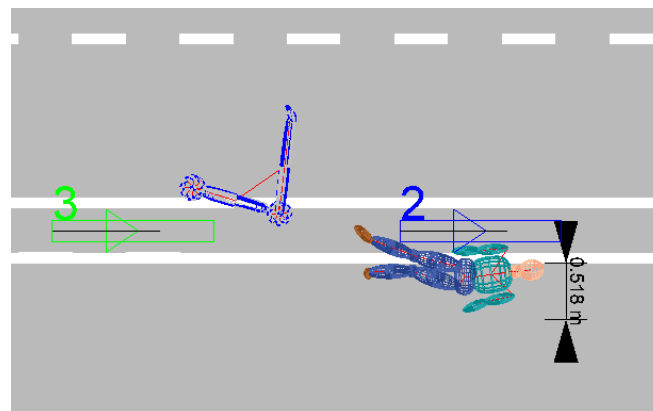


Figura 43. Distancia invadida en la calzada (10° / 20 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.52 m

6.1.1.5 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 25 km/h

FUERZA DE CONTACTO



Figura 44. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° / 25 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.61 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

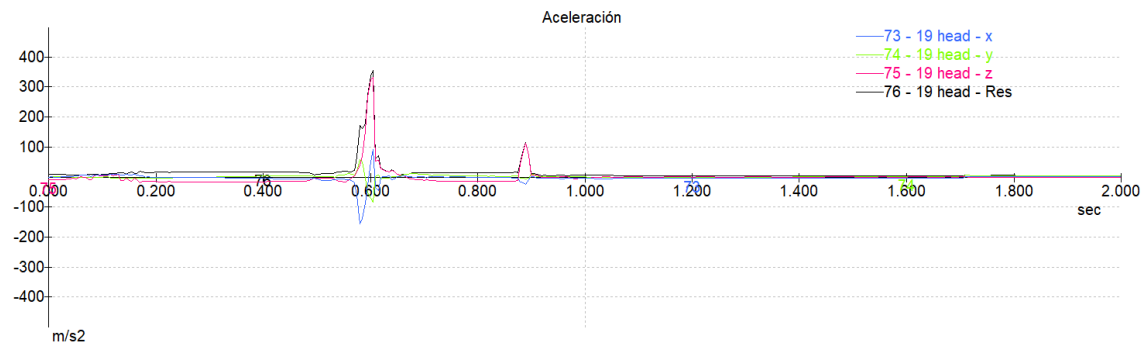


Figura 45. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° / 25 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

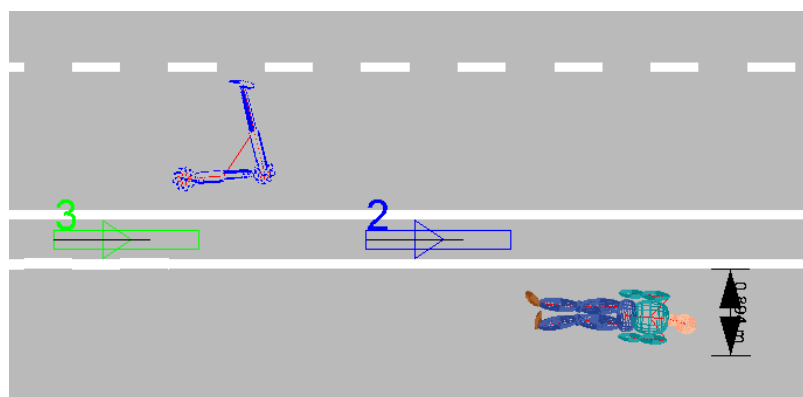


Figura 46. Distancia invadida en la calzada (10° / 25 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.89 m

6.1.1.6 Ángulo de impacto 40° - Velocidad 5 km/h

FUERZA DE CONTACTO



Figura 47. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /5 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.71 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

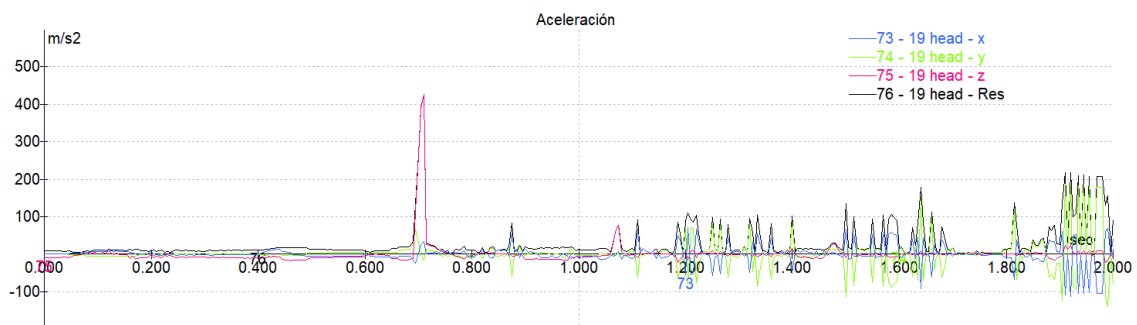


Figura 48. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /5 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

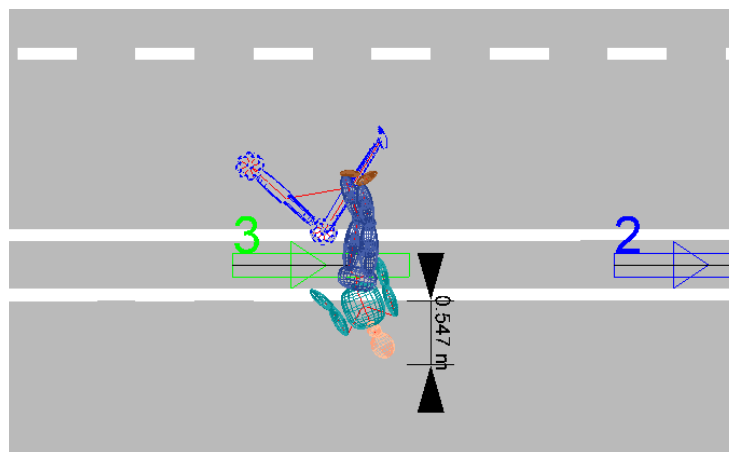


Figura 49. Distancia invadida en la calzada (40° /5 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.55 m

6.1.1.7 Ángulo de impacto 40° - Velocidad 10 km/h

FUERZA DE CONTACTO



Figura 50. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /10 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.71 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

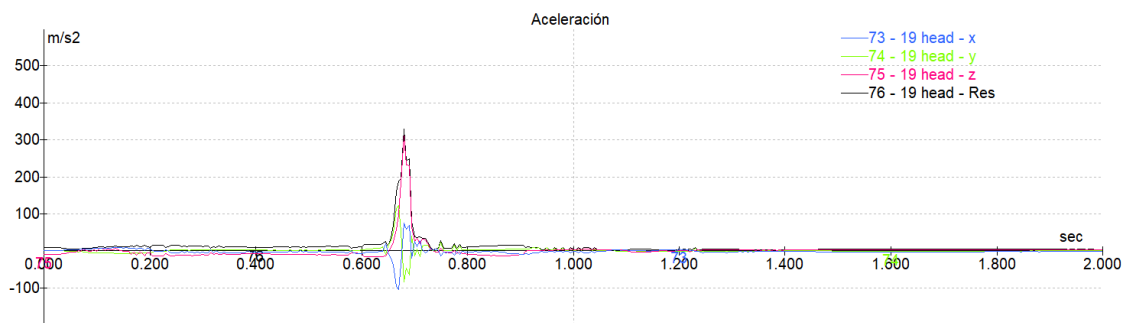


Figura 51. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /10 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

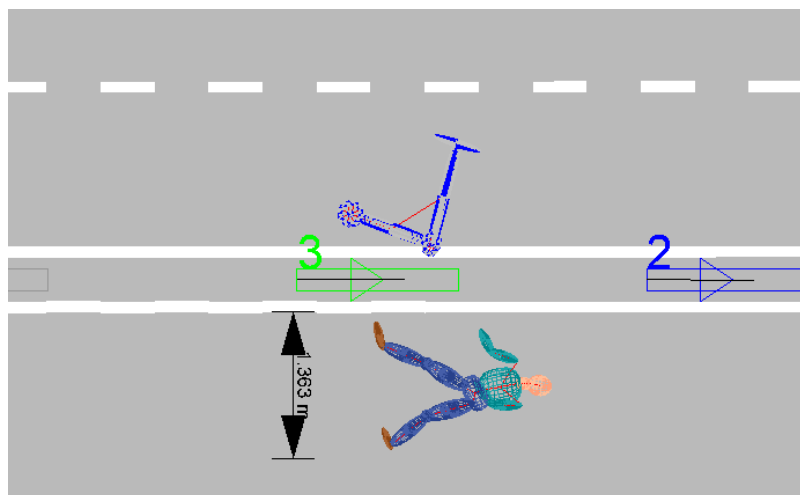


Figura 52. Distancia invadida en la calzada (40° /10 km/h)

Distancia de calzada invadida: 1,36 m

6.1.1.8 Ángulo de impacto 40° - Velocidad 15 km/h

FUERZA DE CONTACTO



Figura 53. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° / 15 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.63 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

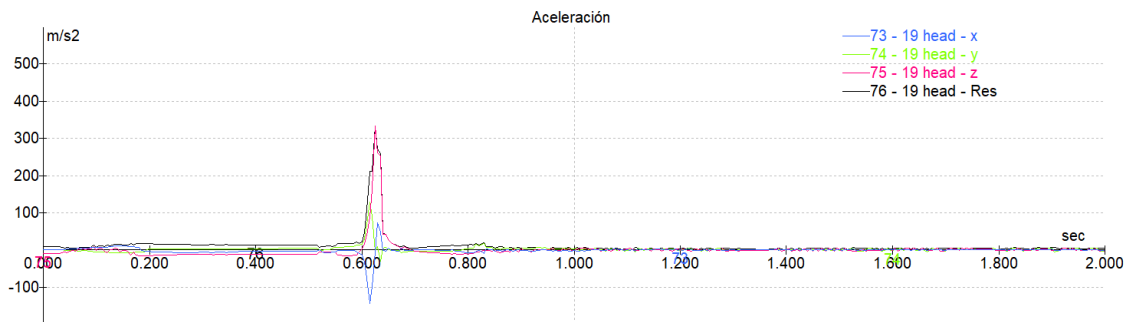


Figura 54. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° / 15 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

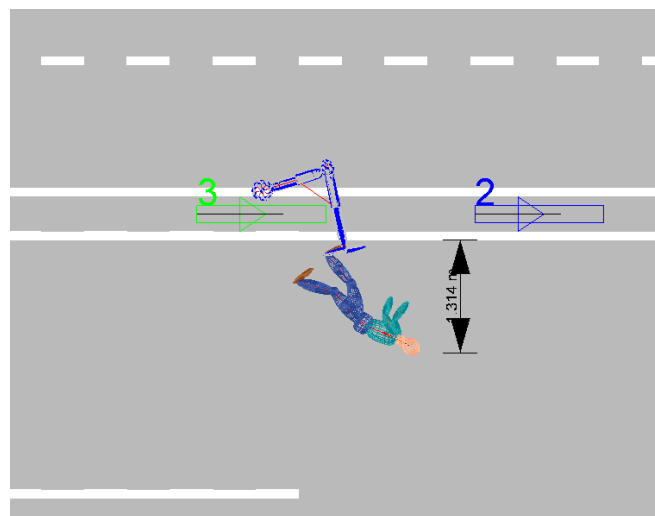


Figura 55. Distancia invadida en la calzada (40° / 15 km/h)

Distancia de calzada invadida: 1.31 m

6.1.1.9 Ángulo de impacto 40° - Velocidad 20 km/h

FUERZA DE CONTACTO

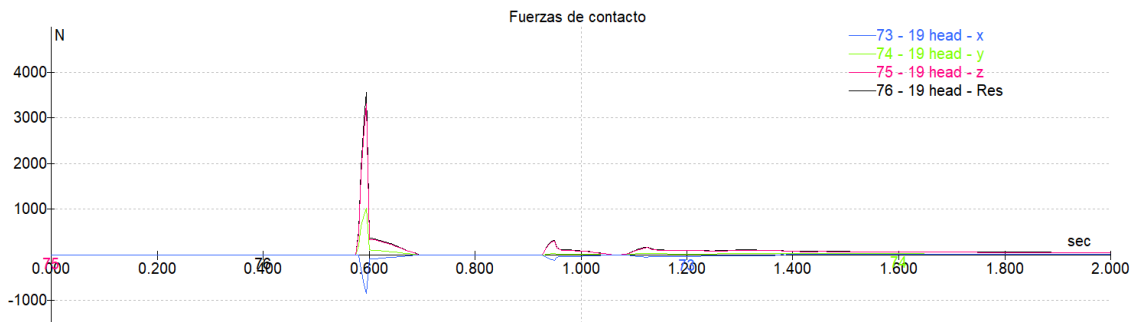


Figura 56. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /20 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.59 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

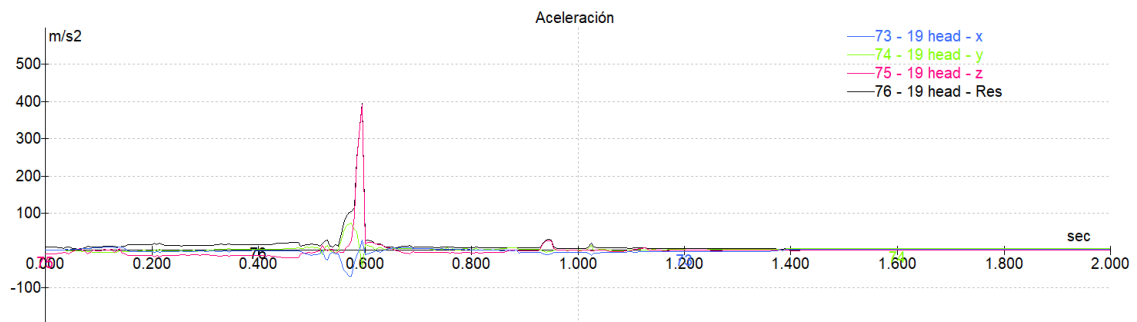


Figura 57. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /20 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

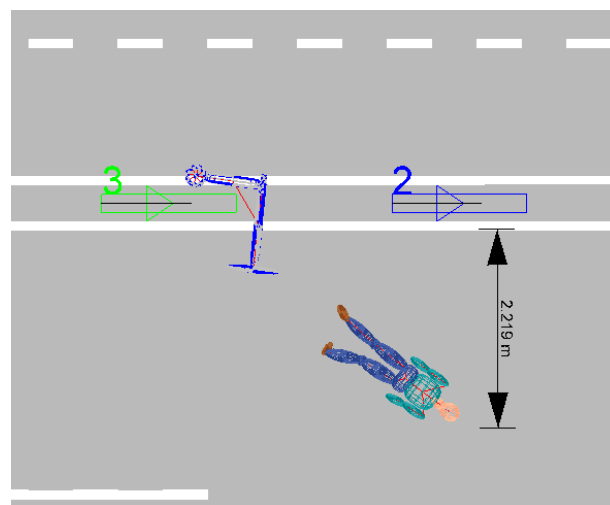


Figura 58. Distancia invadida en la calzada (40° /20 km/h)

Distancia de calzada invadida: 2.22 m

6.1.1.10 Ángulo de impacto 40° - Velocidad 25 km/h

FUERZA DE CONTACTO

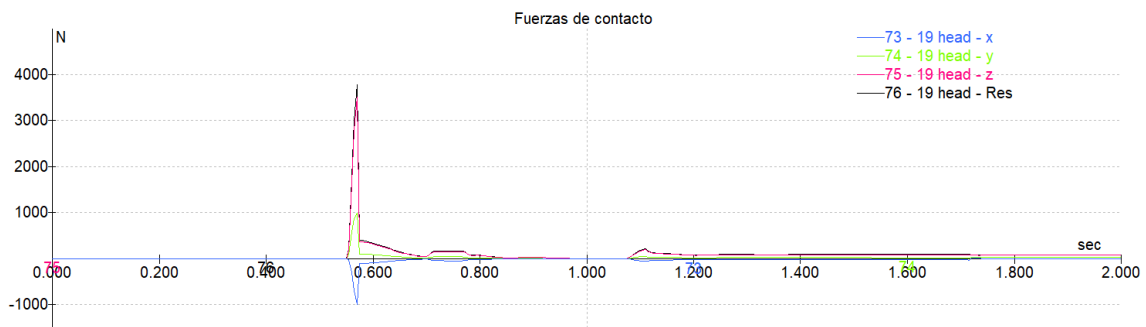


Figura 59. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° / 25 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.57 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

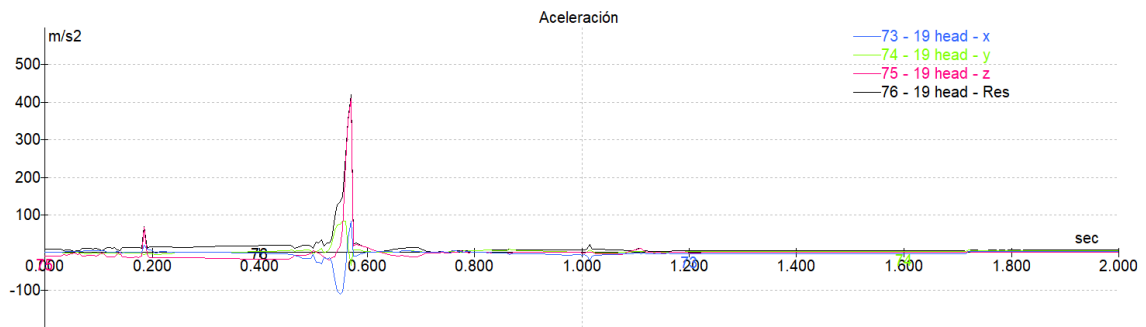


Figura 60. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° / 25 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

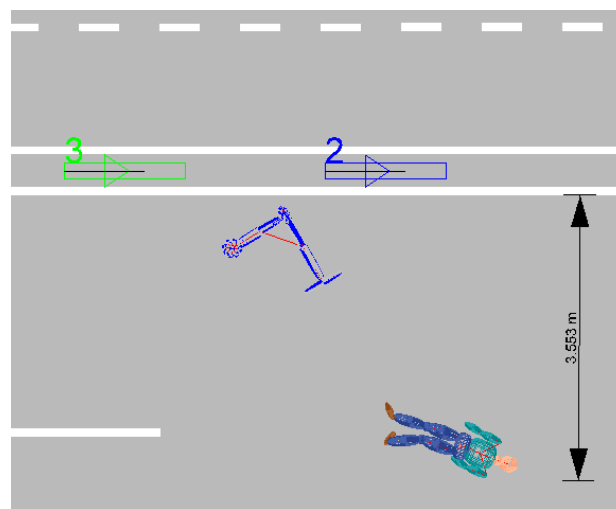


Figura 61. Distancia invadida en la calzada (40° / 25 km/h)

Distancia de calzada invadida: 3.55 m

6.1.2 Usuaría femenina

6.1.2.1 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 5 km/h

Para esta simulación, se incluyen imágenes relacionadas con la reconstrucción del accidente provenientes del software utilizado, para las simulaciones subsiguientes, las imágenes en mención se relacionan en el ANEXO I. Es preciso resaltar que las zonas rojas de los multibodies simulados, representan contacto.

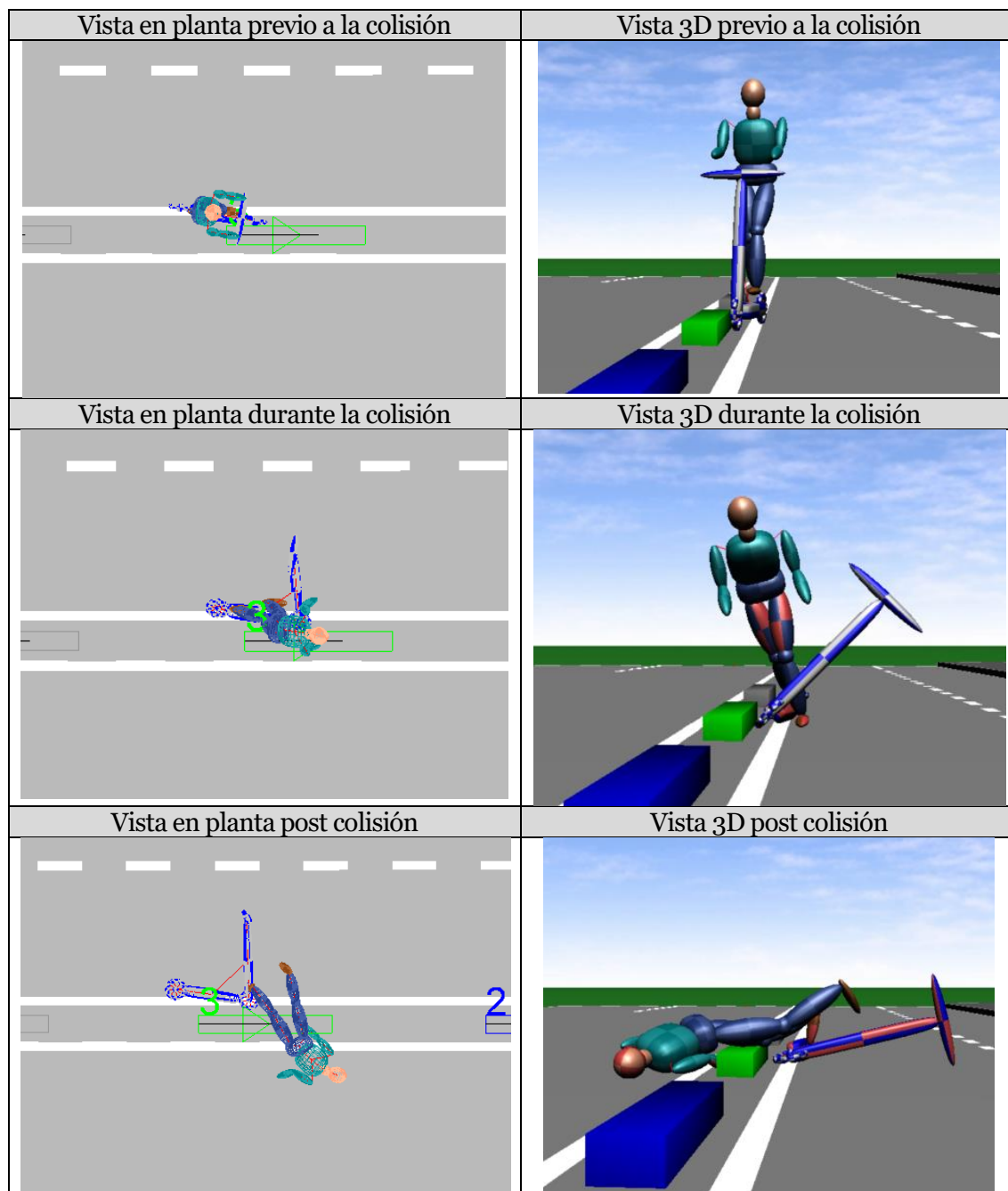


Figura 62. Reconstrucción del accidente para la colisión de la usuaria en patinete eléctrico contra el bordillo a 5km/h

FUERZA DE CONTACTO

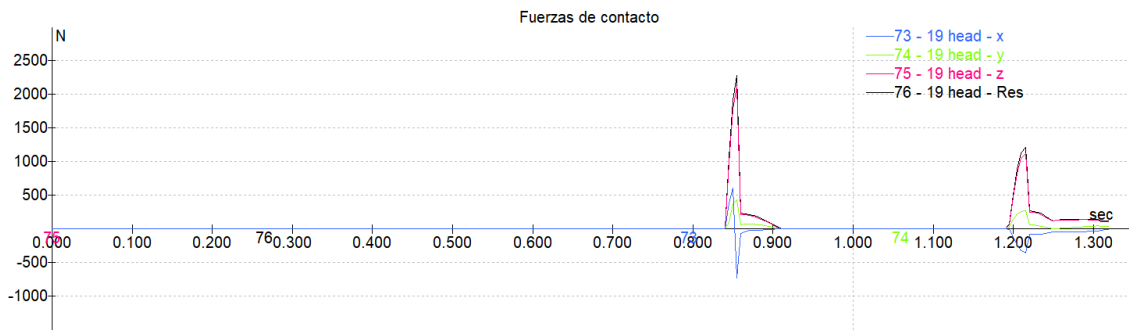


Figura 63. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /5 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.85 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

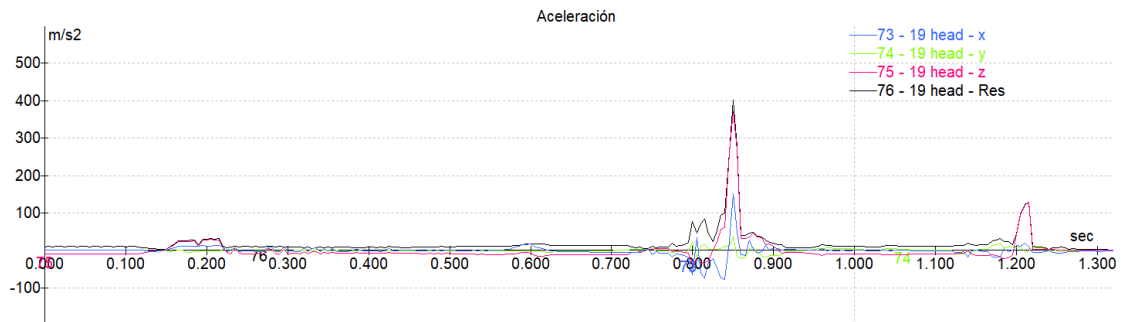


Figura 64. . Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /5 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

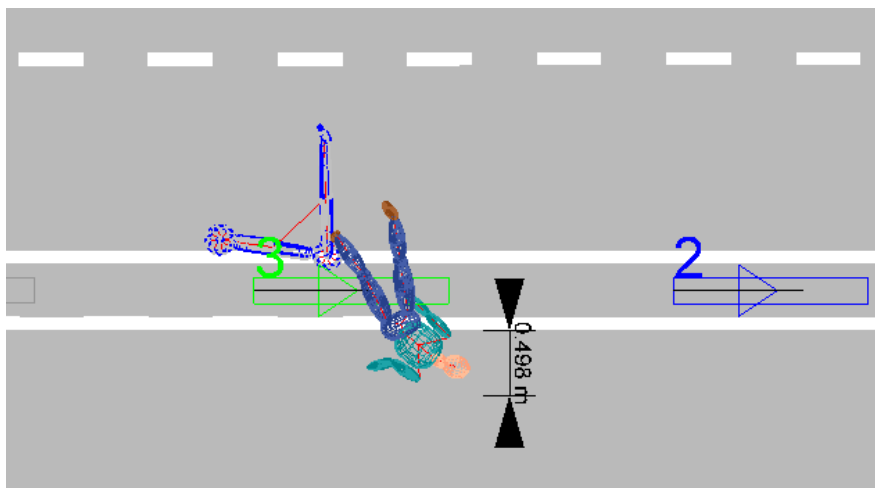


Figura 65. Distancia invadida en la calzada (10° /5 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.49 m

6.1.2.2 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 10 km/h

FUERZA DE CONTACTO



Figura 66. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /10 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.70 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

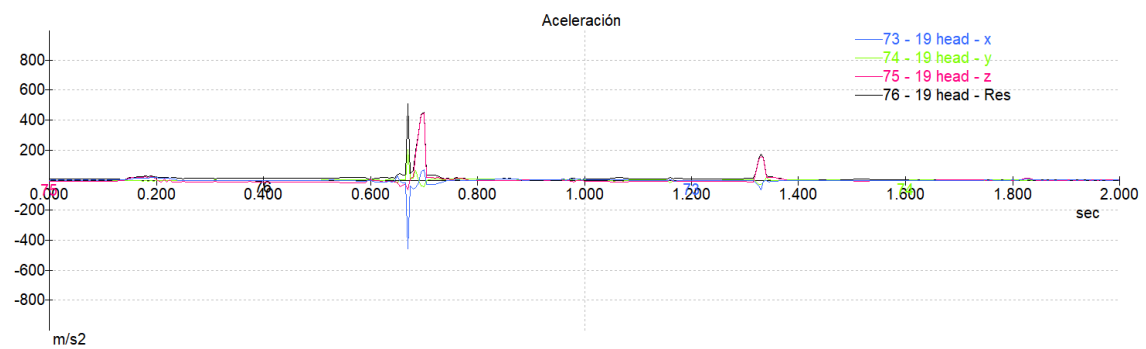


Figura 67. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /10 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

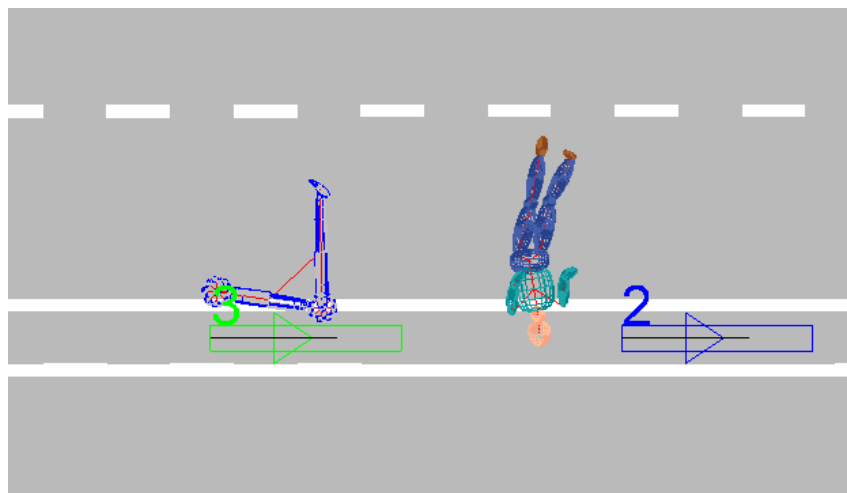


Figura 68. Distancia invadida en la calzada (10° /10 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0 m

6.1.2.3 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 15 km/h

FUERZA DE CONTACTO



Figura 69. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.67 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

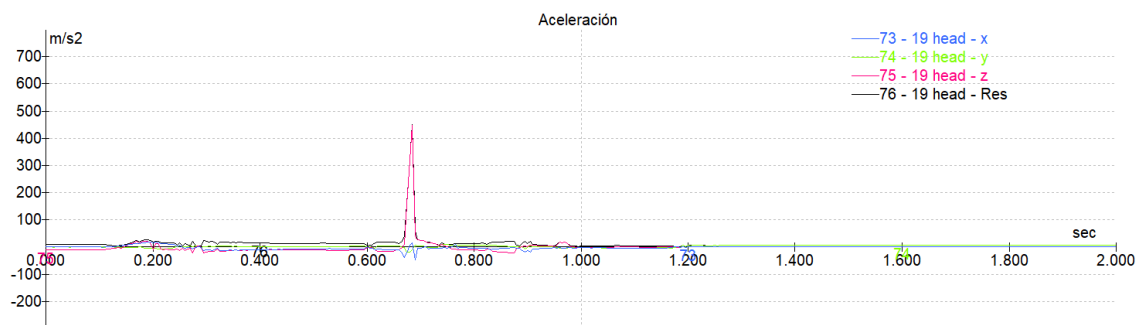


Figura 70. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

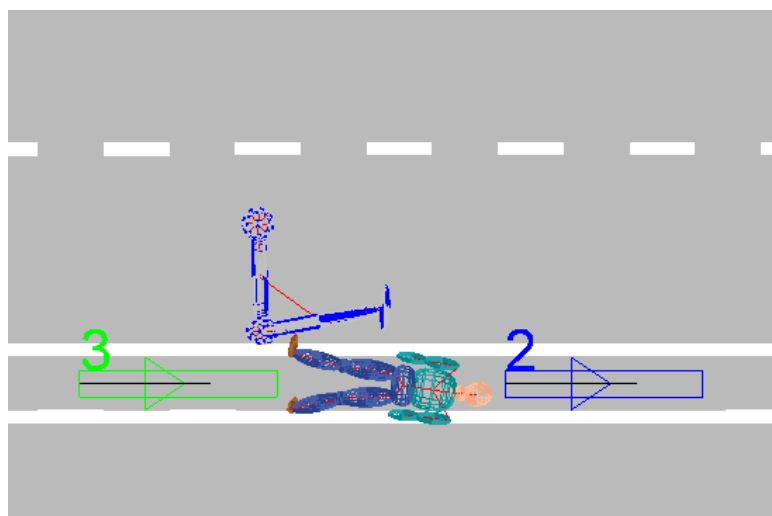


Figura 71. Distancia invadida en la calzada (10° /15 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0 m

6.1.2.4 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 20 km/h

FUERZA DE CONTACTO

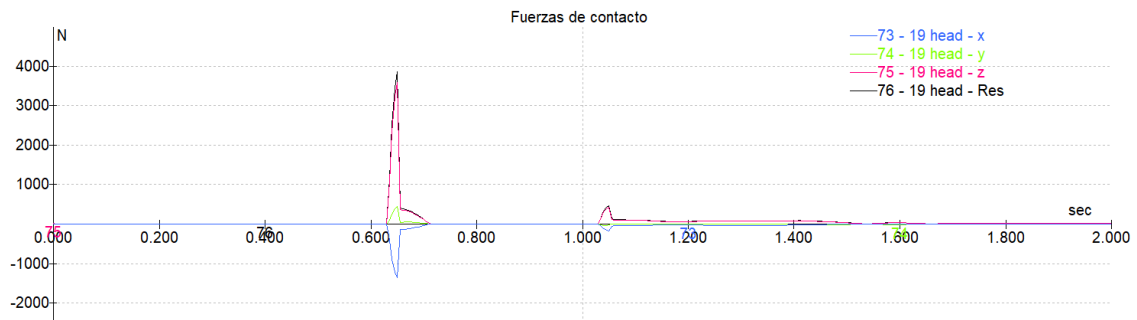


Figura 72. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° / 20 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.65 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

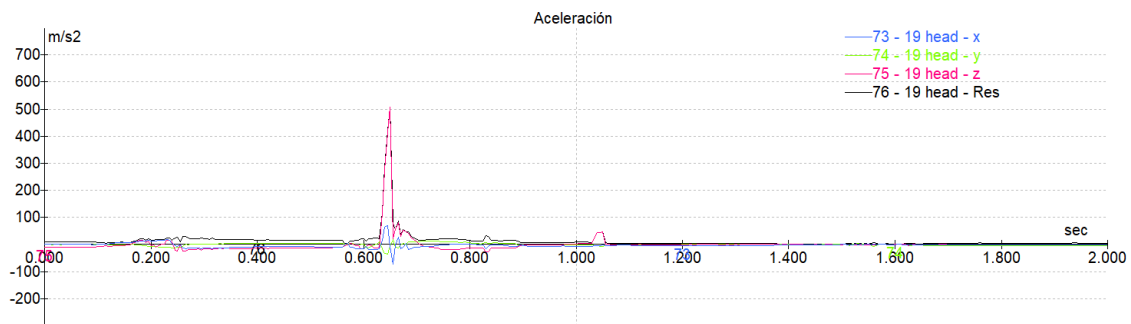


Figura 73. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° / 20 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

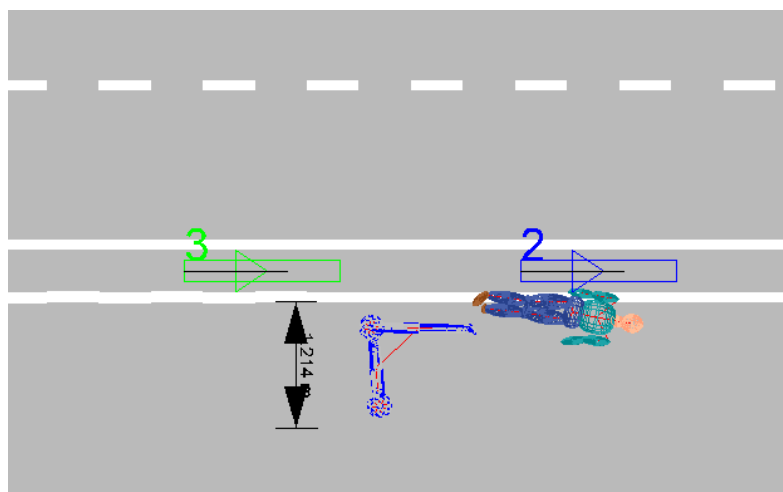


Figura 74. Distancia invadida en la calzada (10° / 20 km/h)

Distancia de calzada invadida: 1.21 m

6.1.2.5 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 25 km/h

FUERZA DE CONTACTO

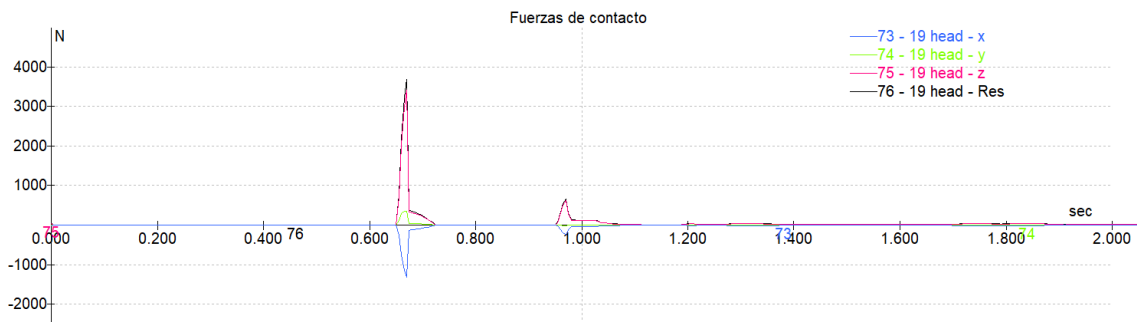


Figura 75. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /25 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.65 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

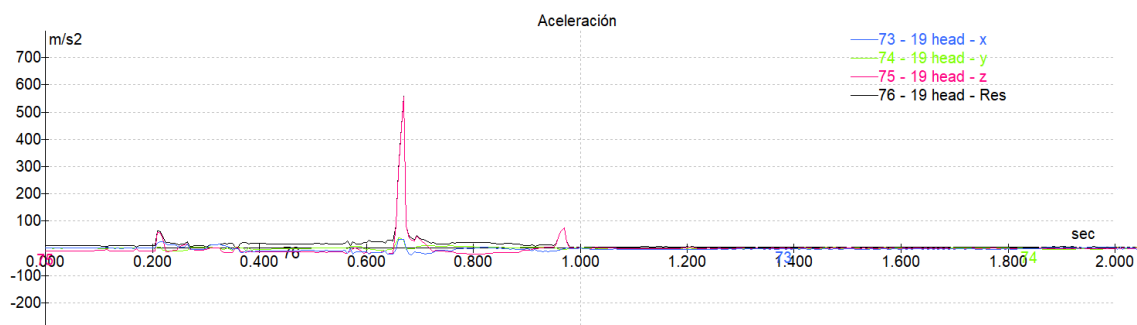


Figura 76. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /25 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

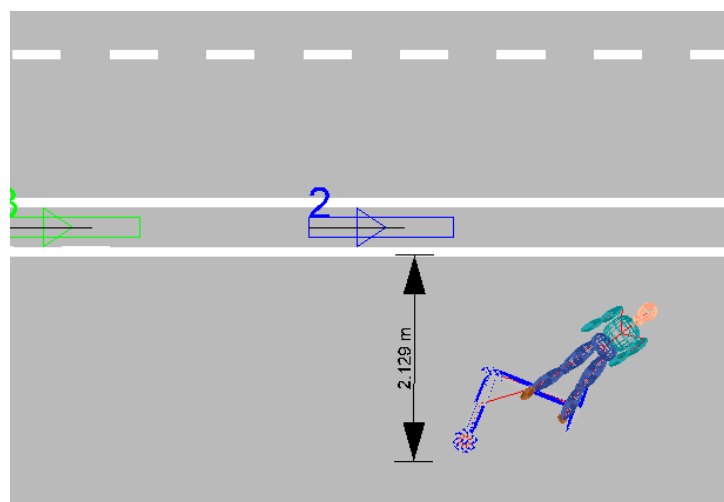


Figura 77. Distancia invadida en la calzada (10° /25 km/h)

Distancia de calzada invadida: 2.13 m.

6.1.2.6 Ángulo de impacto 40° - Velocidad 5 km/h

FUERZA DE CONTACTO

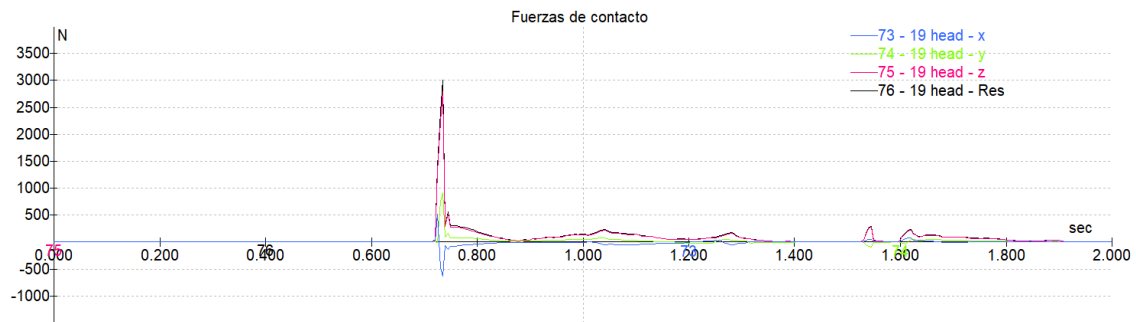


Figura 78. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /5 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.74 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

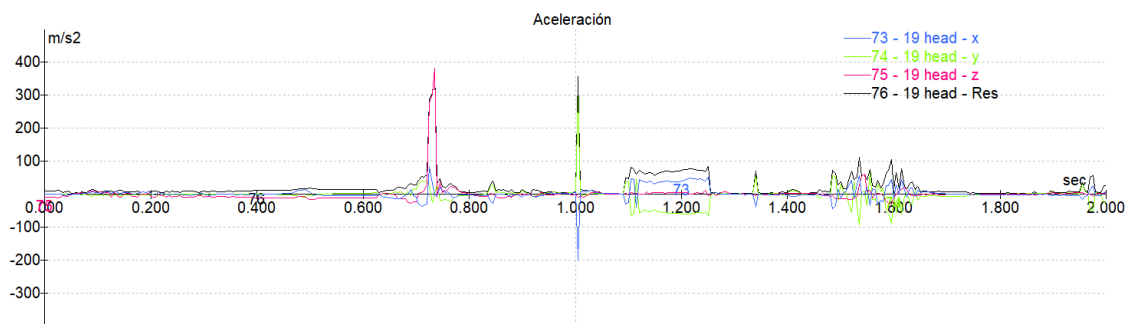


Figura 79. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /5 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

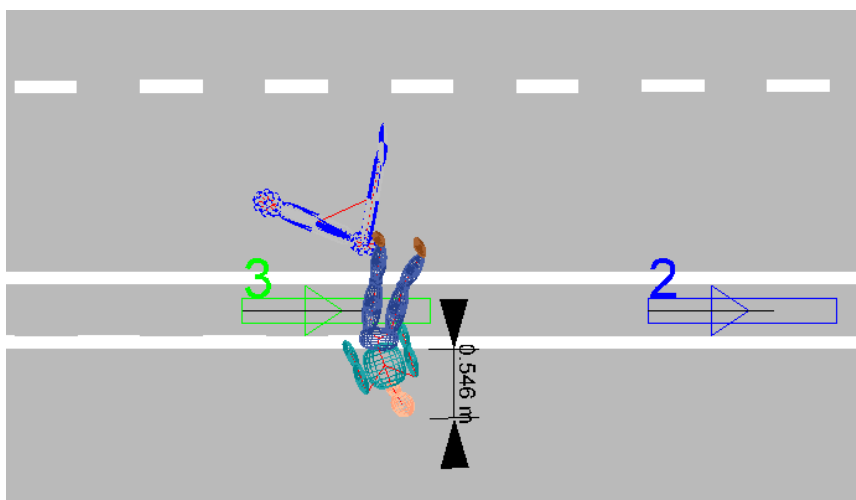


Figura 80. Distancia invadida en la calzada (40° /5 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.55 m.

6.1.2.7 Ángulo de impacto 40° - Velocidad 10 km/h

FUERZA DE CONTACTO

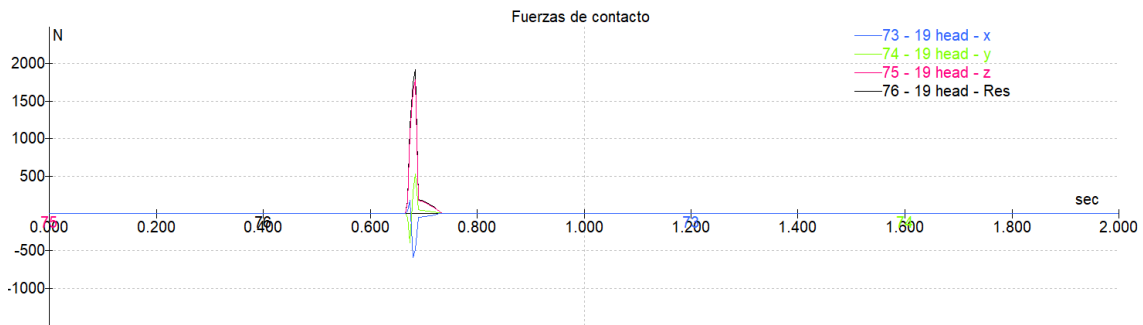


Figura 81. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° / 10 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.68 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

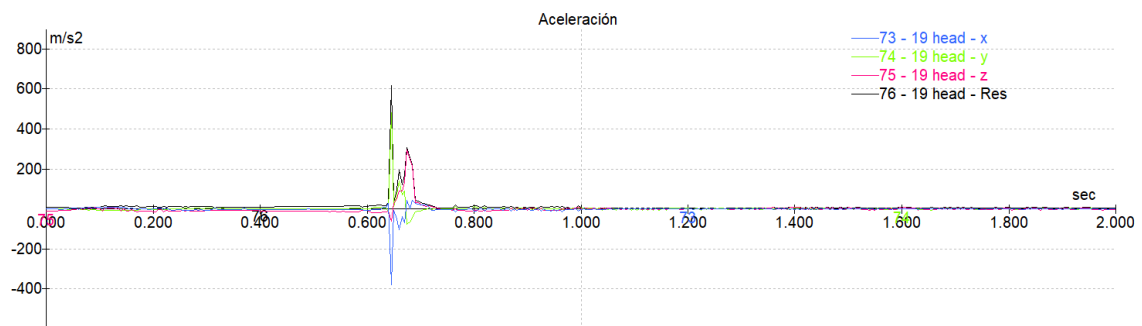


Figura 82. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° / 10 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

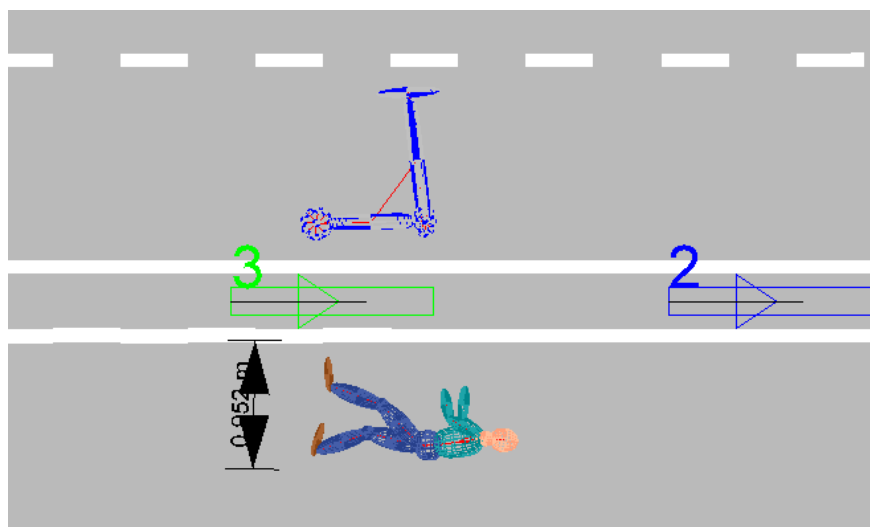


Figura 83. Distancia invadida en la calzada (40° / 10 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.95 m.

6.1.2.8 Ángulo de impacto 40° - Velocidad 15 km/h

FUERZA DE CONTACTO

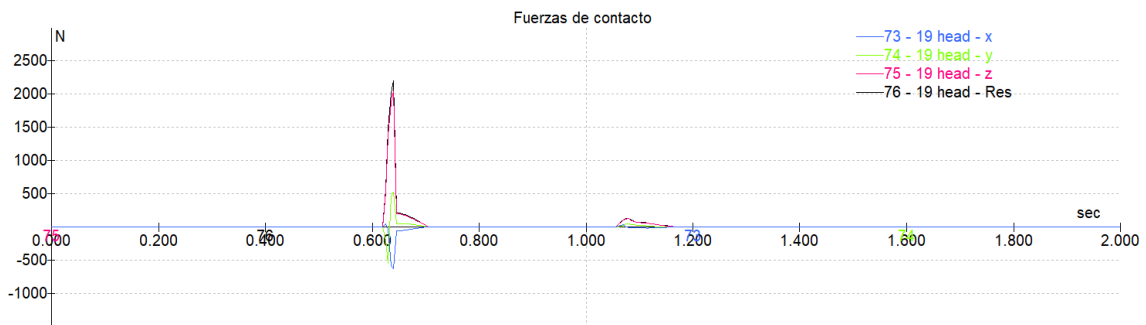


Figura 84. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /15 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.64 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

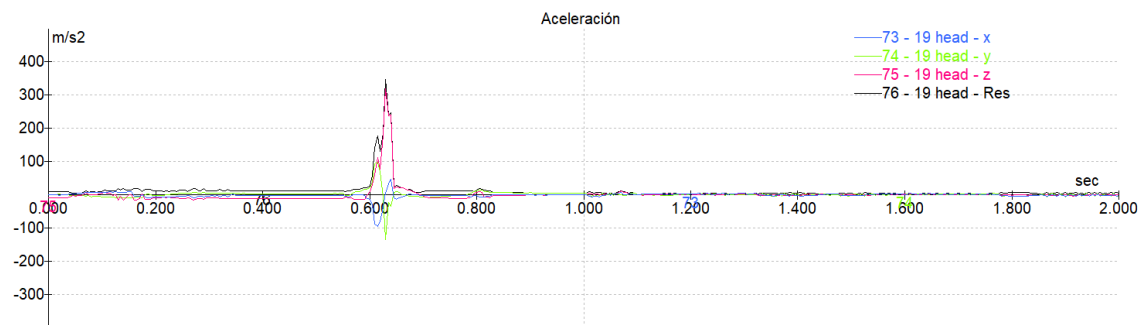


Figura 85. Evolución de la aceleración en la cabeza en la cabeza a lo largo de la caída (40° /15 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

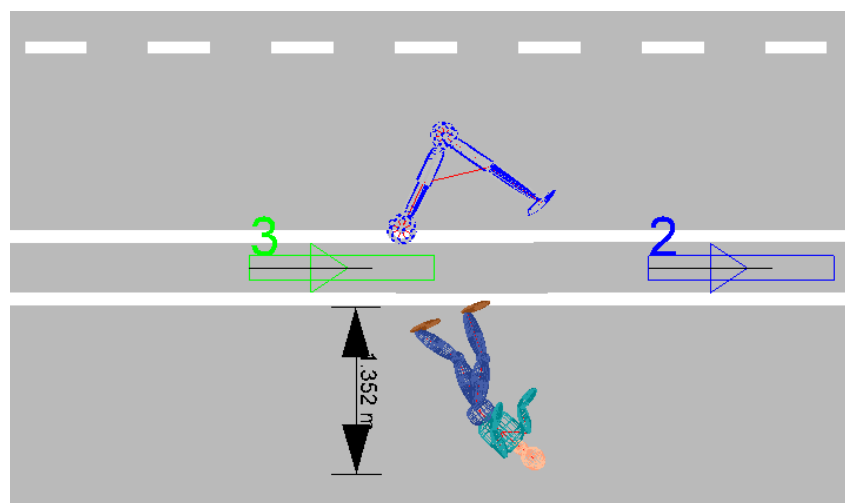


Figura 86. Distancia invadida en la calzada (40° /15 km/h)

Distancia de calzada invadida: 1.35 m

6.1.2.9 Ángulo de impacto 40° - Velocidad 20 km/h

FUERZA DE CONTACTO

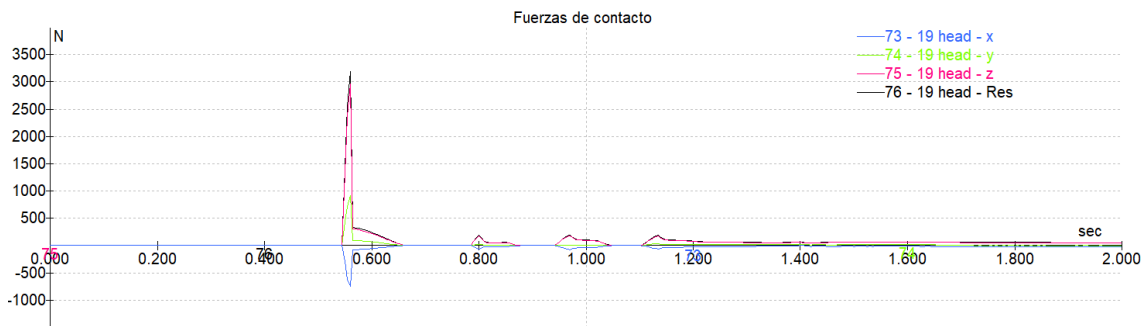


Figura 87. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /20 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.56 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

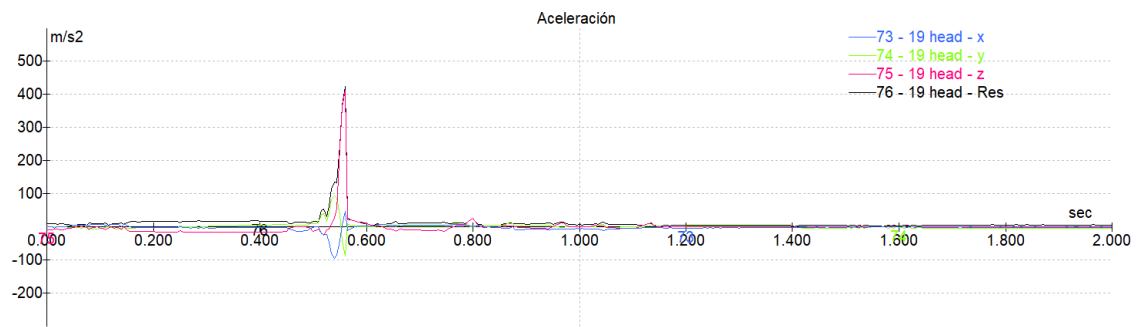


Figura 88. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /20 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

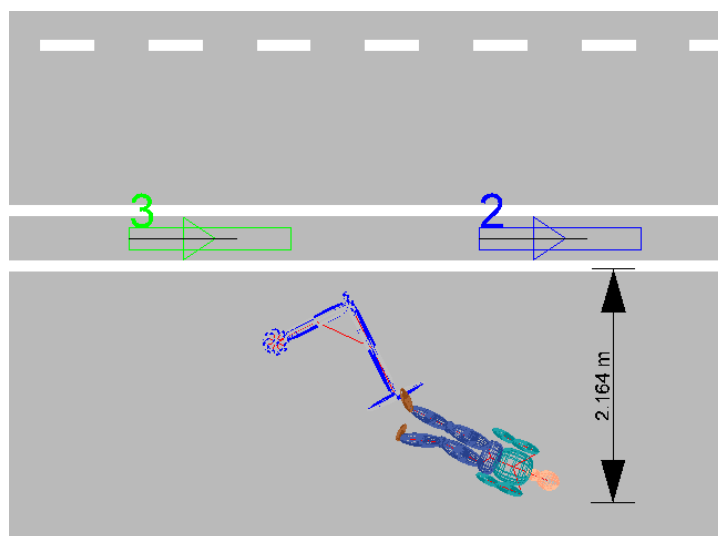


Figura 89. Distancia invadida en la calzada (40° /20 km/h)

Distancia de calzada invadida: 2.16 m

6.1.2.10 Ángulo de impacto 40° - Velocidad 25 km/h

FUERZA DE CONTACTO



Figura 90. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /25 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.55 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

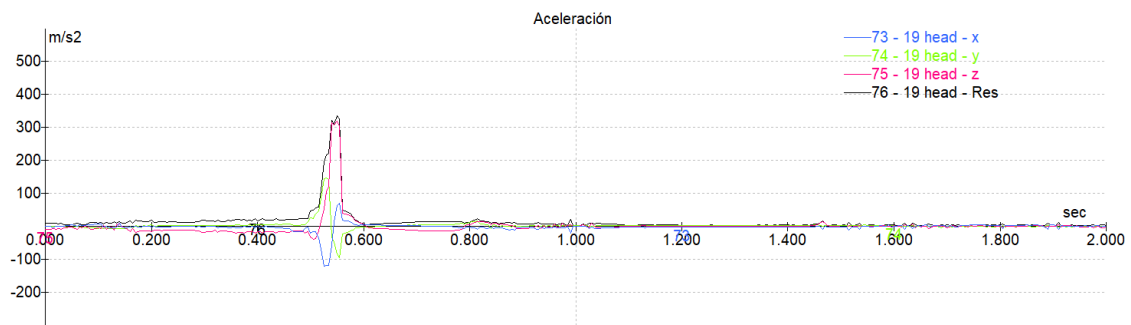


Figura 91. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /25 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

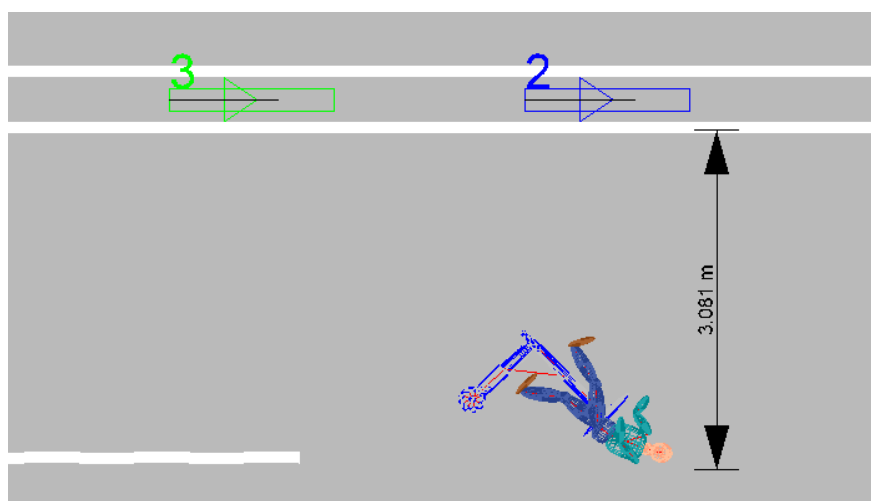


Figura 92. Distancia invadida en la calzada (40° /25 km/h)

Distancia de calzada invadida: 3.1 m

6.2 Colisión bicicleta-bordillo

6.2.1 Usuario masculino

6.2.1.1 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 5 km/h

Para esta simulación, se incluyen imágenes relacionadas con la reconstrucción del accidente provenientes del software utilizado, para las simulaciones subsiguientes, las imágenes en mención se relacionan en el ANEXO I. Es preciso resaltar que las zonas rojas de los multibodies simulados, representan contacto.

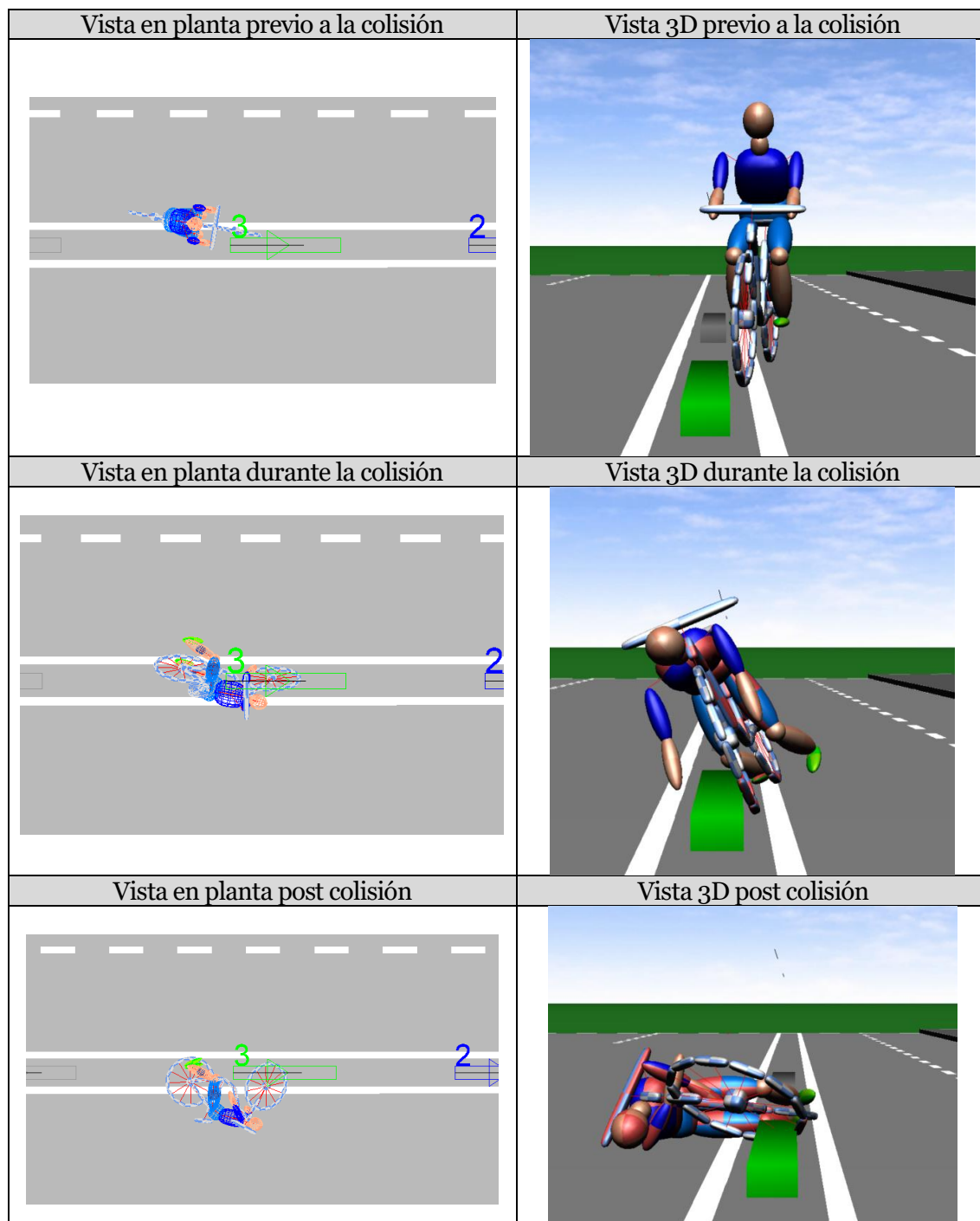


Figura 93. Reconstrucción del accidente para la colisión del usuario en bicicleta contra el bordillo a 5km/h

FUERZA DE CONTACTO



Figura 94. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10°/5 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 1.5s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

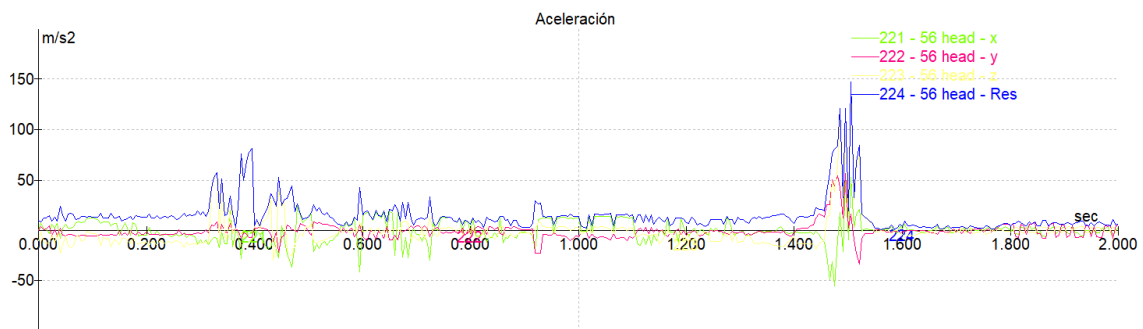


Figura 95. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /5 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

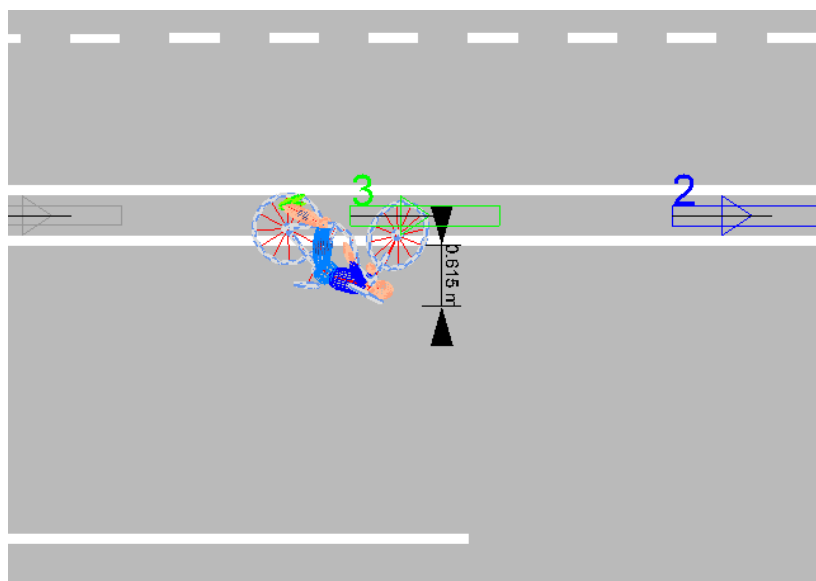


Figura 96. Distancia invadida en la calzada (10° /5 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.615 m

6.2.1.2 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 10 km/h

FUERZA DE CONTACTO



Figura 97. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° / 10 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.89s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

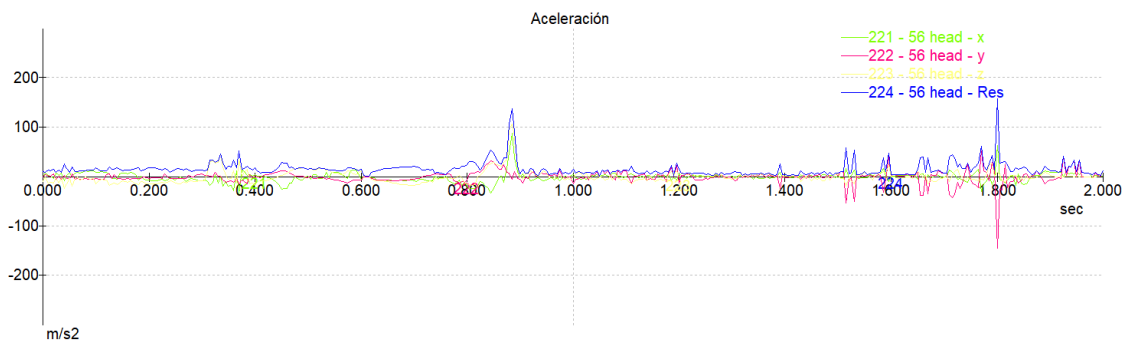


Figura 98. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° / 10 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

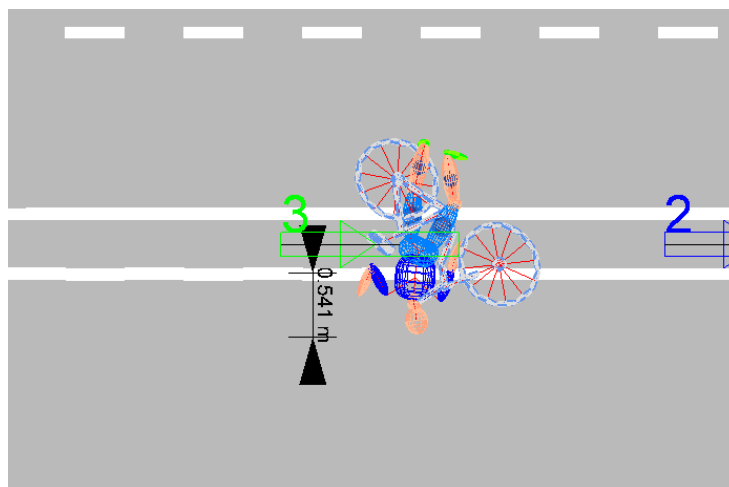


Figura 99. Distancia invadida en la calzada (10° / 10 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.54m

6.2.1.3 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 15 km/h

FUERZA DE CONTACTO

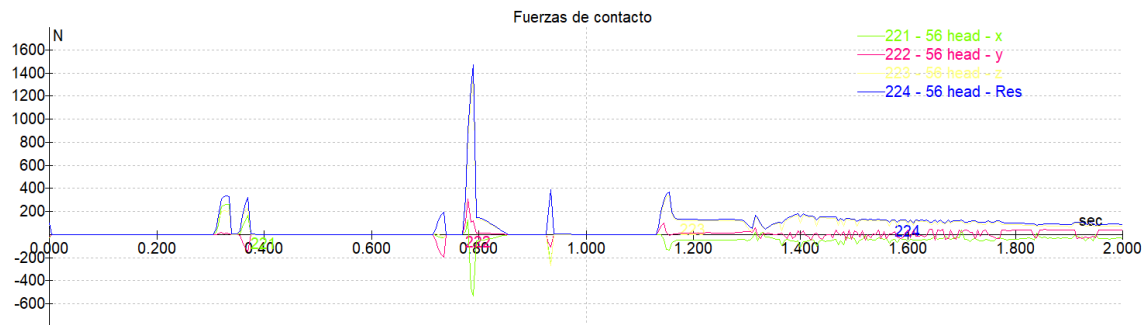


Figura 100. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.79 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

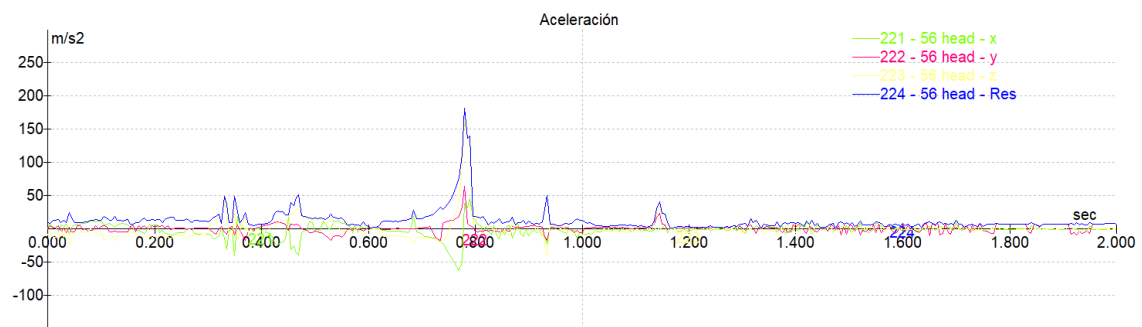


Figura 101. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h)

DISTANCIA DE CALZADA INVADIDA

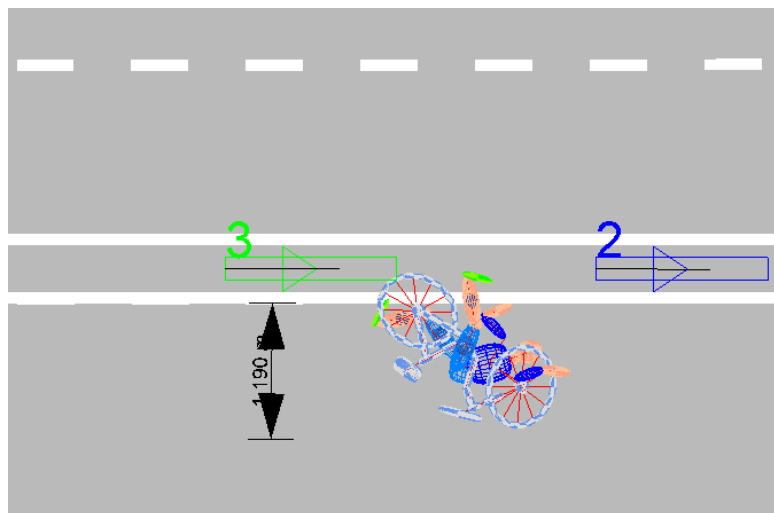


Figura 102. Distancia invadida en la calzada (10° /15 km/h)

Distancia de calzada invadida: 1.2 m

6.2.1.4 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 20 km/h

FUERZA DE CONTACTO

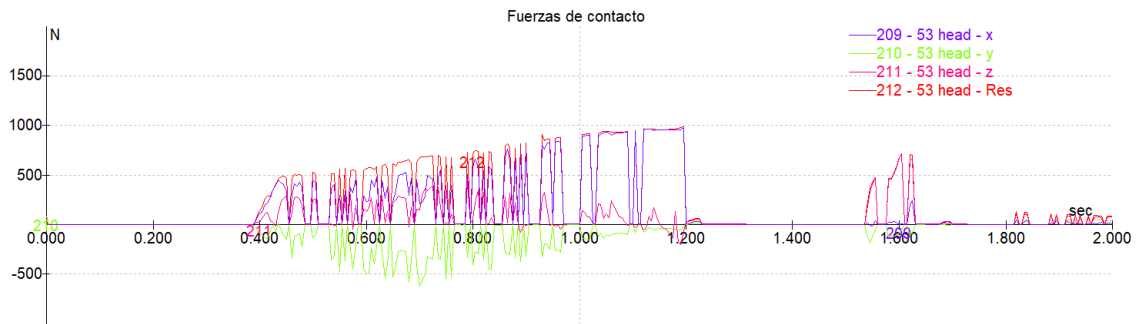


Figura 103. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° / 20 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 1.19 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

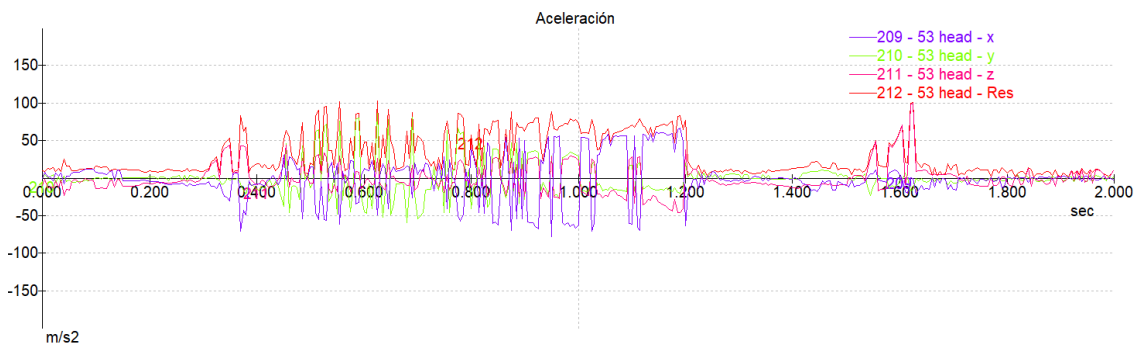


Figura 104. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° / 20 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

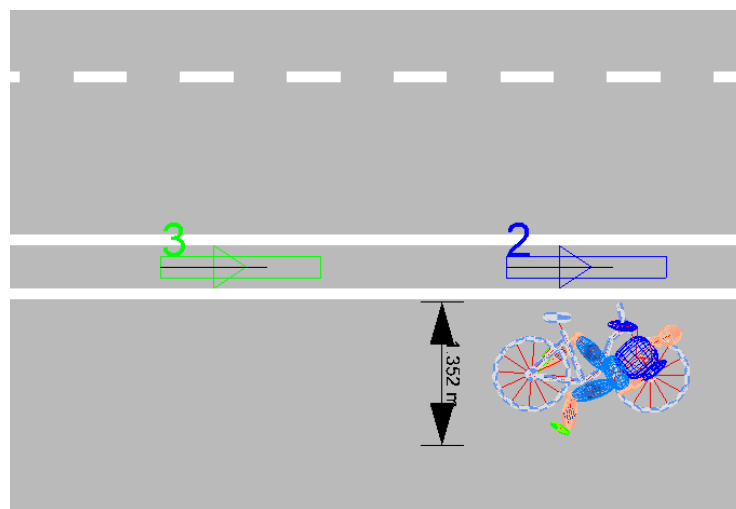


Figura 105. Distancia invadida en la calzada (10° / 20 km/h)

Distancia de calzada invadida: 1.35 m

6.2.1.5 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 25 km/h

FUERZA DE CONTACTO

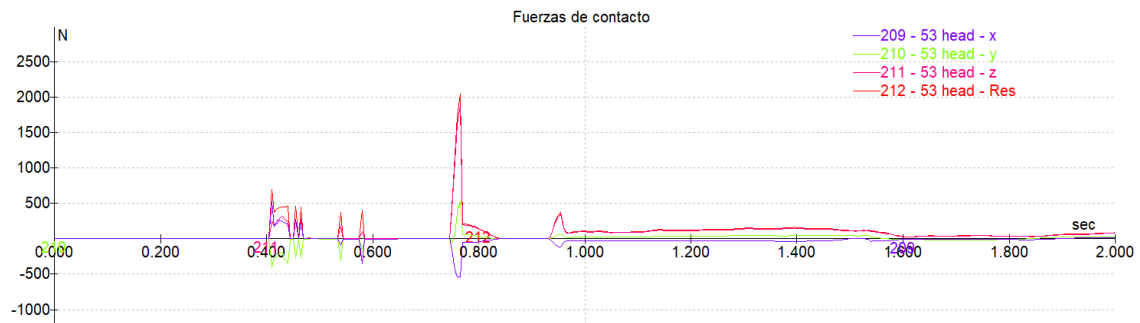


Figura 106. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /25 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza 0.76 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

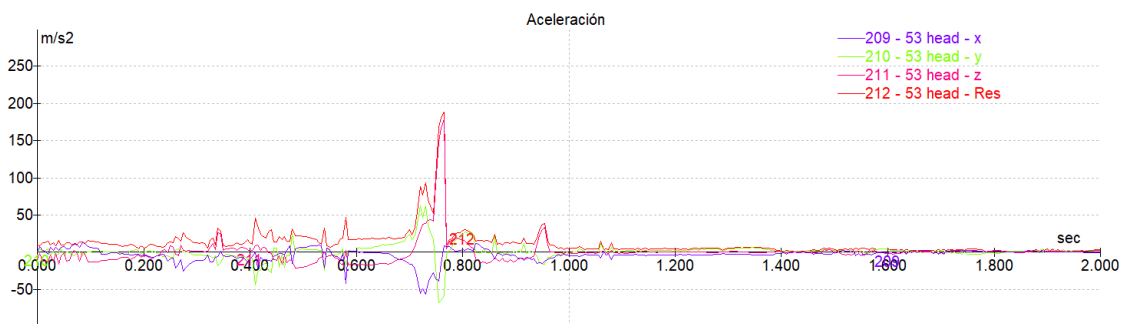


Figura 107. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /25 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

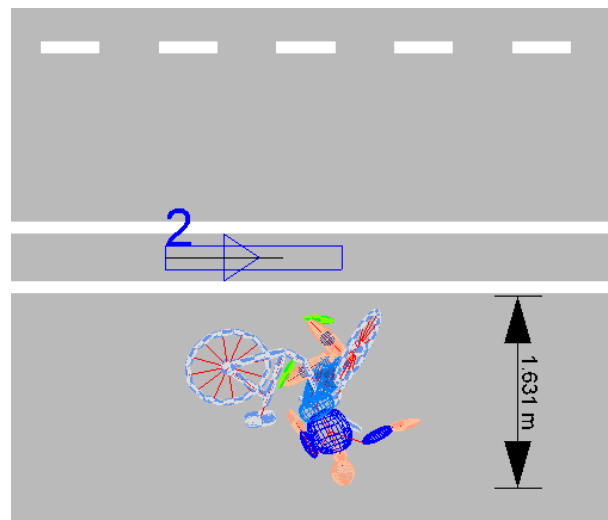


Figura 108. Distancia invadida en la calzada (10° /25 km/h)

Distancia de calzada invadida: 1.63 m

6.2.1.6 Ángulo de impacto 40° - Velocidad 5 km/h

FUERZA DE CONTACTO

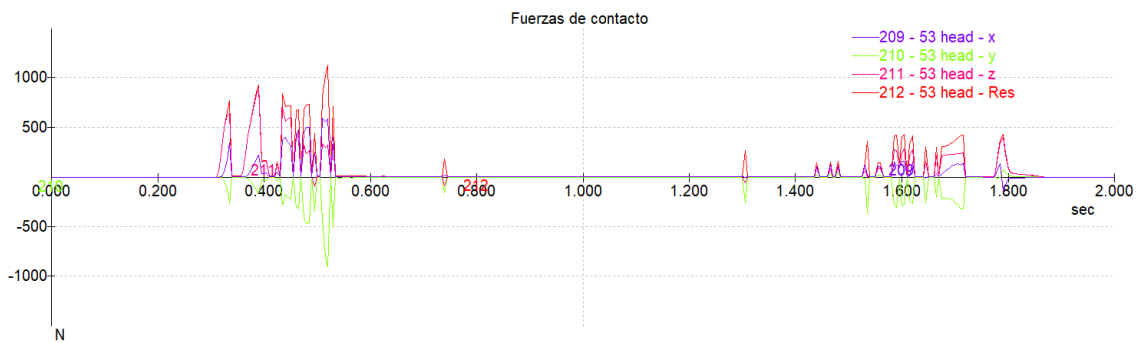


Figura 109. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /5 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza 0.5 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

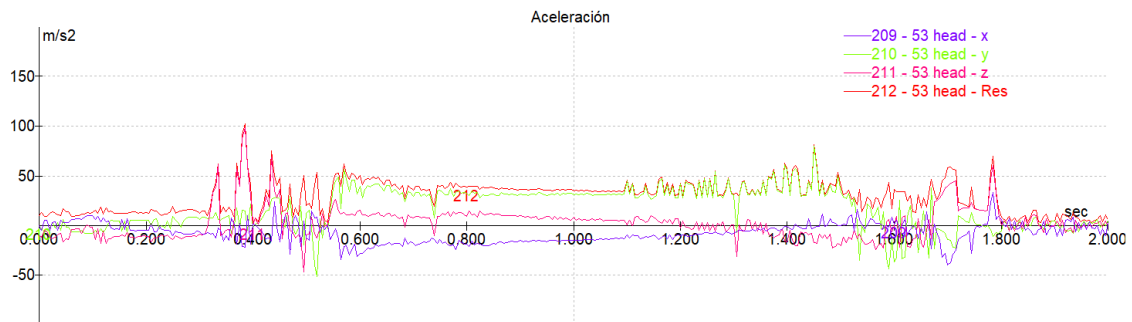


Figura 110. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /5 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

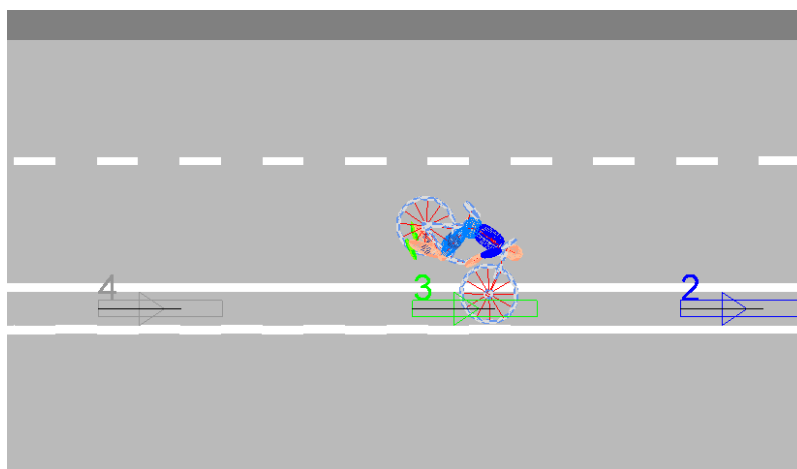


Figura 111. Distancia invadida en la calzada (40° /5 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0 m.

6.2.1.7 Ángulo de impacto 40° - Velocidad 10 km/h

FUERZA DE CONTACTO

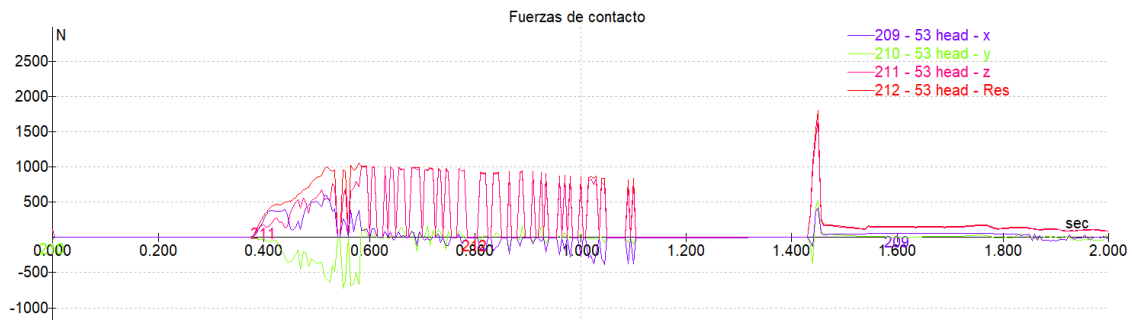


Figura 112. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /10 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza 1.45 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

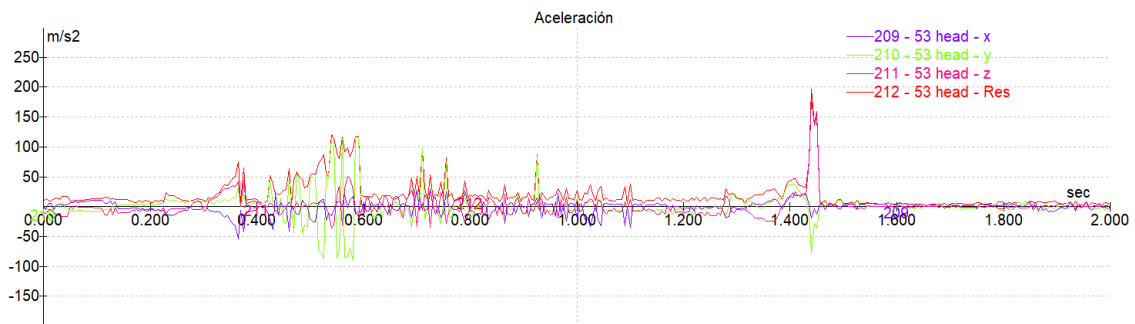


Figura 113. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /10 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

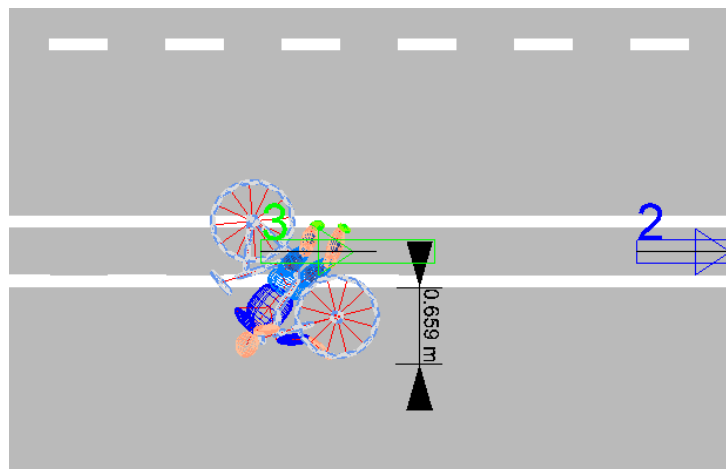


Figura 114. Distancia invadida en la calzada (40° /10 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.66 m.

6.2.1.8 Ángulo de impacto 40° - Velocidad 15 km/h

FUERZA DE CONTACTO

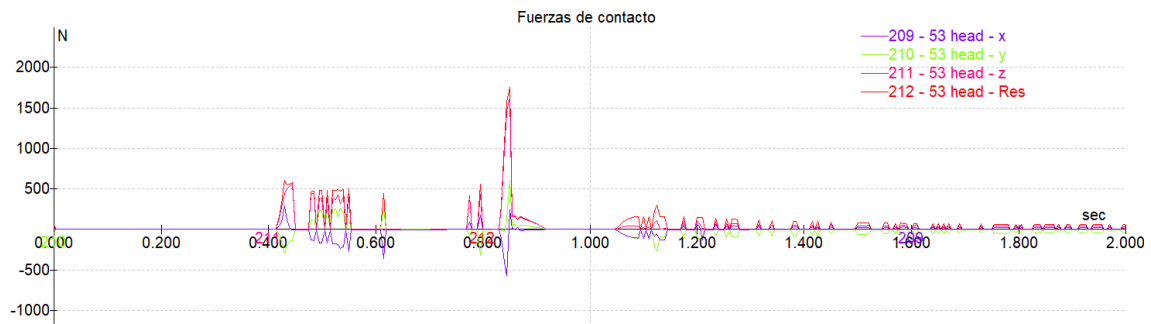


Figura 115. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /15 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza 0.85 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

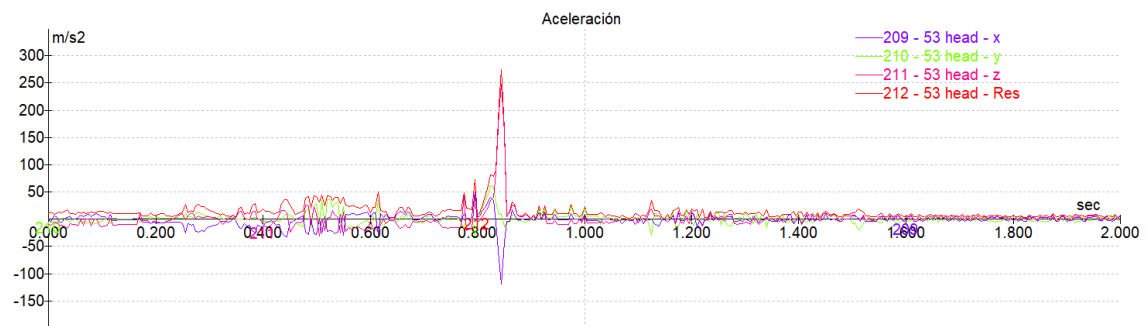


Figura 116. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /15 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

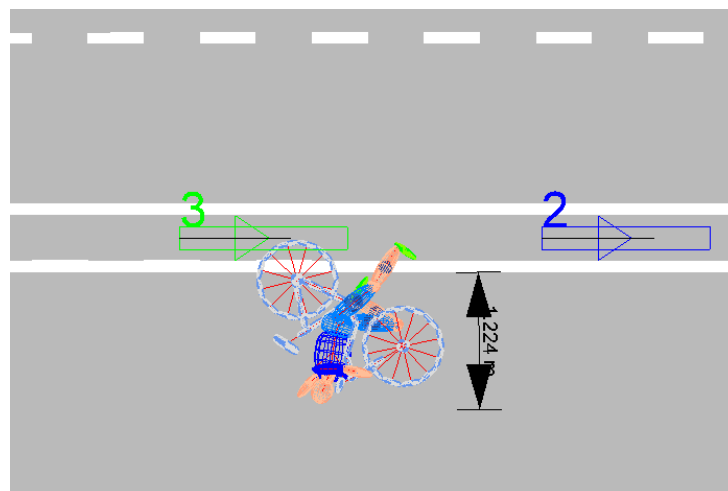


Figura 117. Distancia invadida en la calzada (40° /15 km/h)

Distancia de calzada invadida: 1.22 m

6.2.1.9 Ángulo de impacto 40° - Velocidad 20 km/h

FUERZA DE CONTACTO

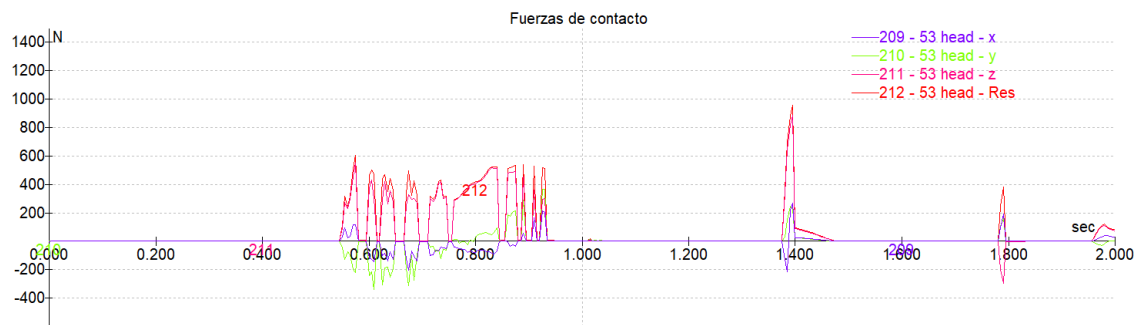


Figura 118. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° / 20 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 1.40 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

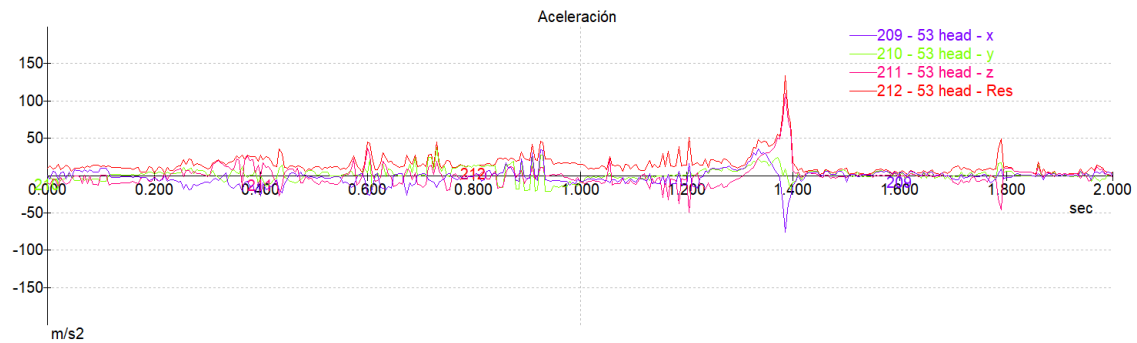


Figura 119. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° / 20 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

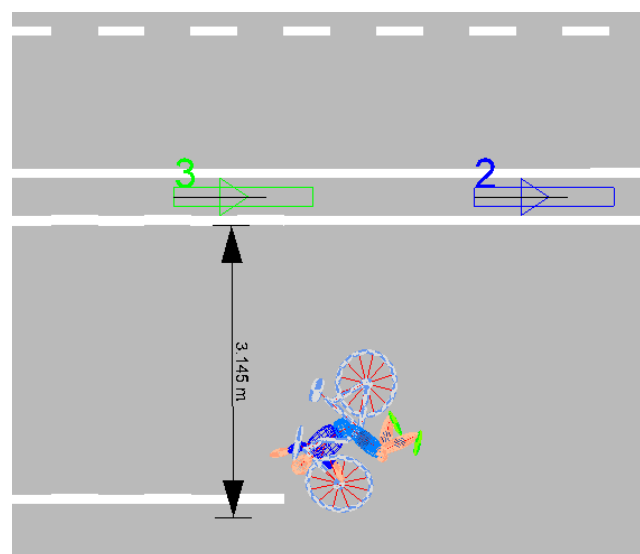


Figura 120. Distancia invadida en la calzada (40° / 20 km/h)

Distancia de calzada invadida: 3.14 m

6.2.1.10 Ángulo de impacto 40° - Velocidad 25 km/h

FUERZA DE CONTACTO

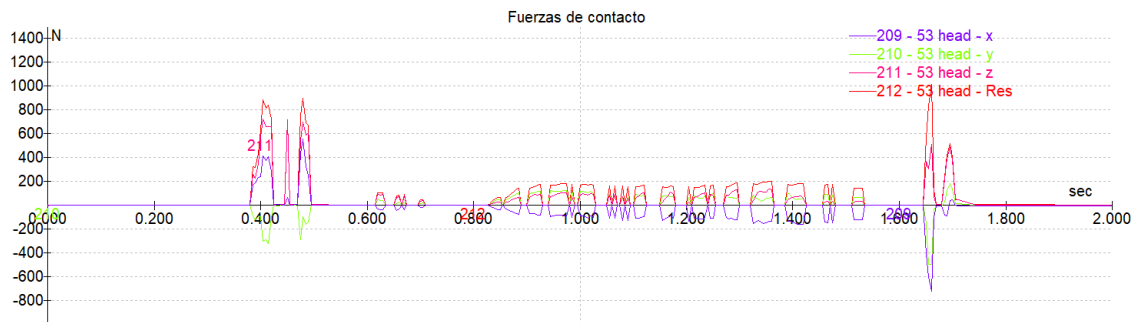


Figura 121. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /25 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 1.65 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

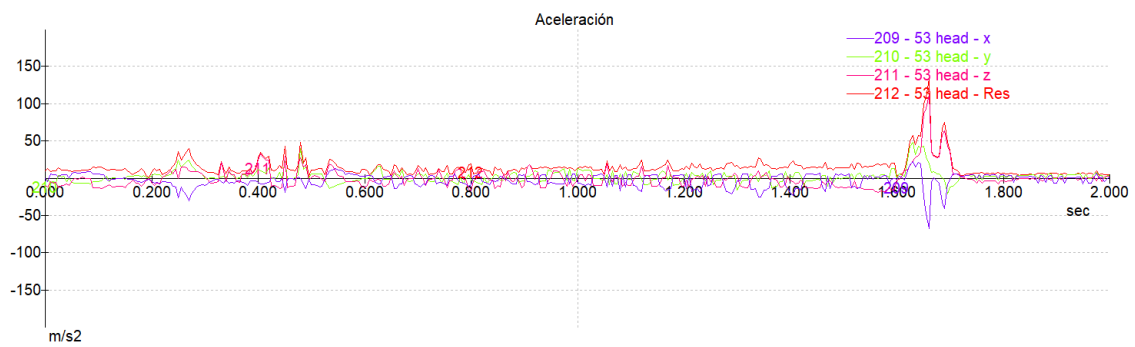


Figura 122. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /25 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

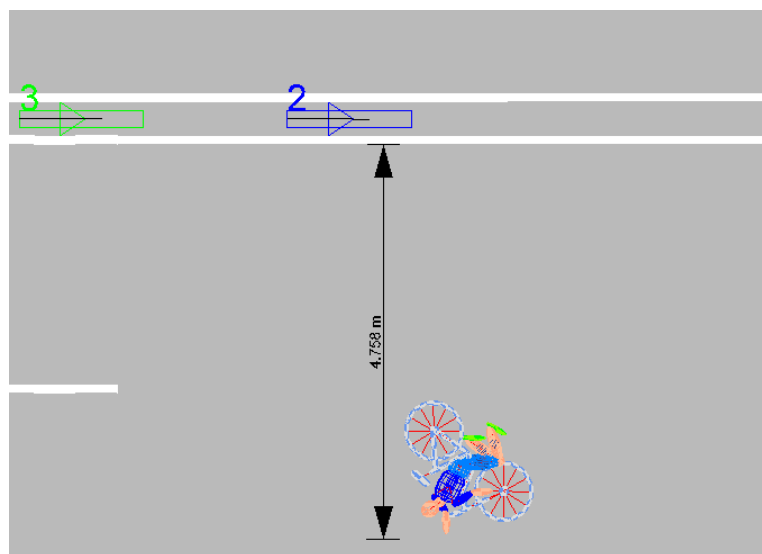


Figura 123. Distancia invadida en la calzada (40° /25 km/h)

Distancia de calzada invadida: 4.76 m

6.2.2 Usuaría femenina

6.2.2.1 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 5 km/h

FUERZA DE CONTACTO

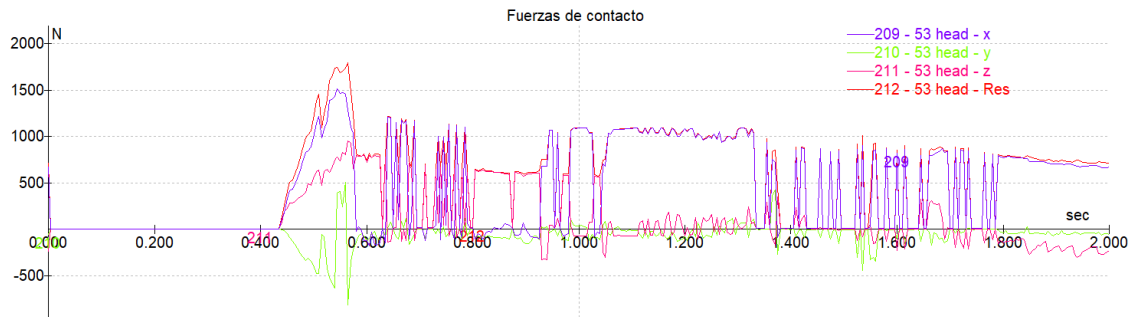


Figura 124. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10°/5 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.56 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

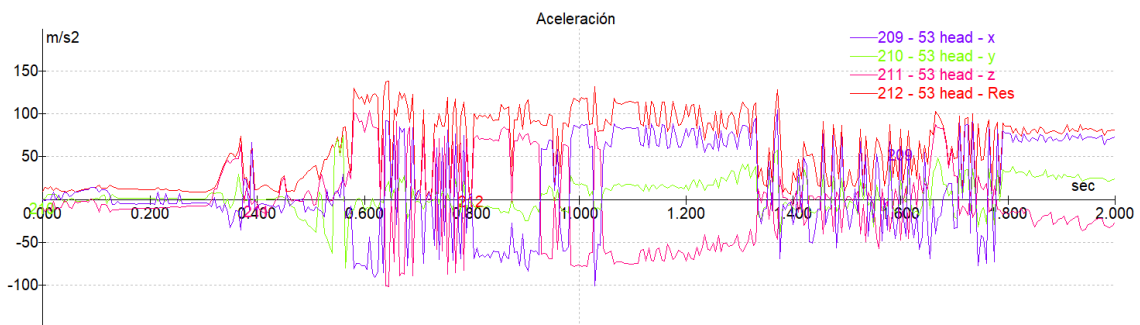


Figura 125. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /5 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

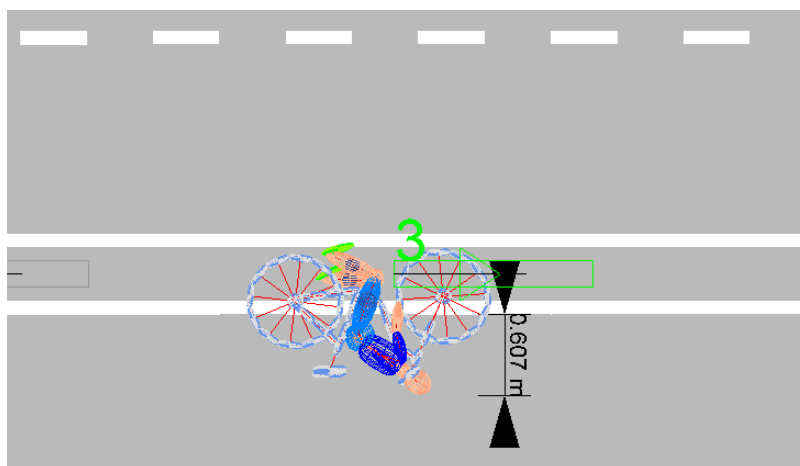


Figura 126. Distancia invadida en la calzada (10° /5 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.61 m

6.2.2.2 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 10 km/h

FEURZAS DE CONTACTO

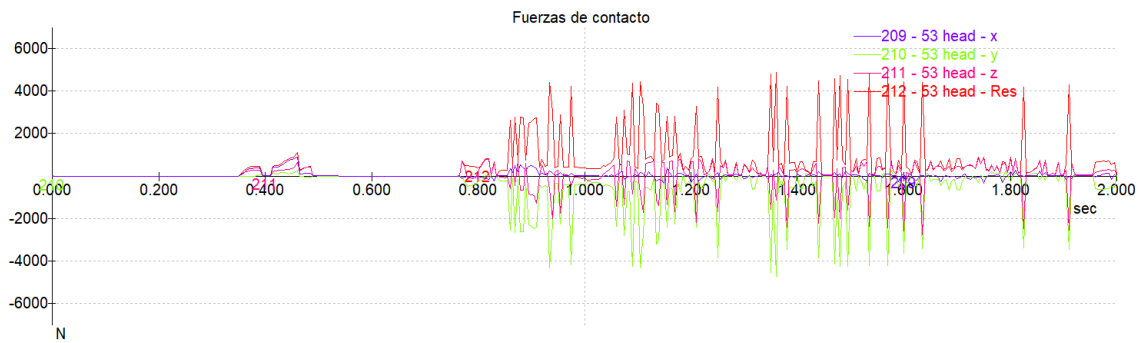


Figura 127. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° / 10 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 1.57 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

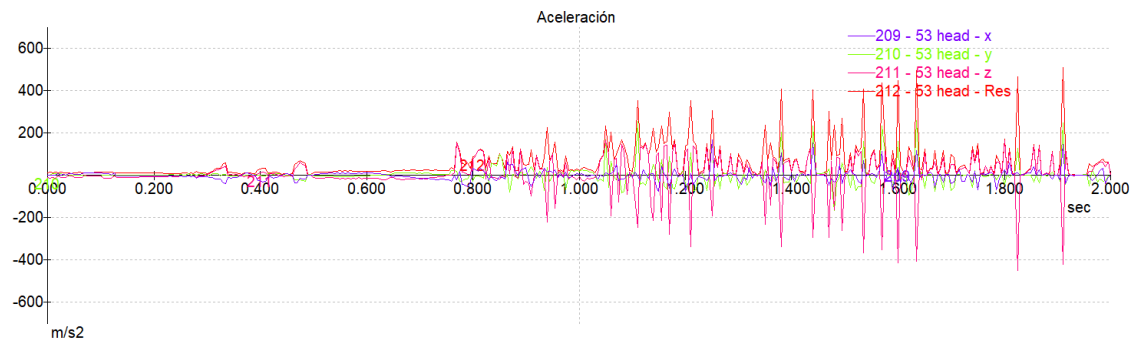


Figura 128. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° / 10 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CABEZA

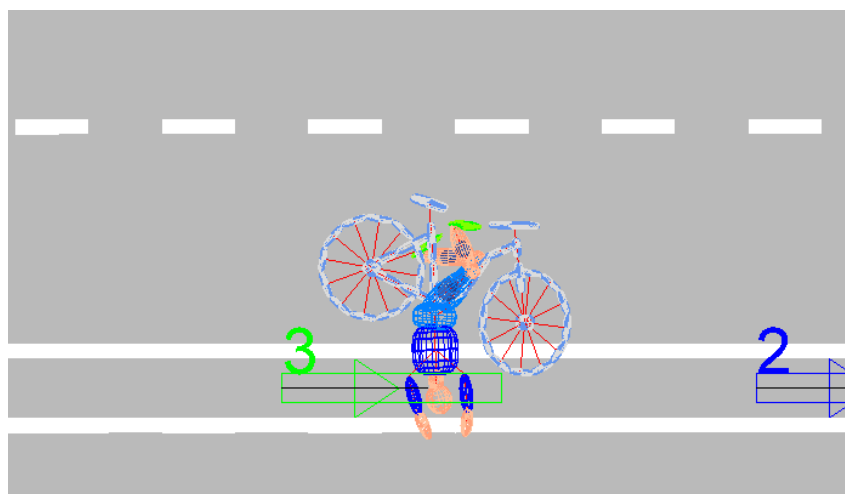


Figura 129. Distancia invadida en la calzada (10° / 10 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0 m

6.2.2.3 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 15 km/h

FUERZAS DE CONTACTO

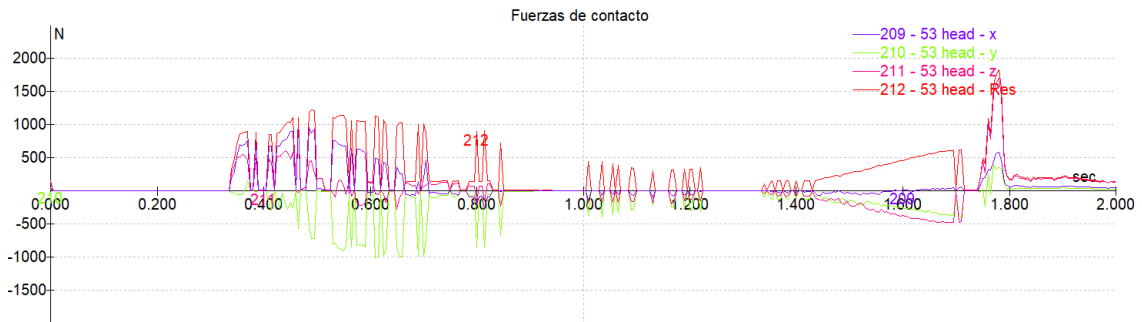


Figura 130. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 1.78 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

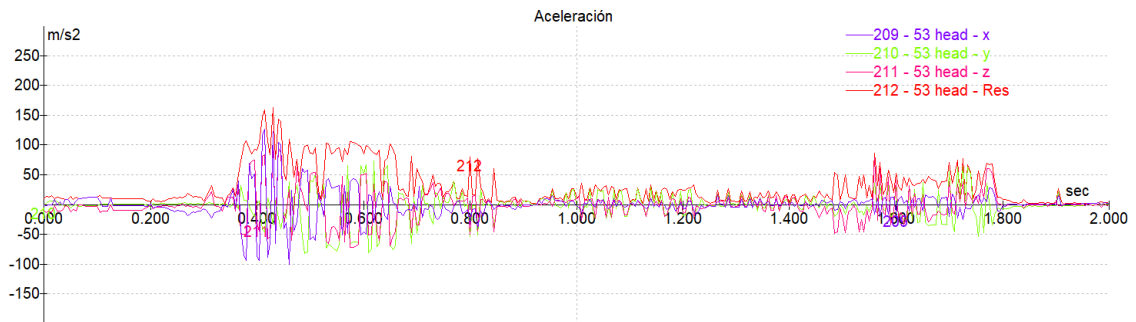


Figura 131. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

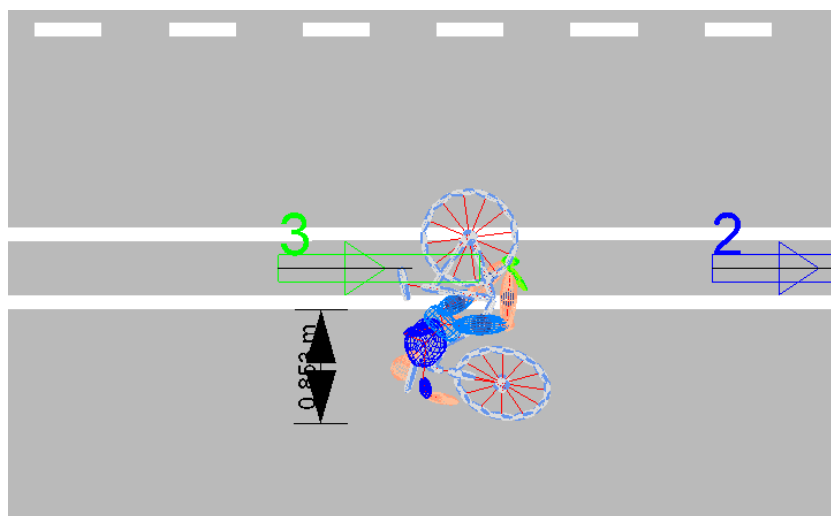


Figura 132. Distancia invadida en la calzada (10° /15 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.85 m

6.2.2.4 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 20 km/h

FUERZA DE CONTACTO

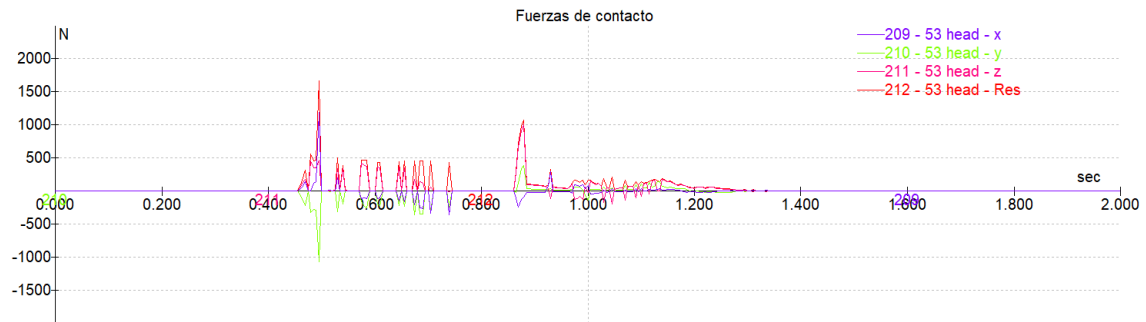


Figura 133. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° / 20 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.5 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

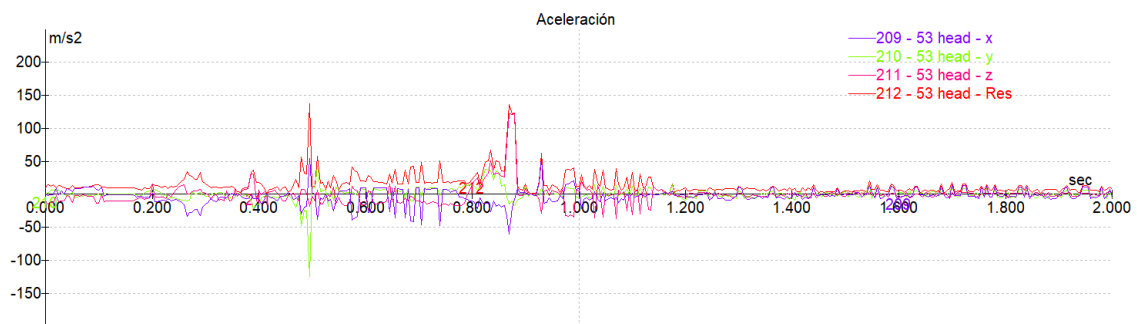


Figura 134. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° / 20 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

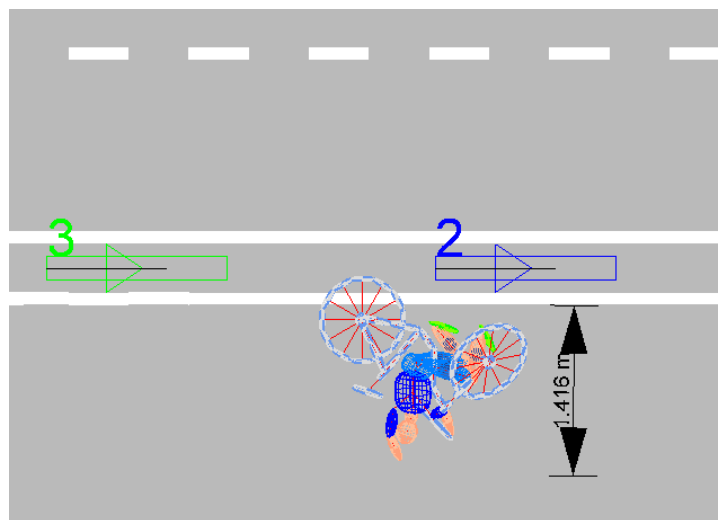


Figura 135. Distancia invadida en la calzada (10° / 20 km/h)

Distancia de calzada invadida: 1.42 m.

6.2.2.5 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 25 km/h

FUERZA DE CONTACTO



Figura 136. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /25 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.95 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

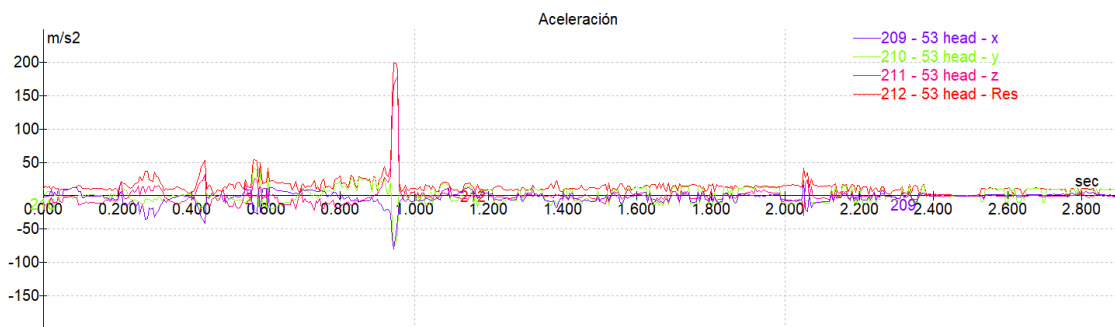


Figura 137. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /25 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

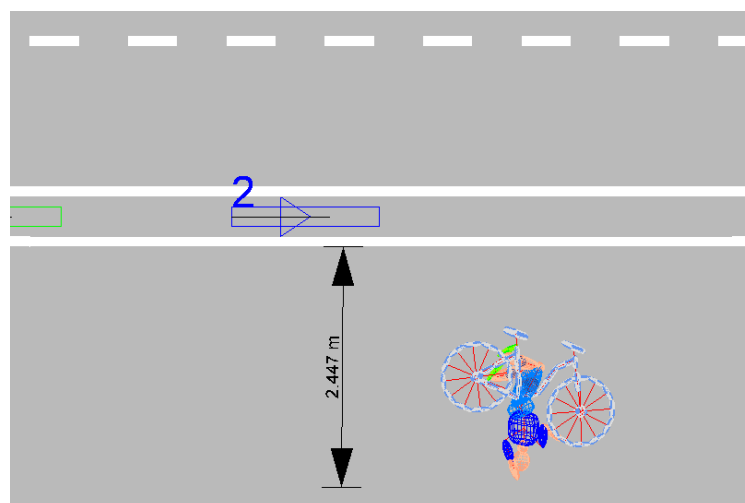


Figura 138. Distancia invadida en la calzada (10° /25 km/h)

Distancia de calzada invadida: 2.45 m

6.2.2.6 Ángulo de impacto 40° - Velocidad 5 km/h

FUERZA DE CONTACTO

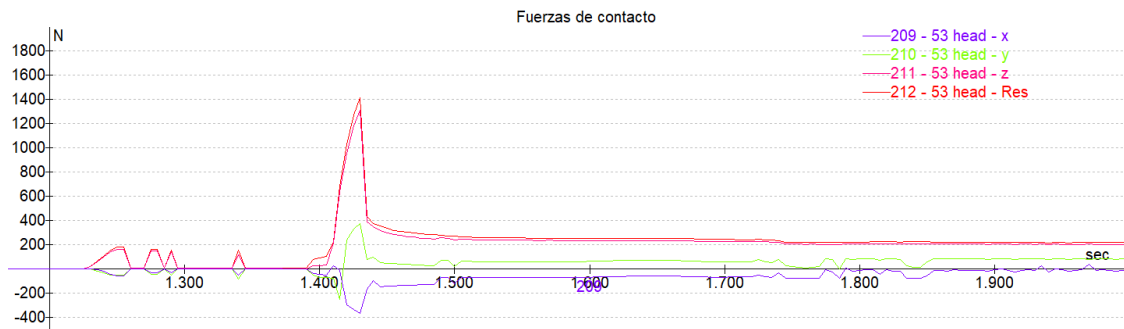


Figura 139. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° / 5 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 1.43 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

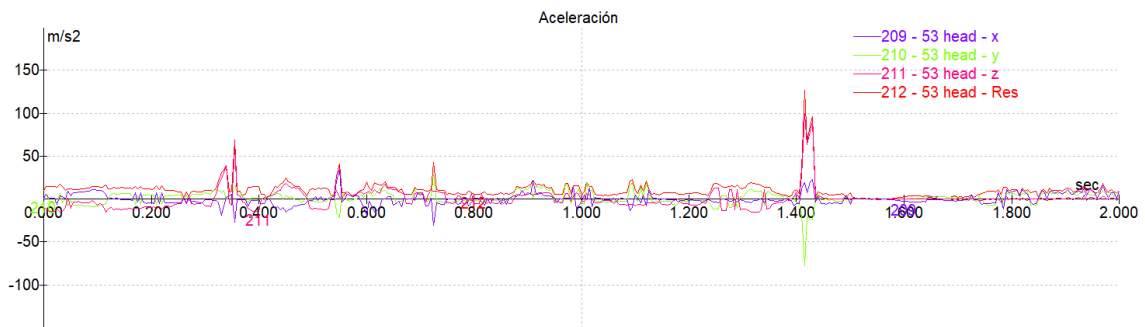


Figura 140. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° / 5 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

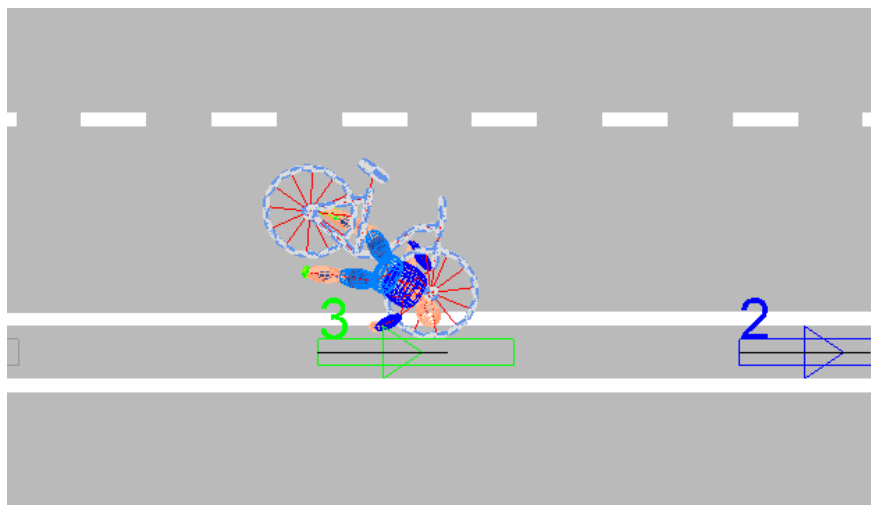


Figura 141. Distancia invadida en la calzada (40° / 5 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0 m.

6.2.2.7 Ángulo de impacto 40° - Velocidad 10 km/h

FUERZA DE CONTACTO

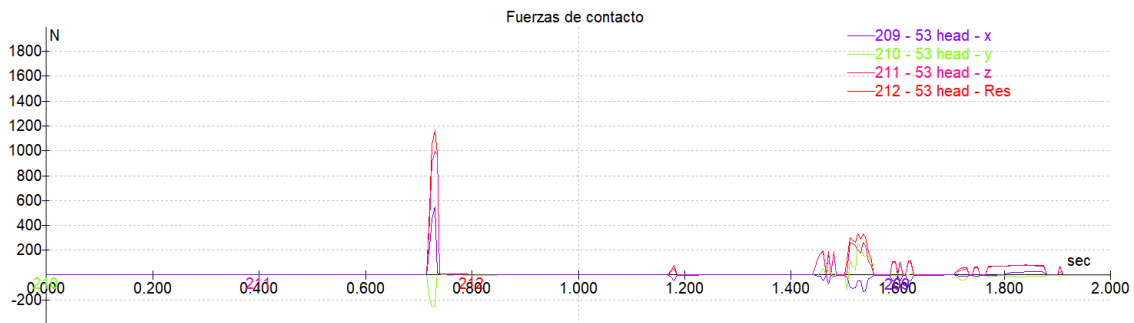


Figura 142. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /10 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.73 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

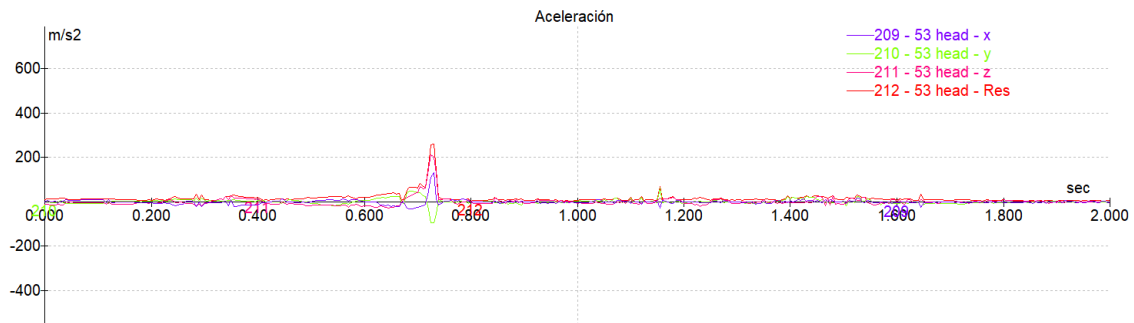


Figura 143. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /10 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

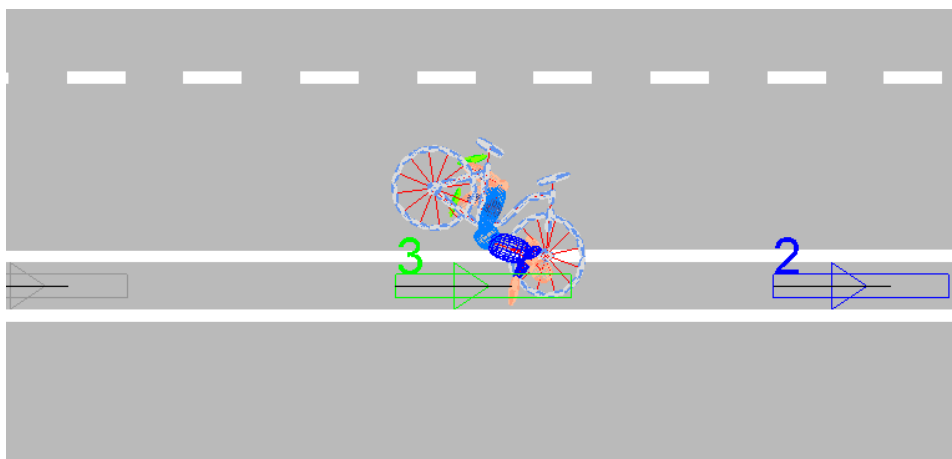


Figura 144. Distancia invadida en la calzada (40° /10 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0 m.

6.2.2.8 Ángulo de impacto 40° - Velocidad 15 km/h

FUERZA DE CONTACTO

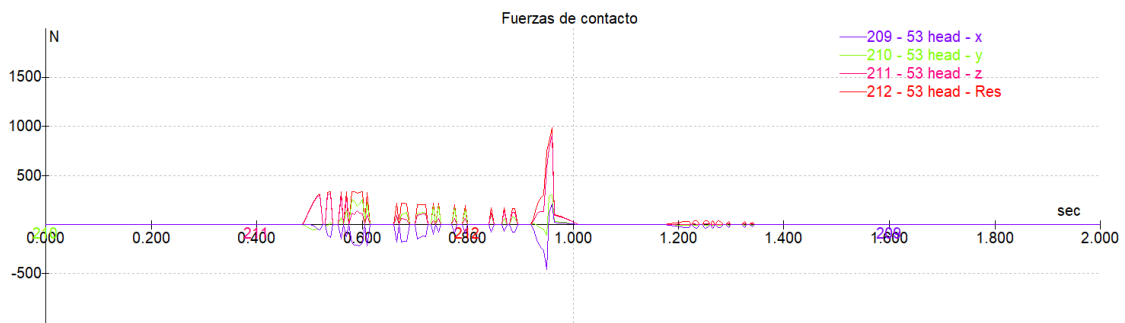


Figura 145. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /15 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 1.23 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

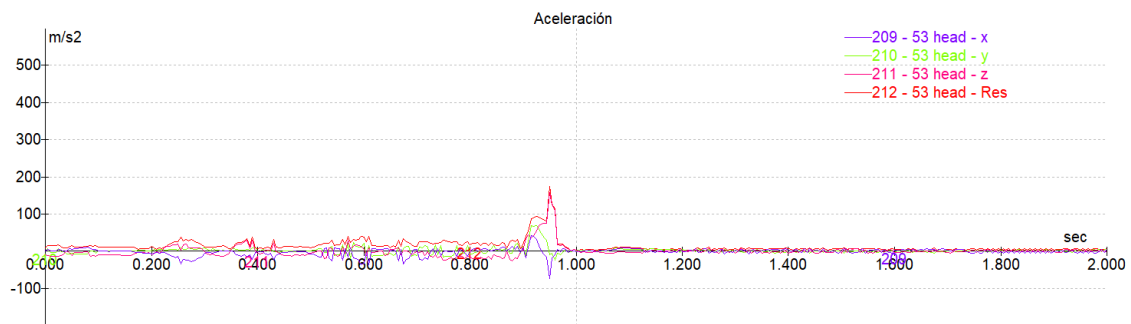


Figura 146. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /15 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

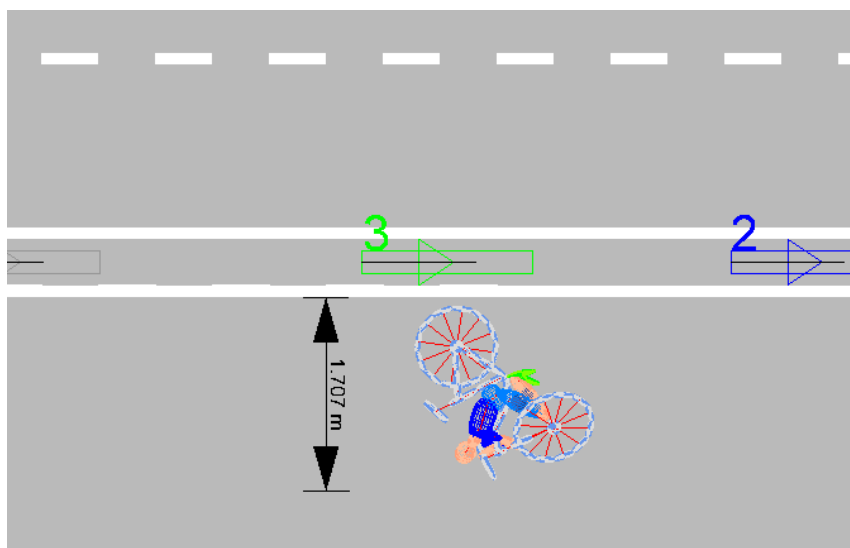


Figura 147. Distancia invadida en la calzada (40° /15 km/h)

Distancia de calzada invadida: 1.71 m.

6.2.2.9 Ángulo de impacto 40° - Velocidad 20 km/h

FUERZA DE CONTACTO

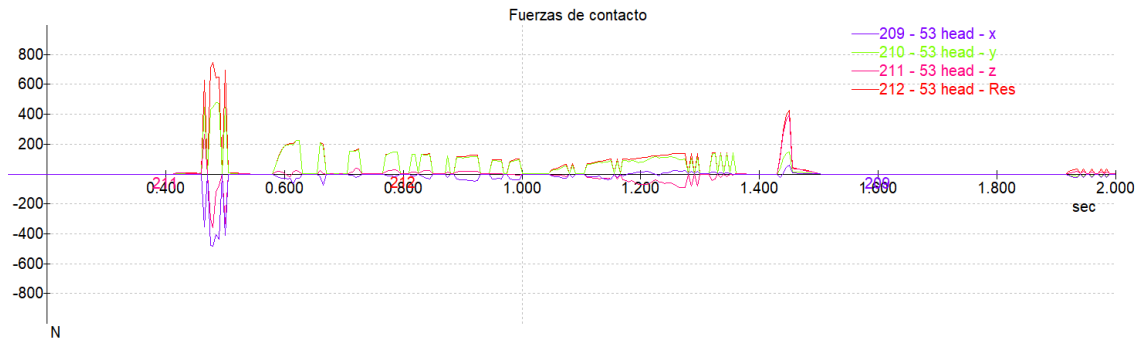


Figura 148. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /20 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.48 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

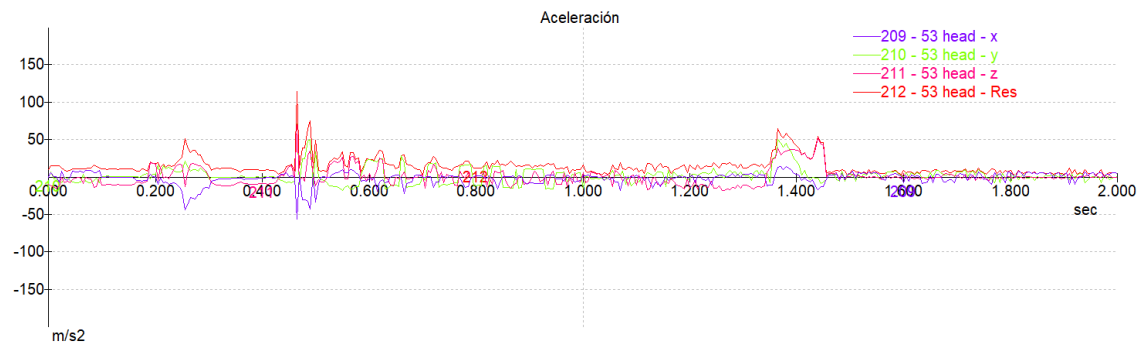


Figura 149. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /20 km/h)

DISTANCIA INVADIDA DE CALZADA

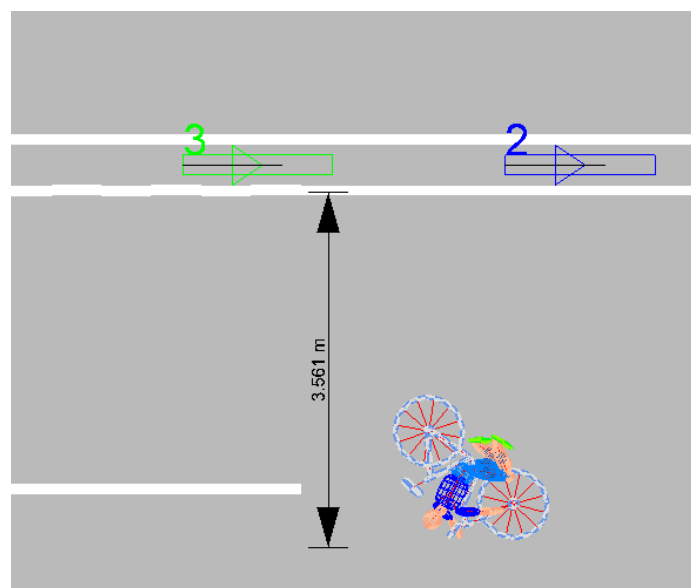


Figura 150. Distancia invadida en la calzada (40° /20 km/h)

Distancia de calzada invadida: 3.5 m

6.2.2.10 Ángulo de impacto 40° - Velocidad 25 km/h

FUERZA DE CONTACTO

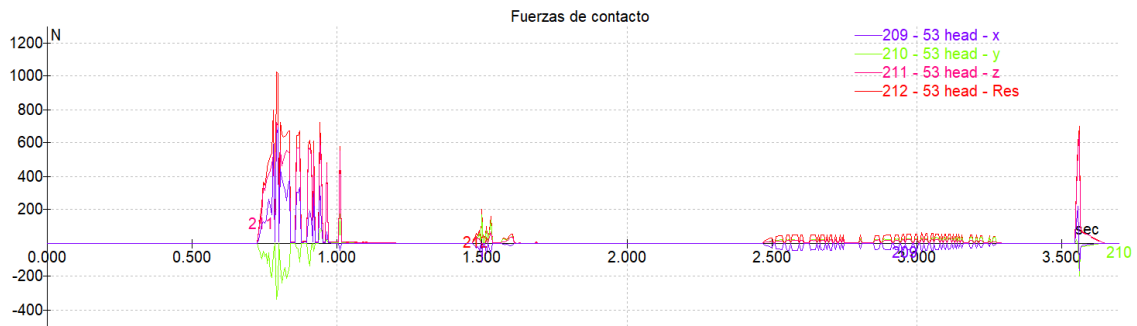


Figura 151. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (40° /25 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.79 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

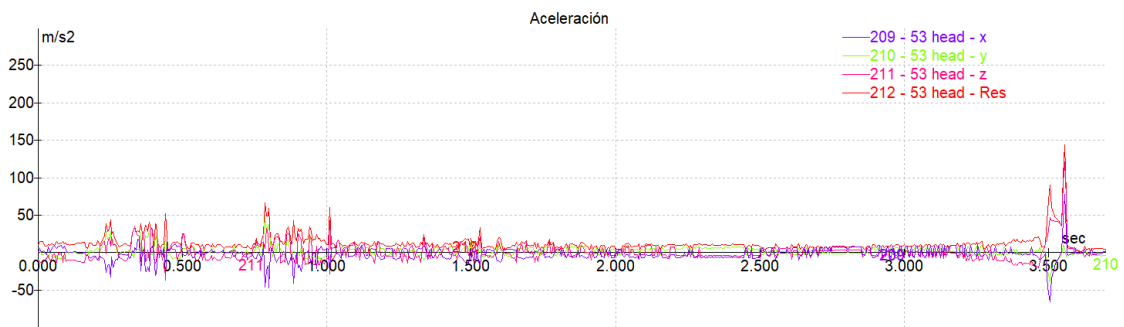


Figura 152. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° /25 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

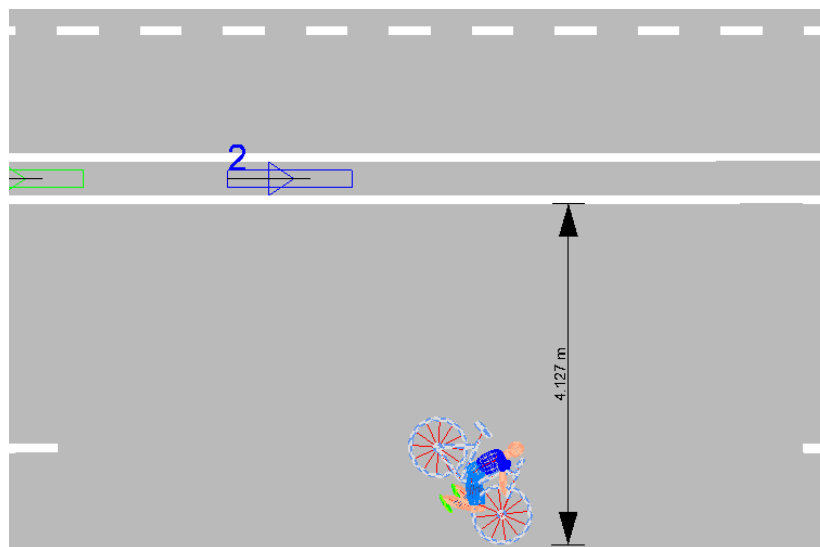


Figura 153. Distancia invadida en la calzada (40° /25 km/h)

Distancia de calzada invadida: 4.13 m

6.3 **Colisión patinete eléctrico-bolardo**

Para este caso se tuvo en cuenta una consideración adicional a las mencionadas en el numeral 6, relacionadas con el peso del bolardo y su rigidez:

- Peso bolardo: Considerando bolardos con anclaje y reflectores se tuvo en cuenta un valor de 5kg.
- Suspensión del elemento: De acuerdo con las características disponibles en el software, esta opción se consideró como “blanda”.
- Geométricamente el bolardo se simuló como un prisma rectangular ya que las características del software no incluyen este tipo de elementos (bolardo) con sus características particulares.
- Para las colisiones simuladas a 0°, el peso del bolardo se varió, toda vez que el comportamiento del software para este tipo de escenarios no representaba comportamientos coherentes evidenciando alteraciones mínimas en las caídas por cuenta del obstáculo, en este caso, el bolardo, por lo cual se asignó mayor peso a este elemento separador en función de la velocidad, así:
 - 5 km/h: peso bolardo 50 kg.
 - 10 km/h: peso bolardo 50 kg
 - 15 km/h: peso bolardo 15 kg
 - 20 km/h: peso bolardo 5kg
 - 25 km/h: peso bolardo 40 kg

6.3.1 **Usuario masculino**

6.3.1.1 *Ángulo de impacto 10° - Velocidad 5 km/h*

Para esta simulación, se incluyen imágenes relacionadas con la reconstrucción del accidente provenientes del software utilizado, para las simulaciones subsiguientes, las imágenes en mención se relacionan en el ANEXO I. Es preciso resaltar que las zonas rojas de los multibodies simulados, representan contacto.

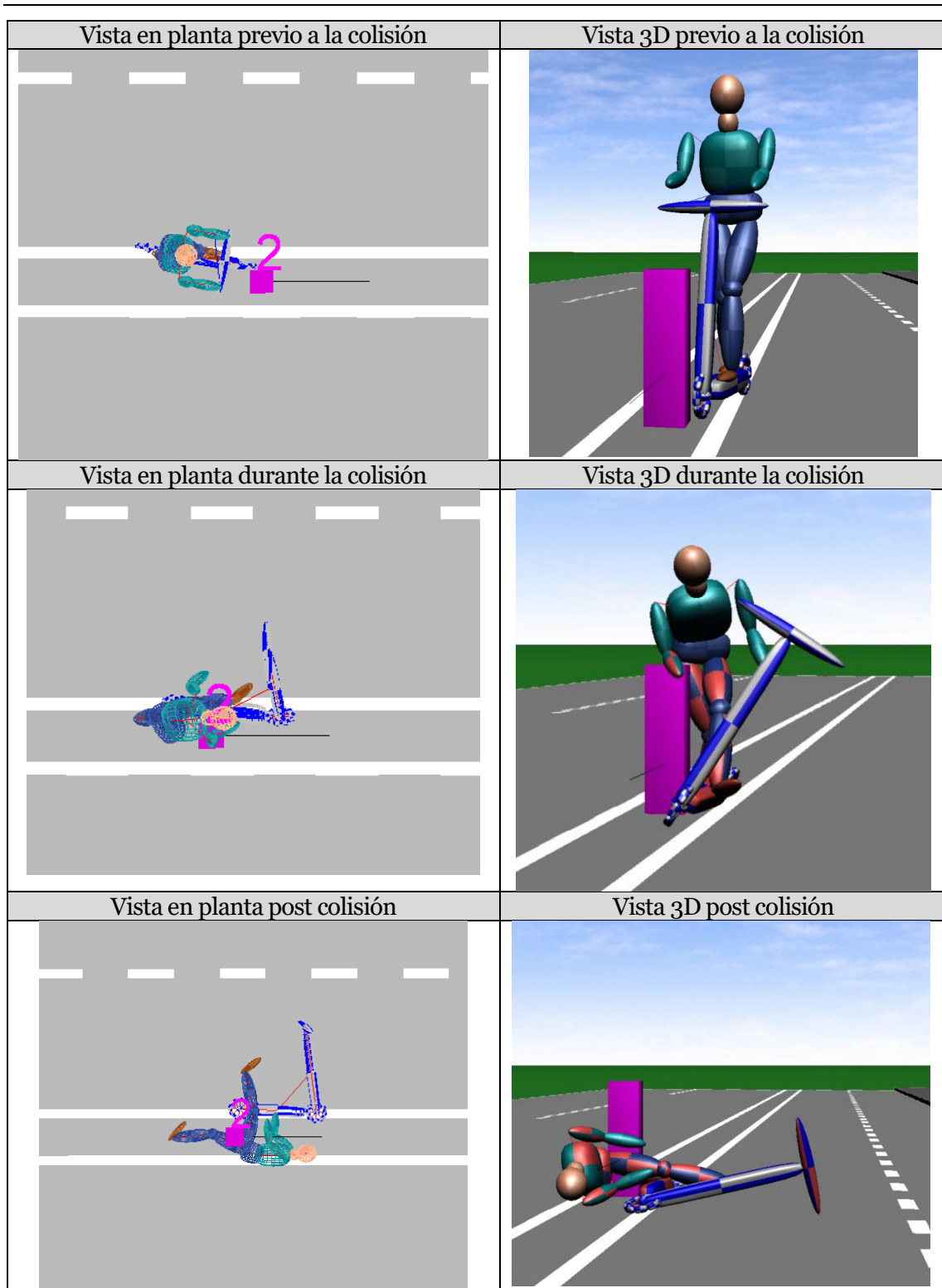


Figura 154. Reconstrucción del accidente para la colisión del ciclista contra el bolardo a 5km/h

FUERZA DE CONTACTO



Figura 155. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10°/5 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.88 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

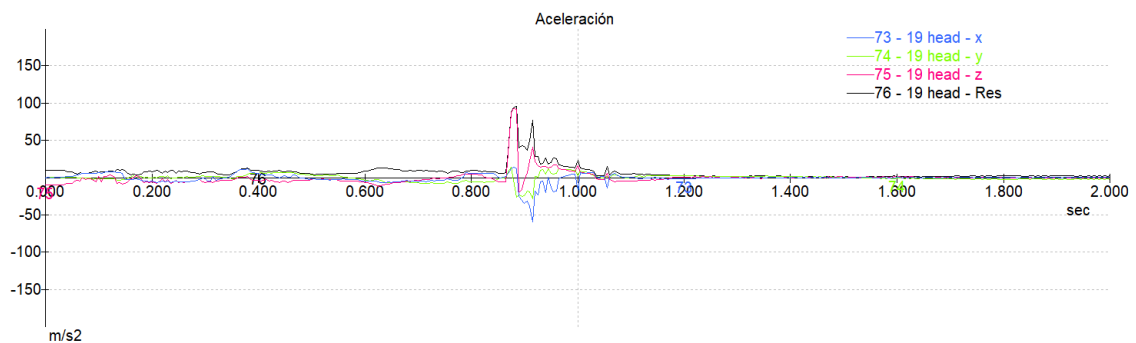


Figura 156. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /5 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

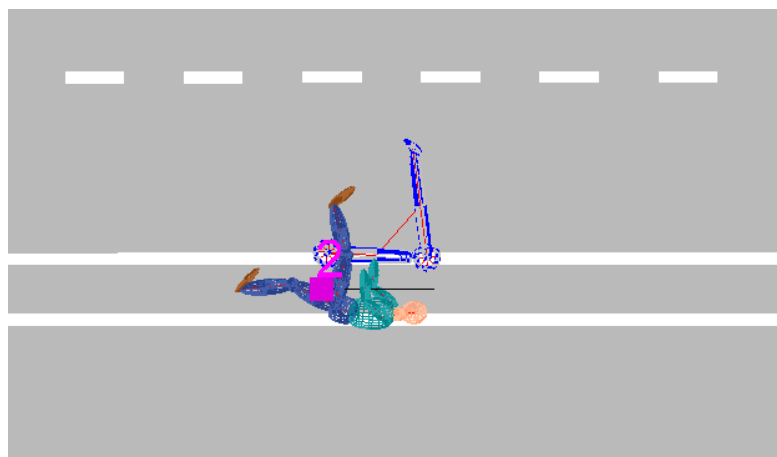


Figura 157. Distancia invadida en la calzada (10° /5 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0 m

6.3.1.2 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 10 km/h

FUERZA DE CONTACTO



Figura 158. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /10 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.75 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

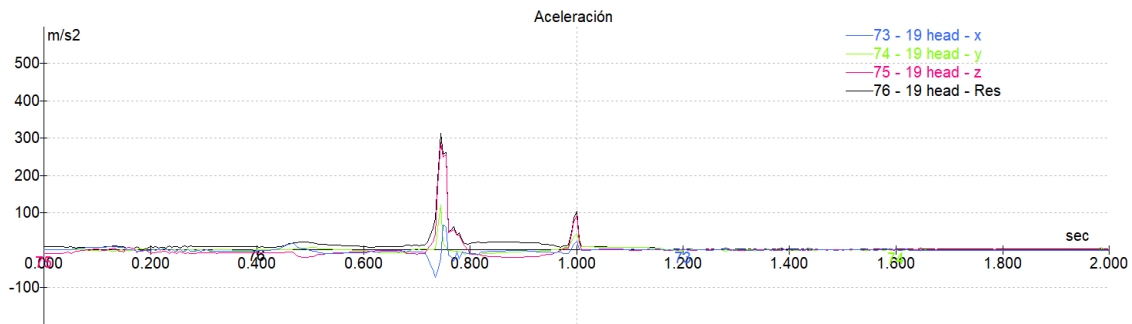


Figura 159. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /10 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

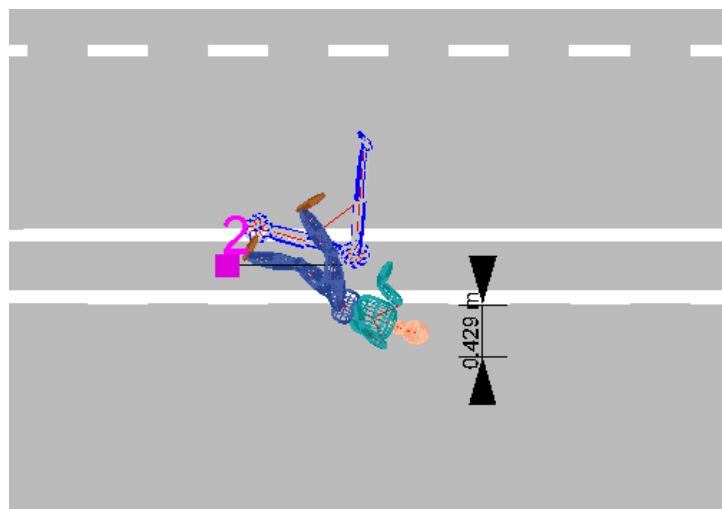


Figura 160. Distancia invadida en la calzada (10° /10 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.43 m

6.3.1.3 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 15 km/h

FUERZA DE CONTACTO

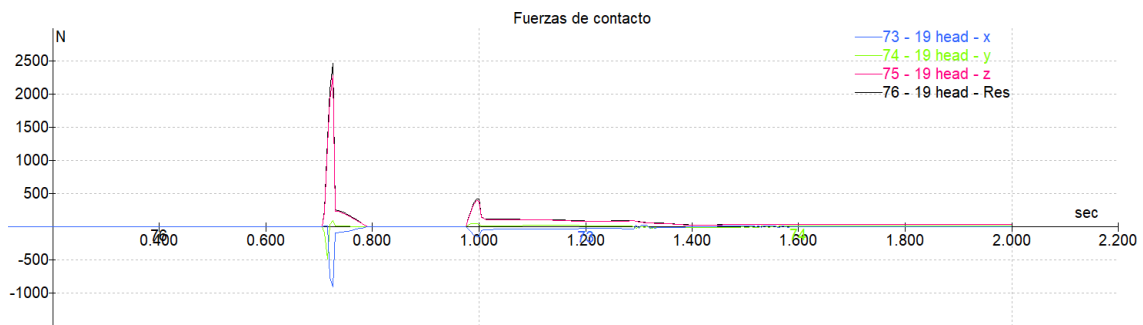


Figura 161. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.73 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

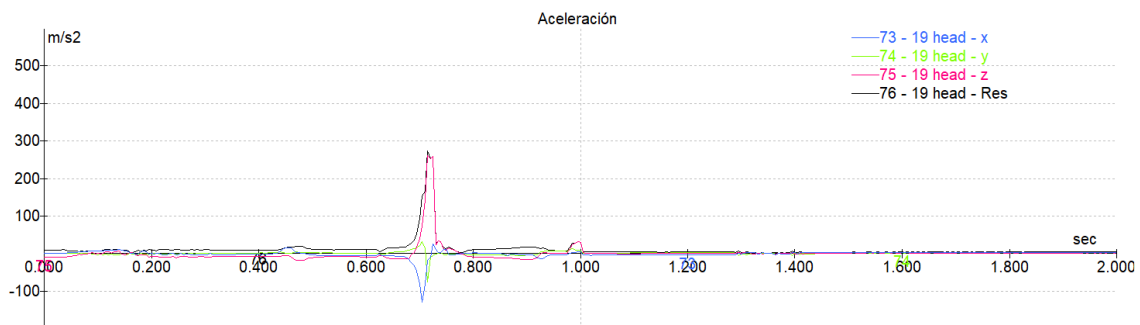


Figura 162. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

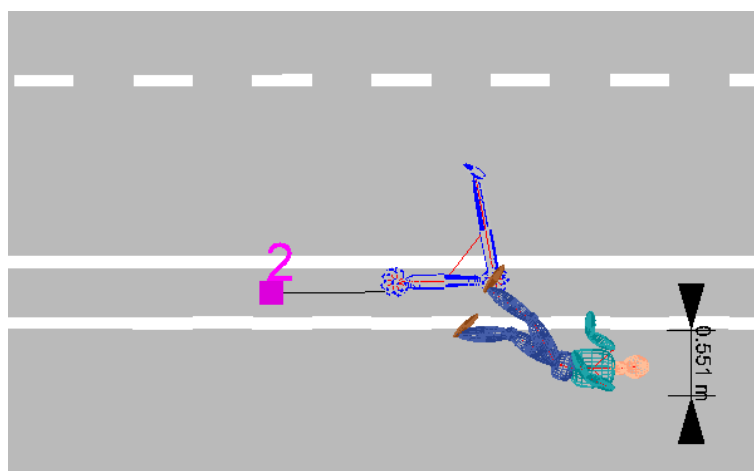


Figura 163. Distancia invadida en la calzada (10° /15 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.55 m

6.3.1.4 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 20 km/h

FUERZA DE CONTACTO



Figura 164. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /20 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.71 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

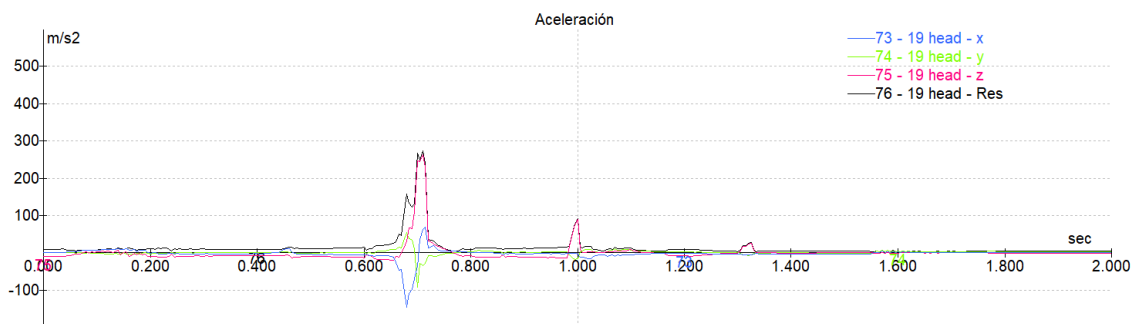


Figura 165. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /20 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

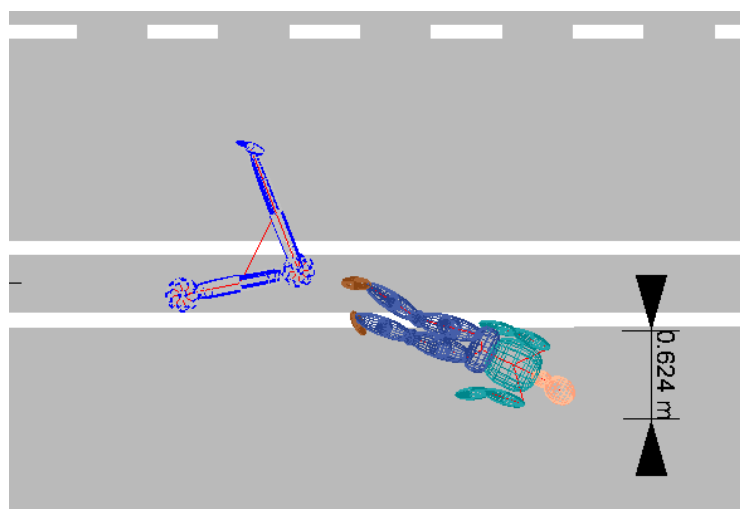


Figura 166. Distancia invadida en la calzada (10° /20 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.62 m

6.3.1.5 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 25 km/h

FUERZA DE CONTACTO

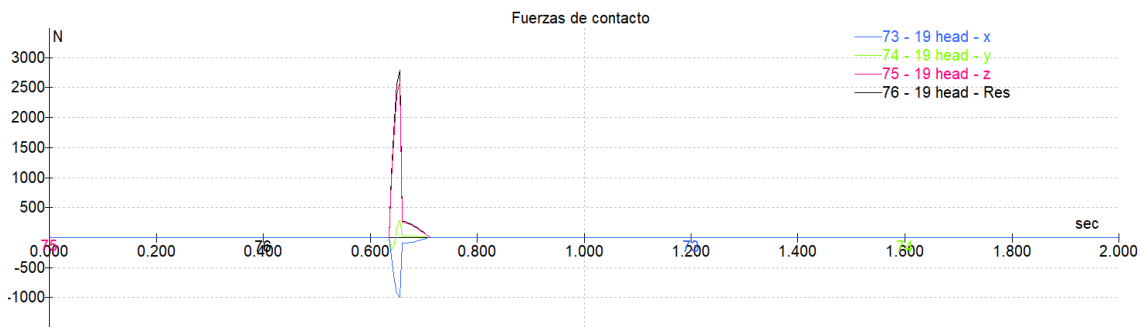


Figura 167. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /25 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.66 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

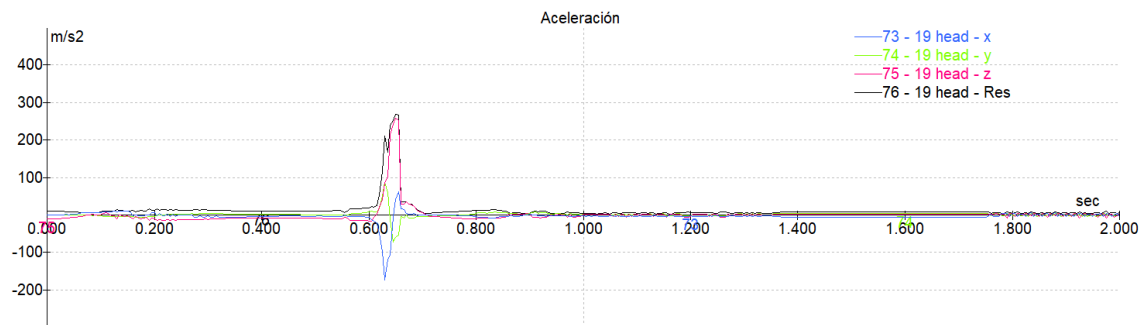


Figura 168. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /25 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

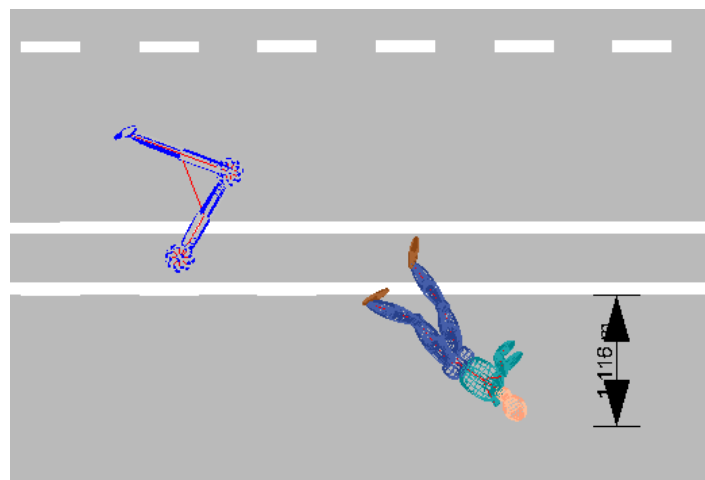


Figura 169. Distancia invadida en la calzada (10° /25 km/h)

Distancia de calzada invadida: 1.12 m

6.3.1.6 Ángulo de impacto 0° - Velocidad 5 km/h

FUERZA DE CONTACTO

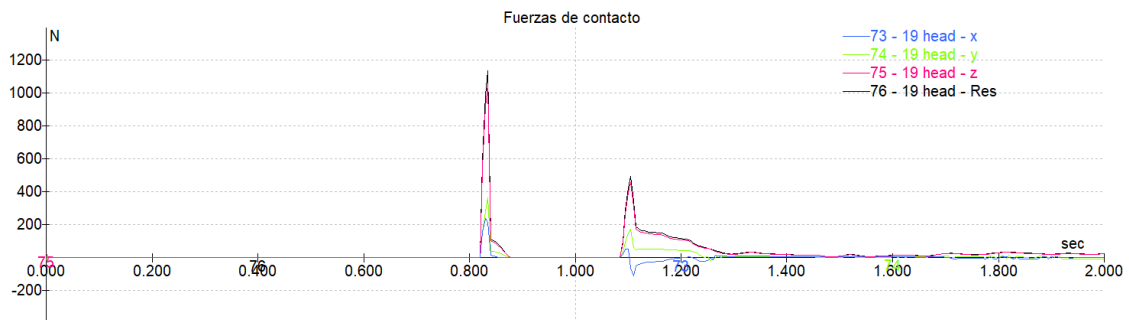


Figura 170. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /5 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.83 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

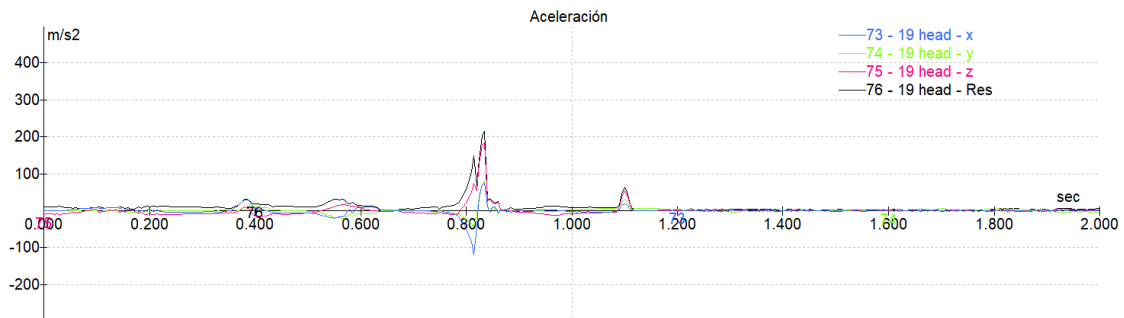


Figura 171. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /5 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

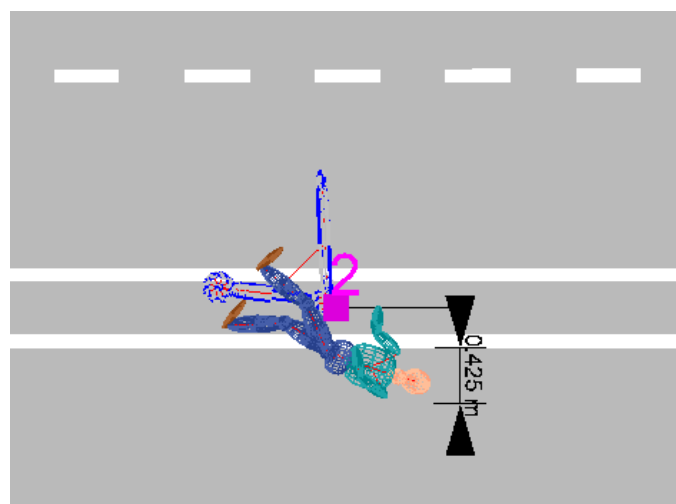


Figura 172. Distancia invadida en la calzada (0° /5 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.425 m

6.3.1.7 Ángulo de impacto 0° - Velocidad 10 km/h

FUERZA DE CONTACTO

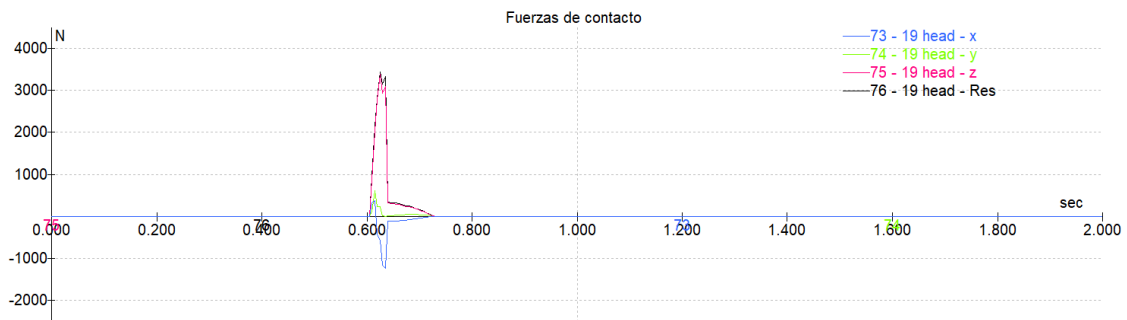


Figura 173. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /10 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.63 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

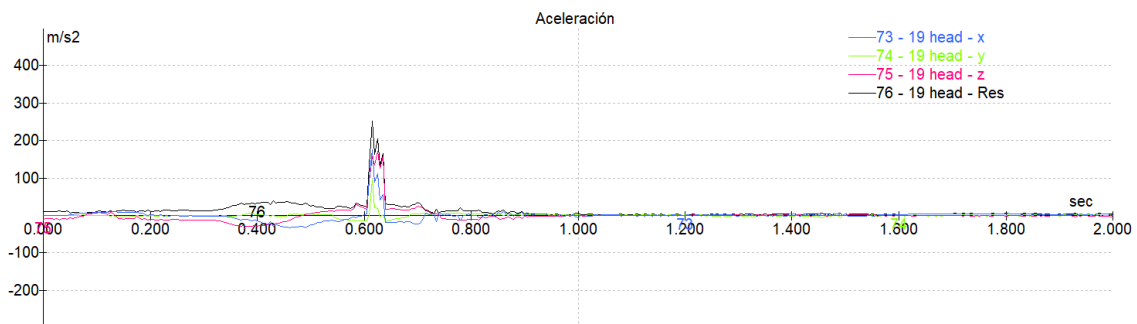


Figura 174. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /10 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

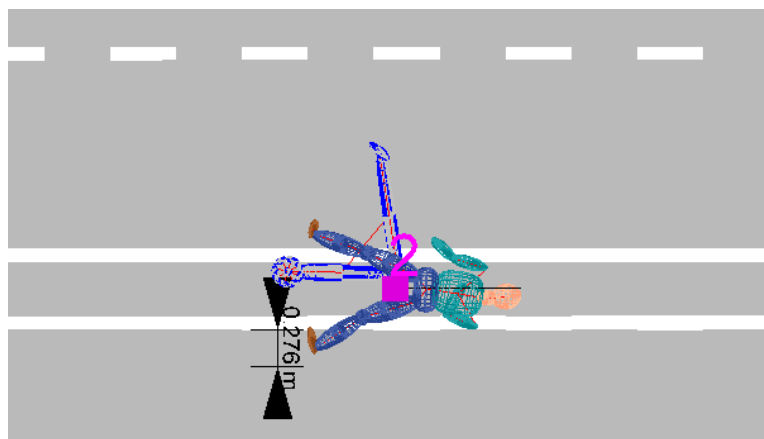


Figura 175. Distancia invadida en la calzada (40° /10 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.28 m

6.3.1.8 Ángulo de impacto 0° - Velocidad 15 km/h

FUERZA DE CONTACTO



Figura 176. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° / 15 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.60 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

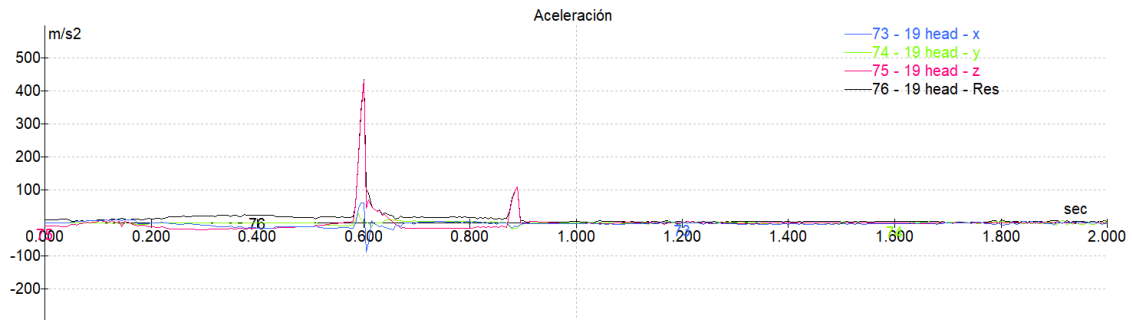


Figura 177. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° / 15 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

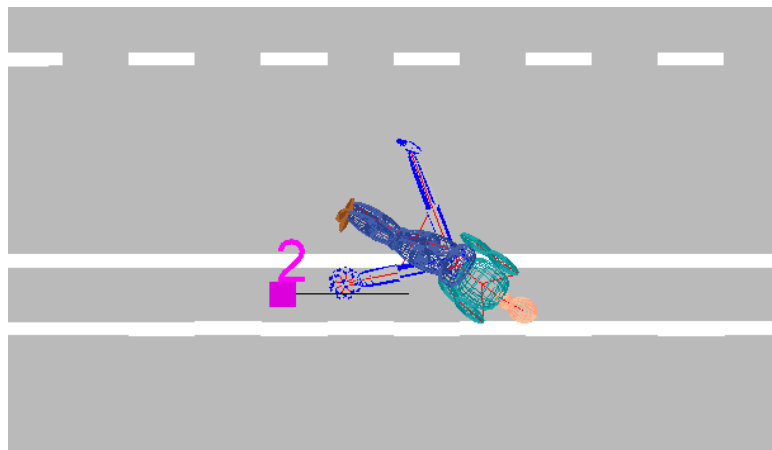


Figura 178. Distancia invadida en la calzada (0° / 15 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.28 m

6.3.1.9 Ángulo de impacto 0° - Velocidad 20 km/h

FUERZA DE CONTACTO

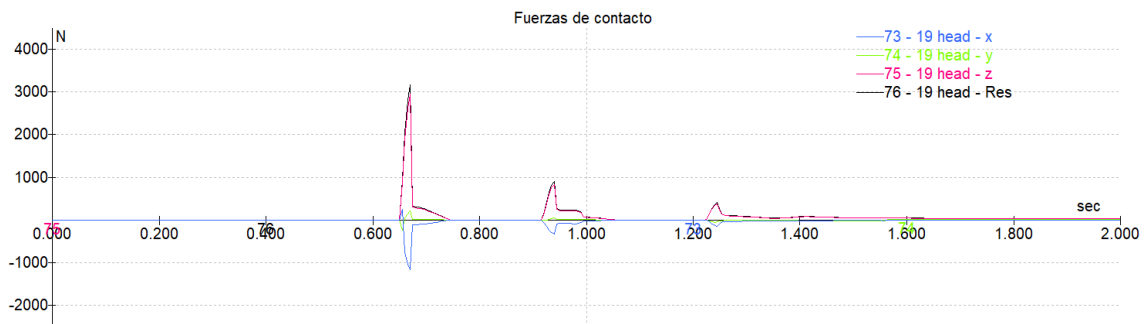


Figura 179. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° / 20 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.67 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

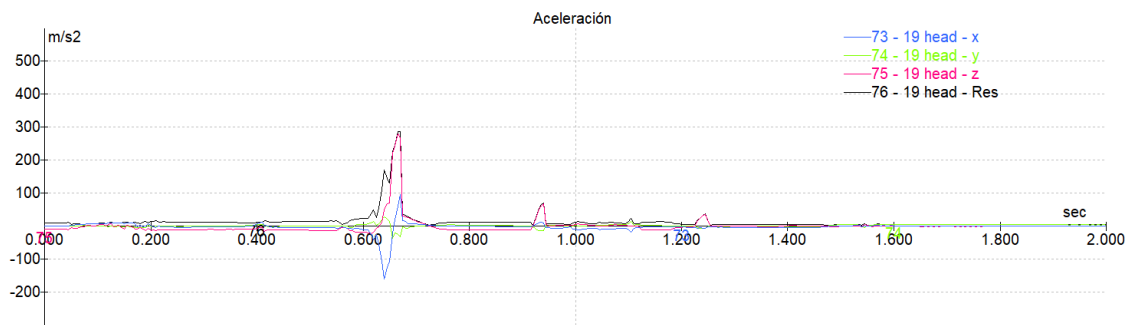


Figura 180. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° / 20 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

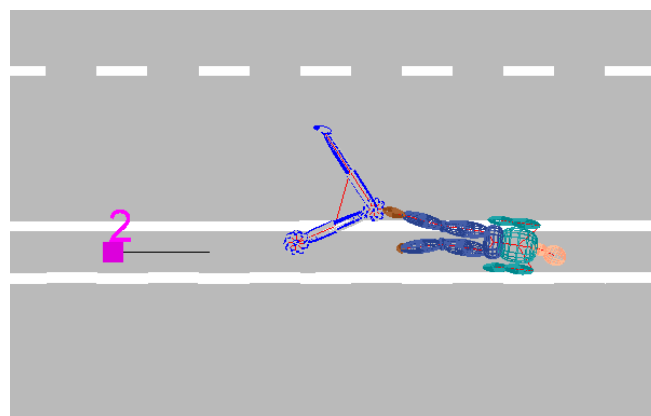


Figura 181. Distancia invadida en la calzada (0° / 20 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0 m

6.3.1.10 Ángulo de impacto 0° - Velocidad 25 km/h

FUERZA DE CONTACTO



Figura 182. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° / 25 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.51 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

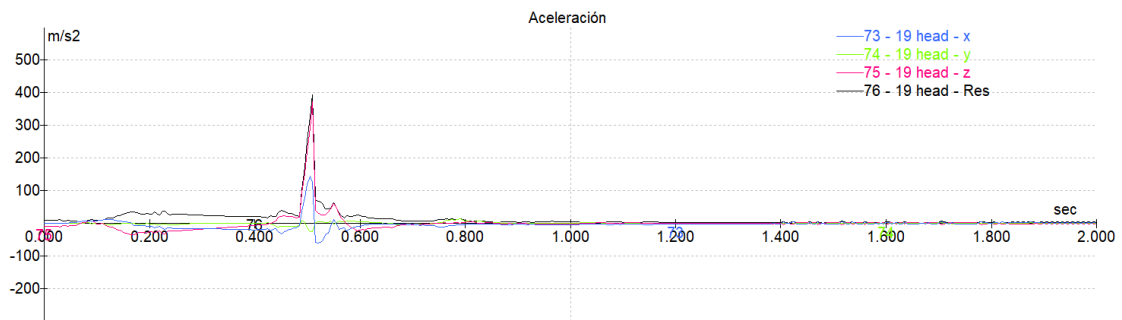


Figura 183. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (40° / 25 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

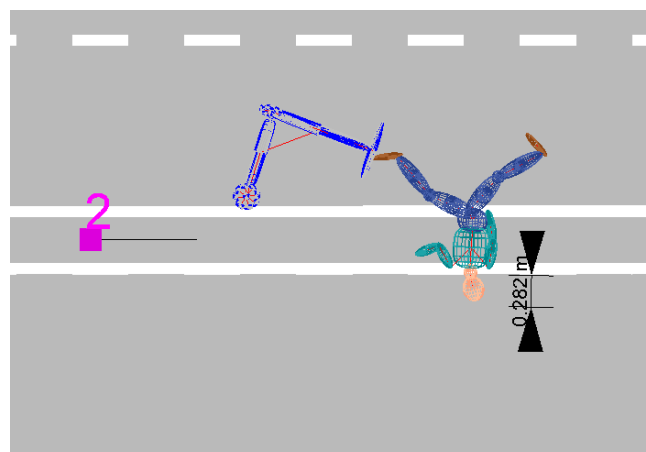


Figura 184. Distancia invadida en la calzada (0° / 25 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.28 m

6.3.2 Usuaría femenina

6.3.2.1 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 5 km/h

Para esta simulación, se incluyen imágenes relacionadas con la reconstrucción del accidente provenientes del software utilizado, para las simulaciones subsiguientes, las imágenes en mención se relacionan en el ANEXO I. Es preciso resaltar que las zonas rojas de los multibodies simulados, representan contacto.

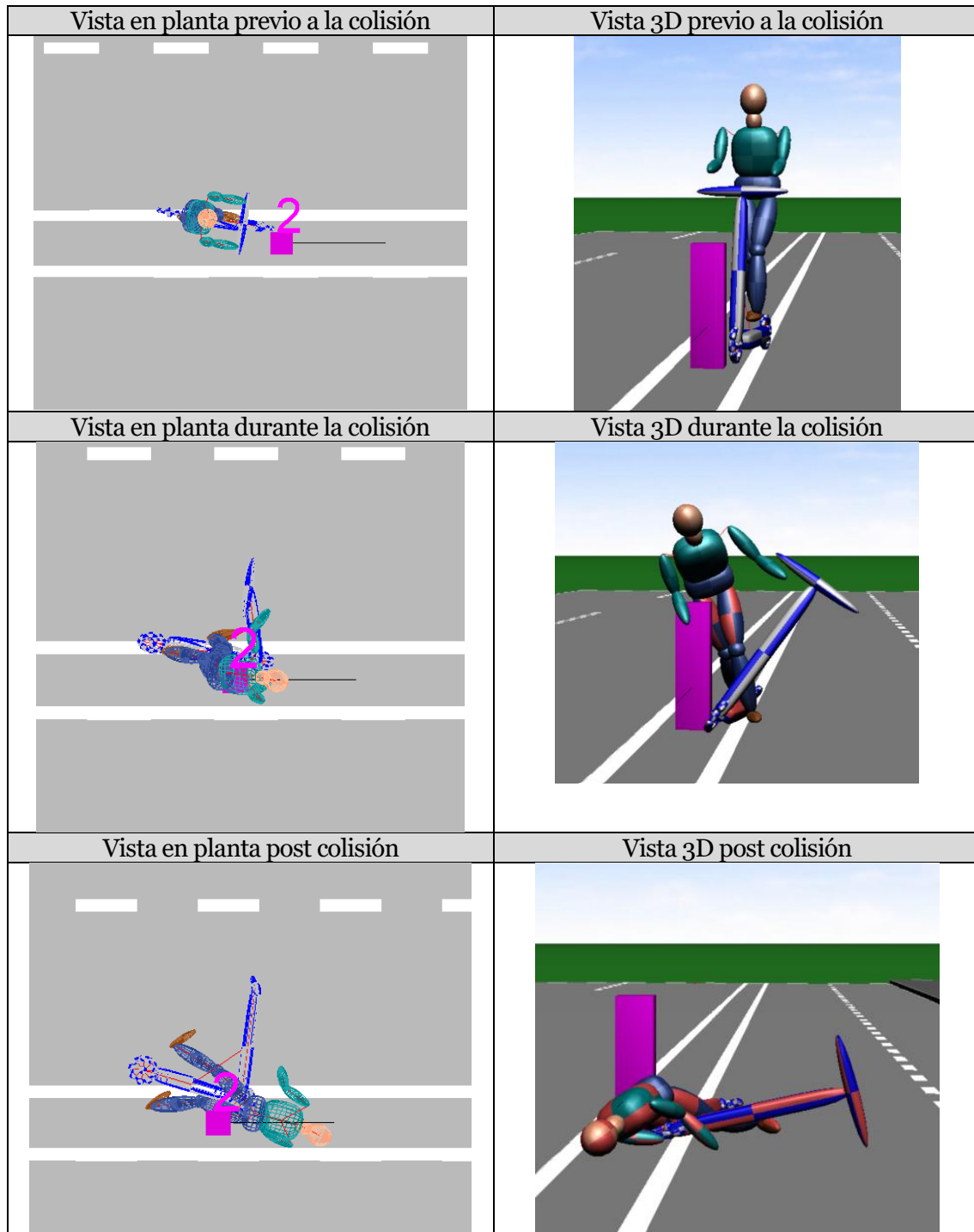


Figura 185. Reconstrucción del accidente para la colisión de la ciclista contra el bolardo a 5km/h

FUERZA CONTACTO

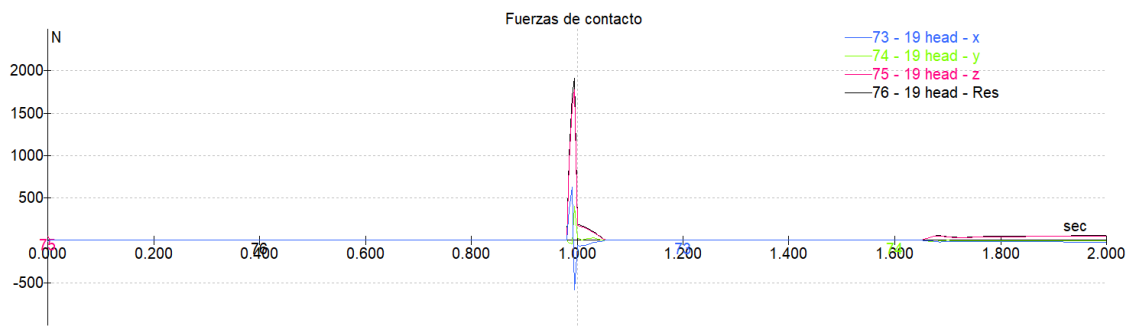


Figura 186. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10°/5 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.99 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

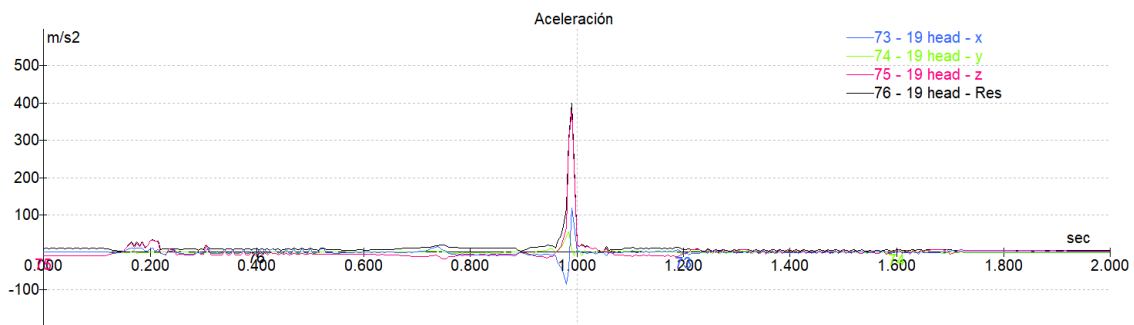


Figura 187. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /5 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

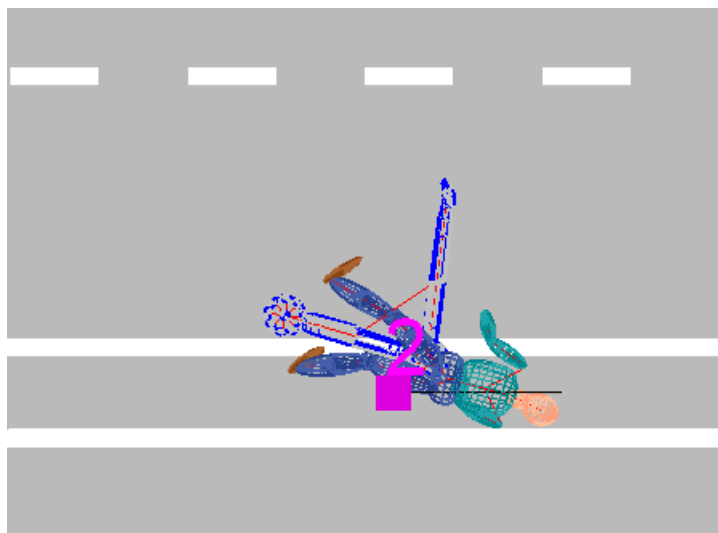


Figura 188. Distancia invadida en la calzada (10° /5 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0 m

6.3.2.2 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 10 km/h

FUERZA DE CONTACTO



Figura 189. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° / 10 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.92 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

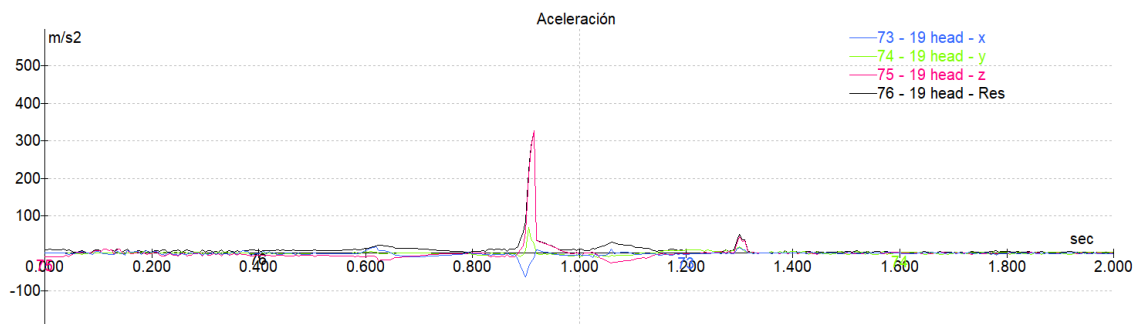


Figura 190. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° / 10 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

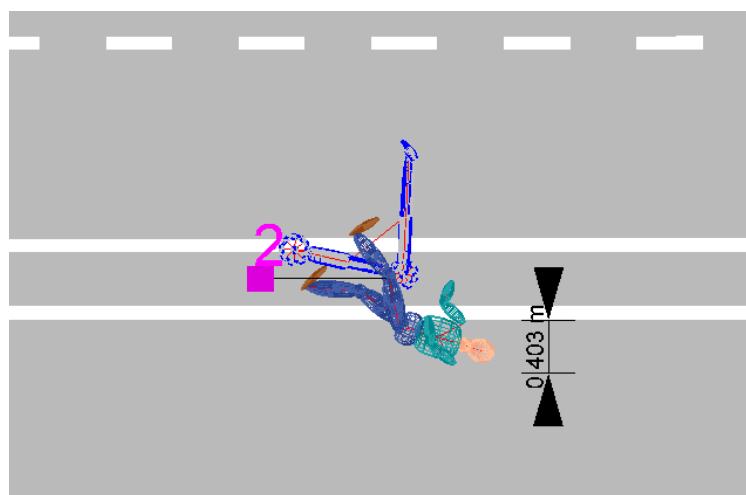


Figura 191. Distancia invadida en la calzada (10° / 10 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.4 m

6.3.2.3 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 15 km/h

FUERZA DE CONTACTO



Figura 192. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.80 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

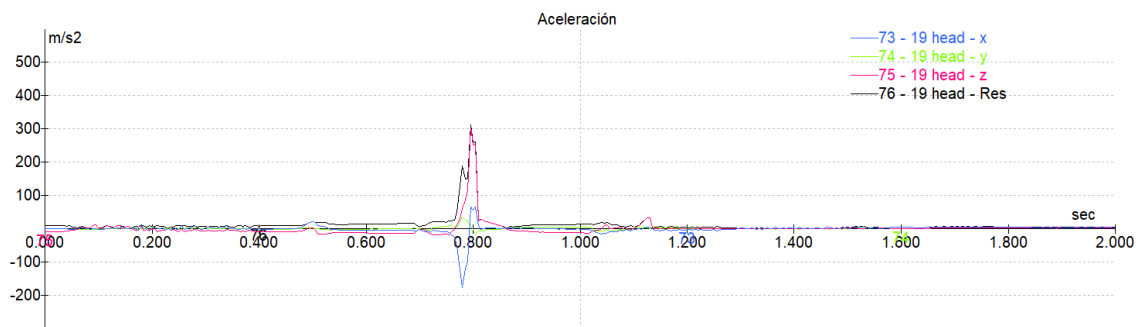


Figura 193. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

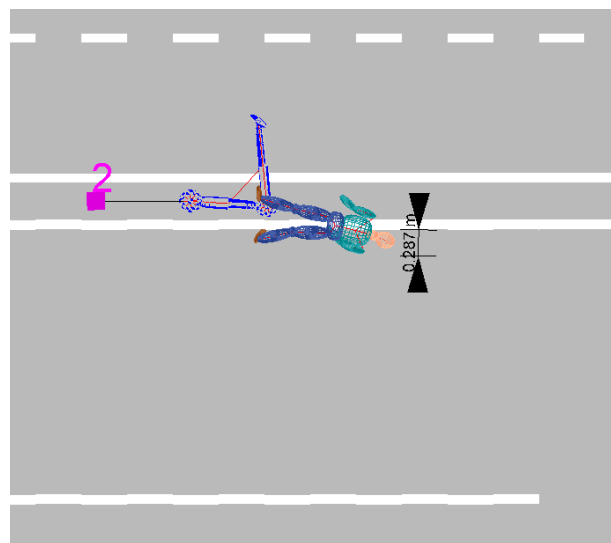


Figura 194. Distancia invadida en la calzada (10° /15 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.29 m

6.3.2.4 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 20 km/h

FUERZA DE CONTACTO



Figura 195. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° / 20 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.74 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

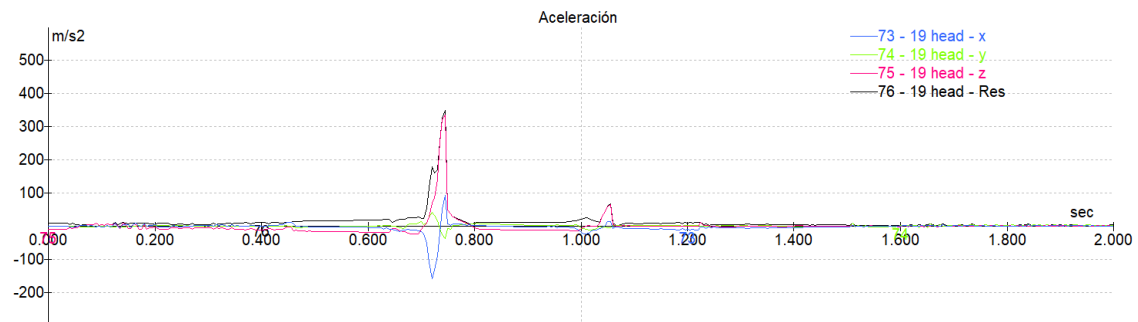


Figura 196. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° / 20 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

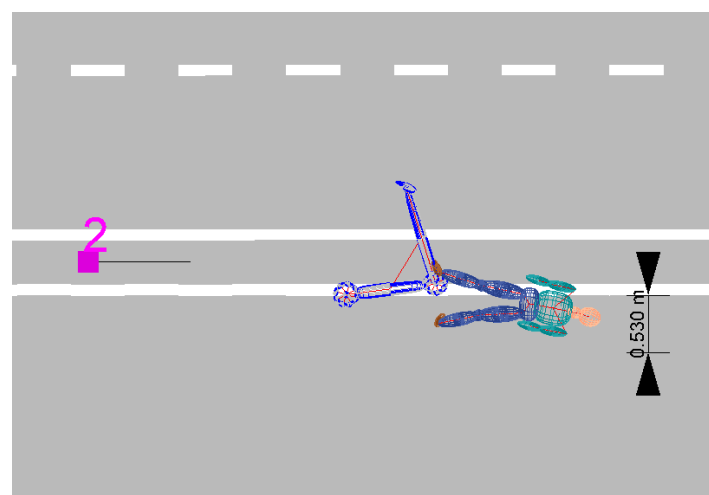


Figura 197. Distancia invadida en la calzada (10° / 20 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.53 m

6.3.2.5 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 25 km/h

FUERZA DE CONTACTO

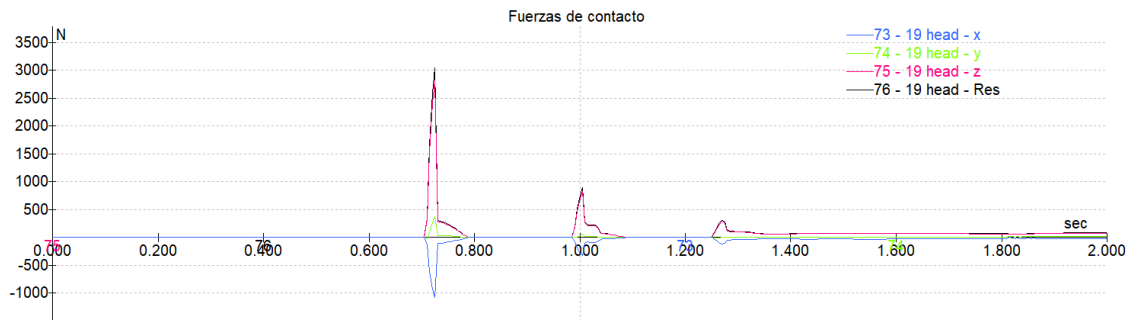


Figura 198. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /25 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.72 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

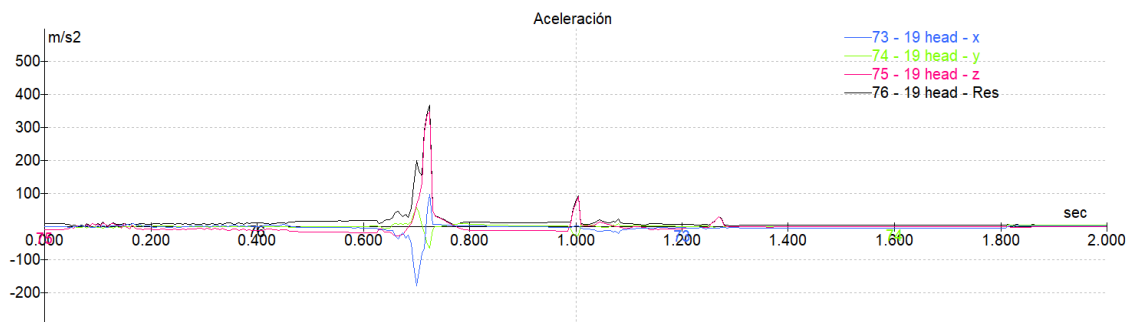


Figura 199. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /25 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

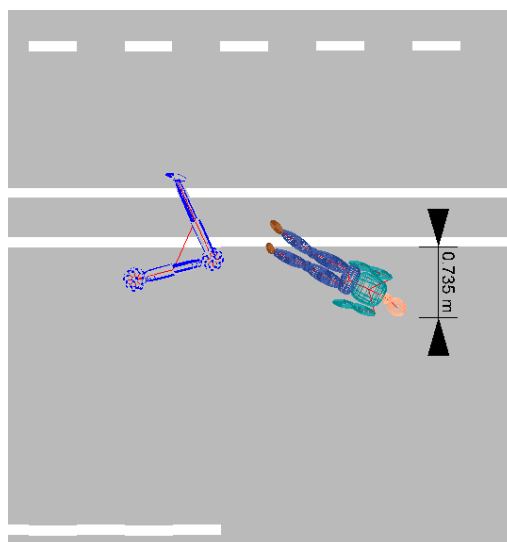


Figura 200. Distancia invadida en la calzada (10° /25 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.74 m

6.3.2.6 Ángulo de impacto 0° - Velocidad 5 km/h

FUERZA DE CONTACTO



Figura 201. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /5 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.97 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

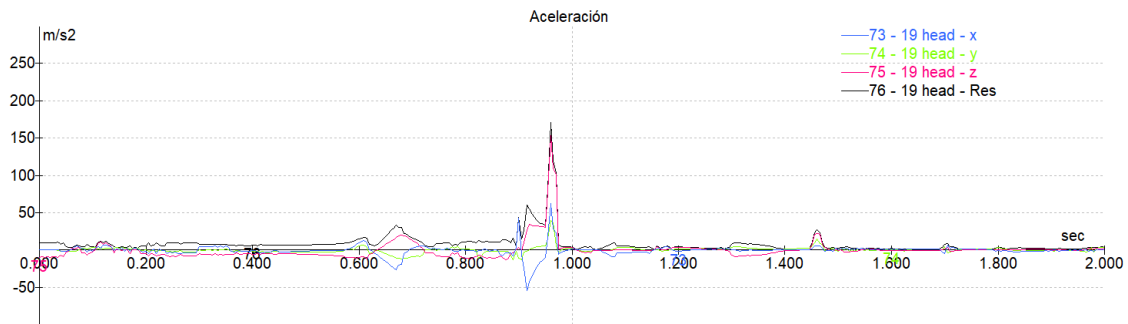


Figura 202. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /5 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

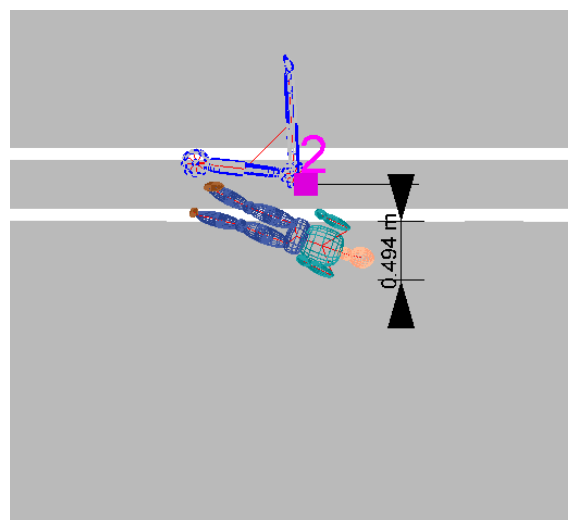


Figura 203. Distancia invadida en la calzada (0° /5 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.49 m

6.3.2.7 Ángulo de impacto 0° - Velocidad 10 km/h

FUERZA DE CONTACTO

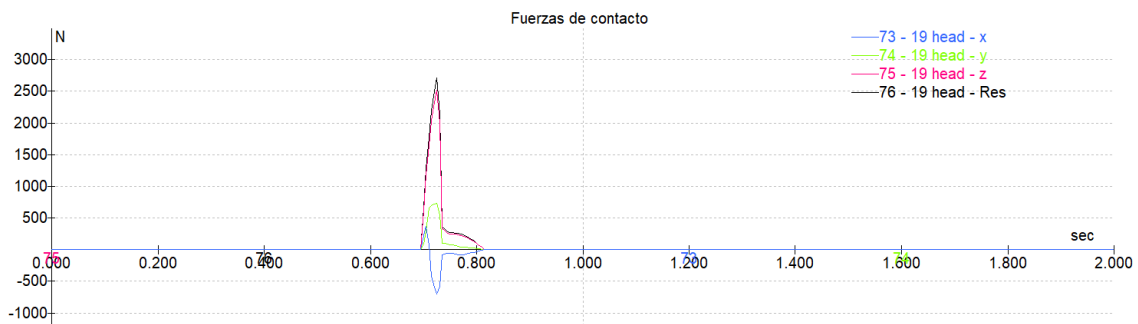


Figura 204. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /10 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.73 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

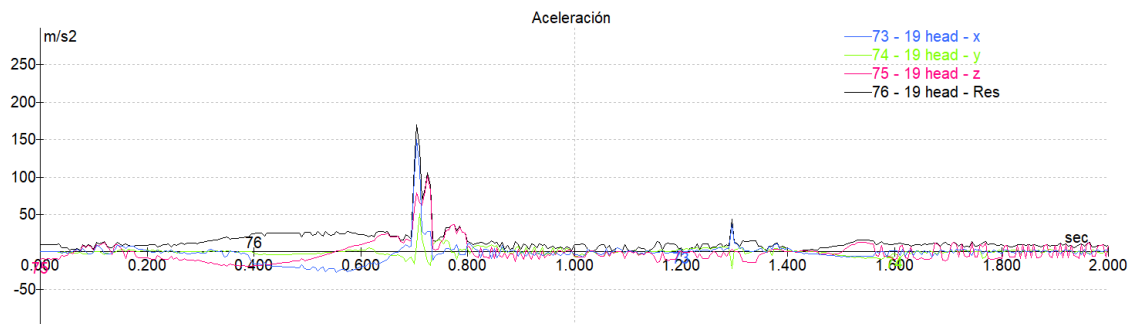


Figura 205. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /10 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

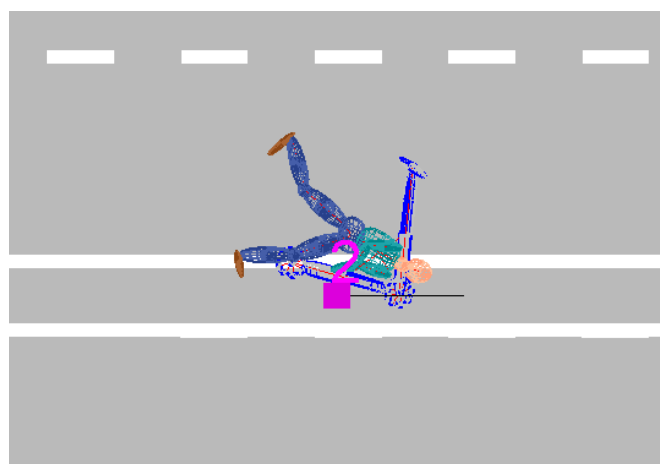


Figura 206. Distancia invadida en la calzada (0° /10 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0 m

6.3.2.8 Ángulo de impacto 0° - Velocidad 15 km/h

FUERZA DE CONTACTO

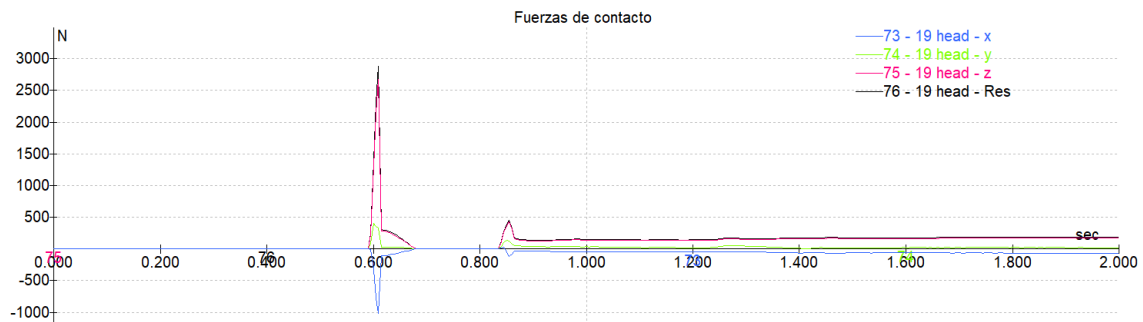


Figura 207. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /15 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.61 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

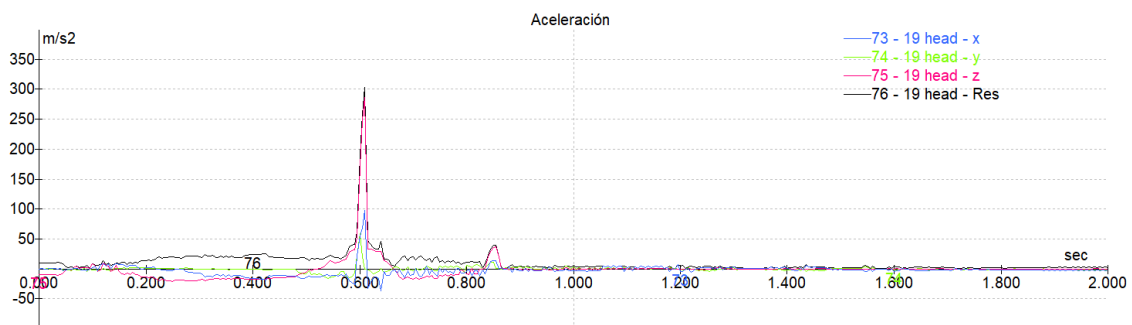


Figura 208. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /15 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

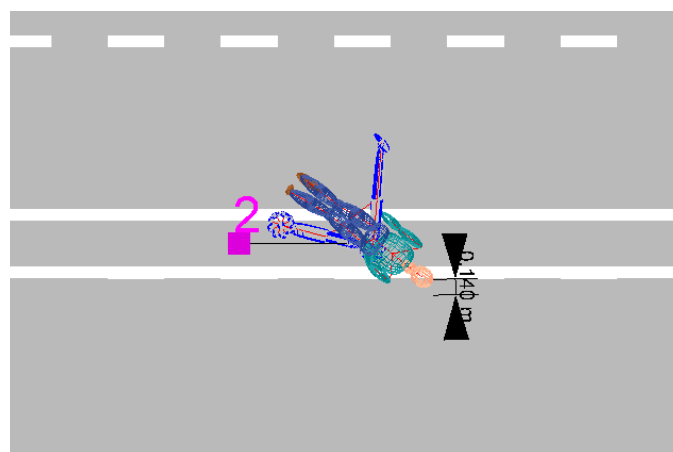


Figura 209. Distancia invadida en la calzada (0° /15 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.14 m

6.3.2.9 Ángulo de impacto 0° - Velocidad 20 km/h

FUERZA DE CONTACTO

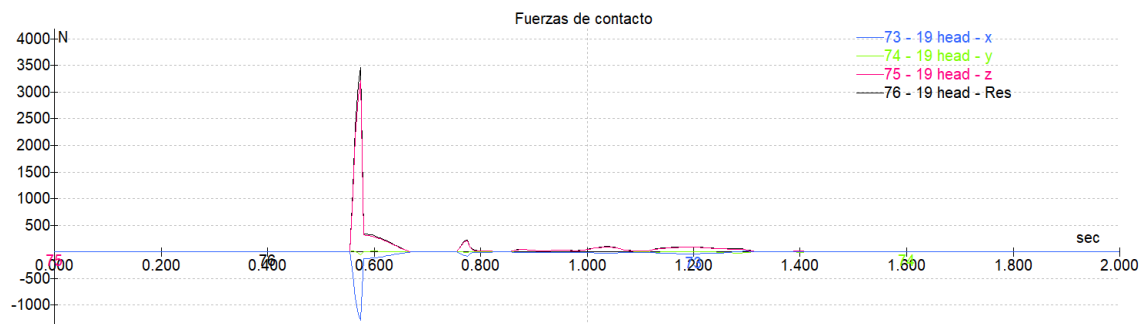


Figura 210. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /20 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.57 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

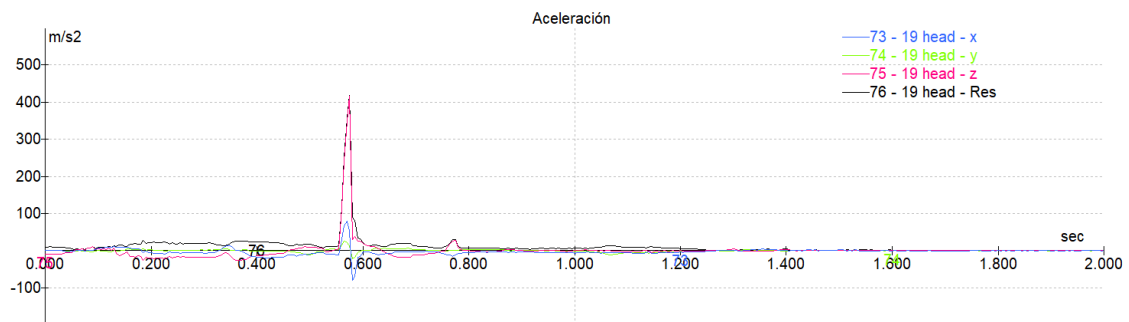


Figura 211. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /20 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

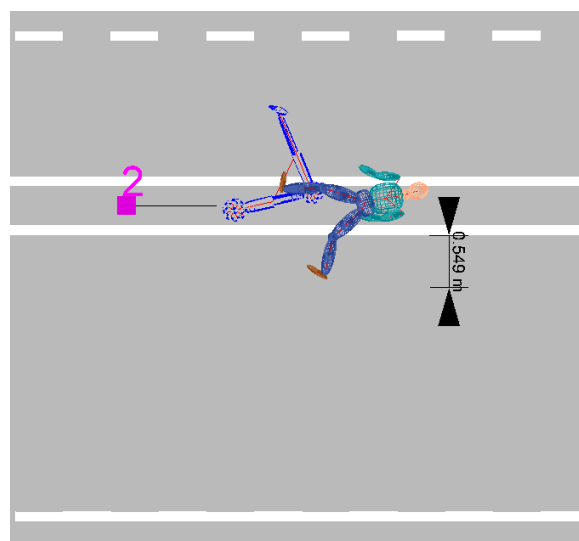


Figura 212. Distancia invadida en la calzada (0° /20 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.55 m

6.3.2.10 Ángulo de impacto 0° - Velocidad 25 km/h

FUERZA DE CONTACTO



Figura 213. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /25 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.45 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

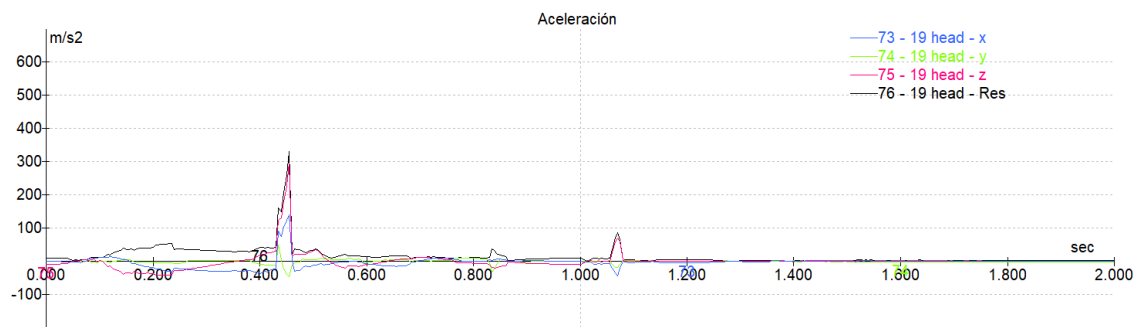


Figura 214. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /25 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

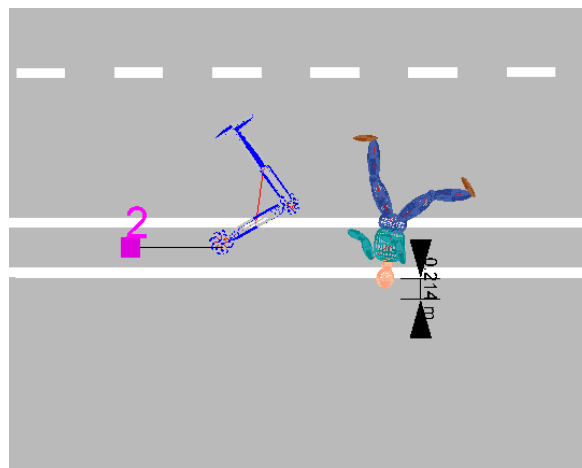


Figura 215. Distancia invadida en la calzada (0° /25 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.21 m

6.4 Colisión bicicleta-bolardo

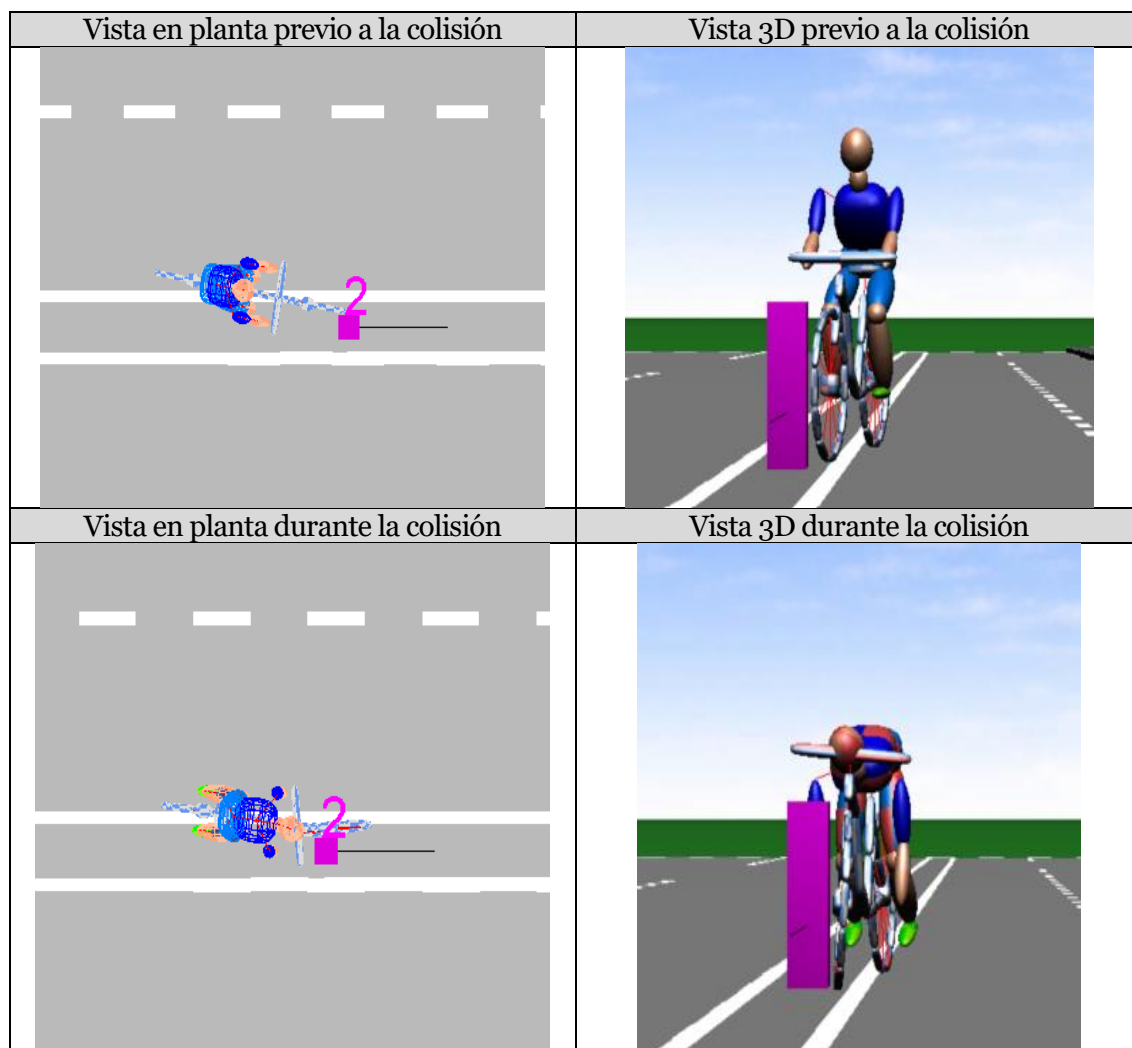
Para este caso se tuvo en cuenta una consideración adicional a las mencionadas en el numeral 6.3, relacionadas con el peso del bolardo y su rigidez:

- Peso bolardo: Considerando bolardos con anclaje y reflectores se tuvo en cuenta un valor de 5kg.
- Suspensión del elemento: De acuerdo con las características disponibles en el software, esta opción se consideró como “blanda”.

6.4.1 **Usuario masculino**

6.4.1.1 *Ángulo de impacto 10° - Velocidad 5 km/h*

Para esta simulación, se incluyen imágenes relacionadas con la reconstrucción del accidente provenientes del software utilizado, para las simulaciones subsiguientes, las imágenes en mención se relacionan en el ANEXO I. Es preciso resaltar que las zonas rojas de los multibodies simulados, representan contacto.



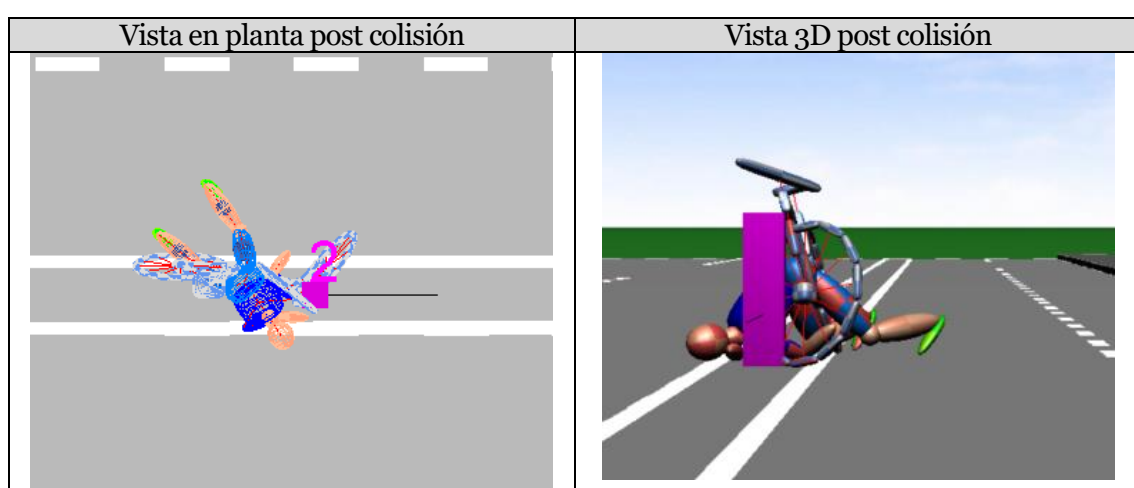


Figura 216. Reconstrucción del accidente para la colisión del usuario en bicicleta contra el bolardo a 5km/h

FUERZA CONTACTO

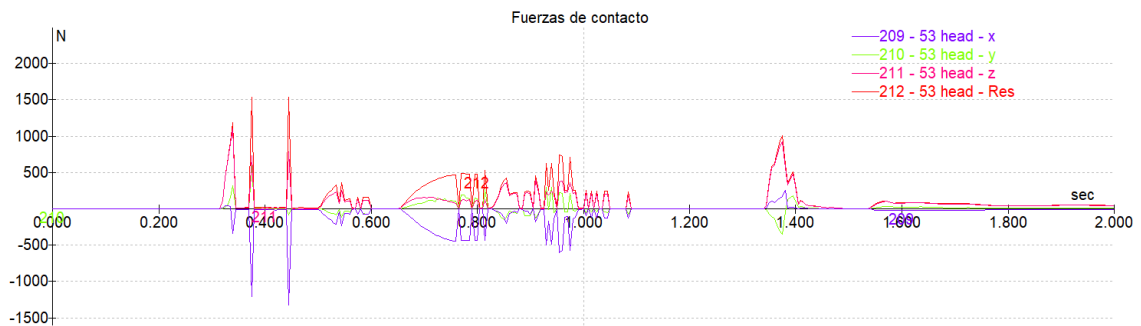


Figura 217. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10°/5 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.45 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

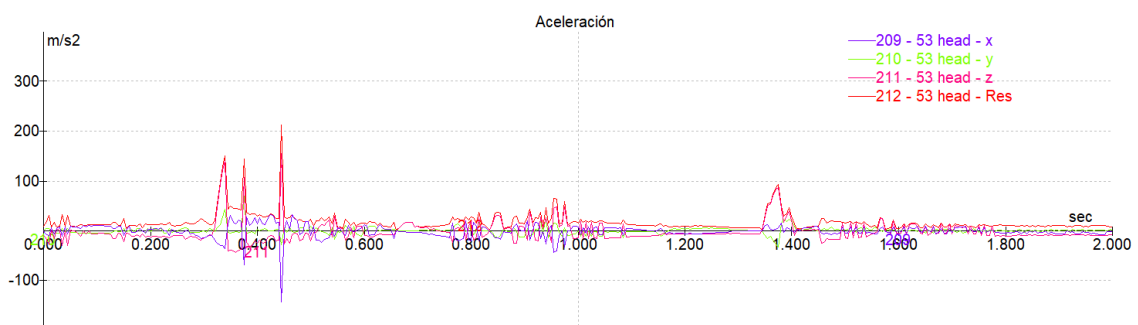


Figura 218 Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /5 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

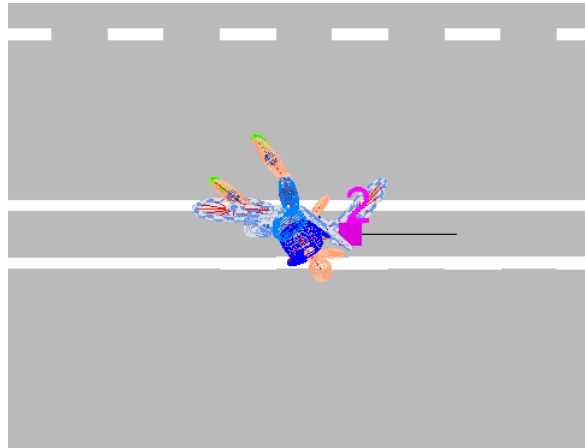


Figura 219. Distancia invadida en la calzada (10° / 5 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0 m

6.4.1.2 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 10 km/h

FUERZA DE CONTACTO

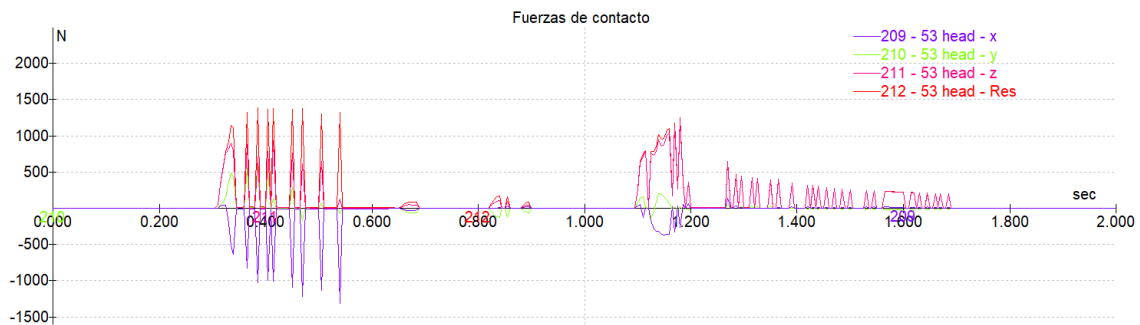


Figura 220. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° / 10 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.38 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

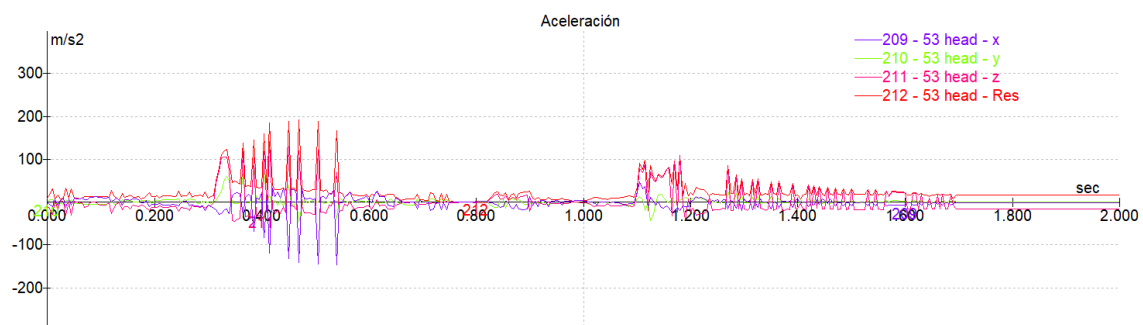


Figura 221. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° / 10 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

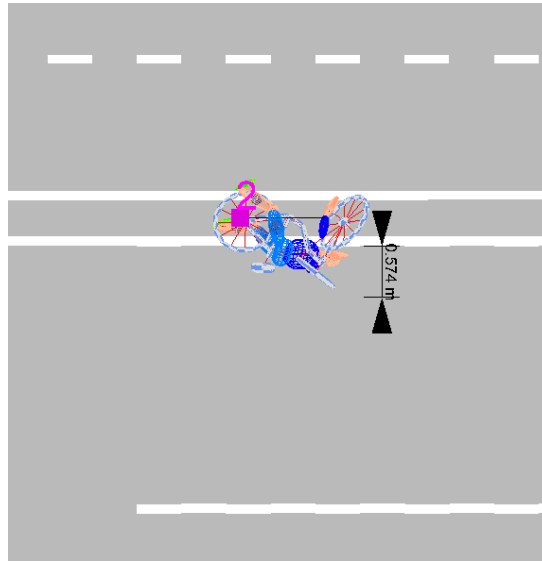


Figura 222. Distancia invadida en la calzada (10° /10 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.57 m

6.4.1.3 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 15 km/h

FUERZA DE CONTACTO

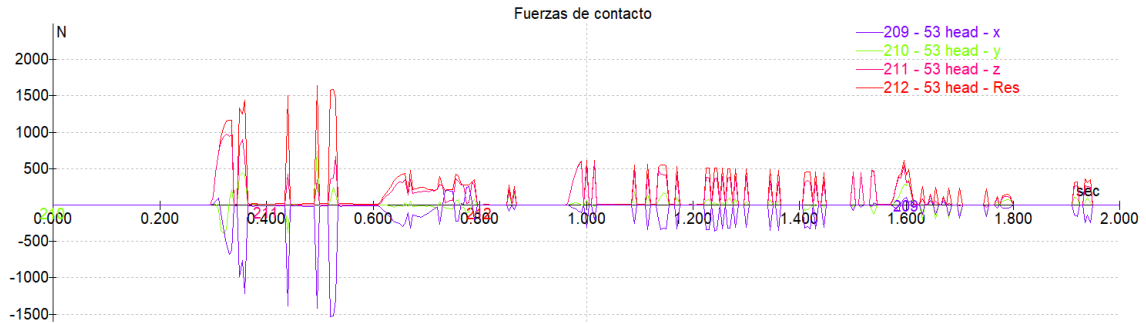


Figura 223. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.49 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

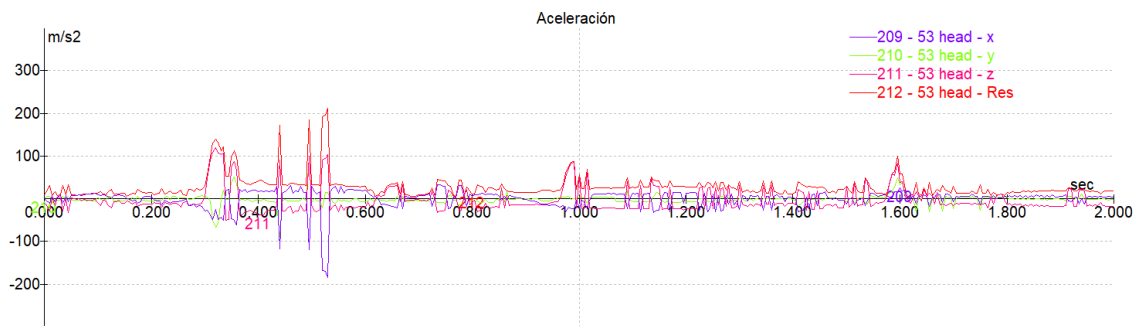


Figura 224. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

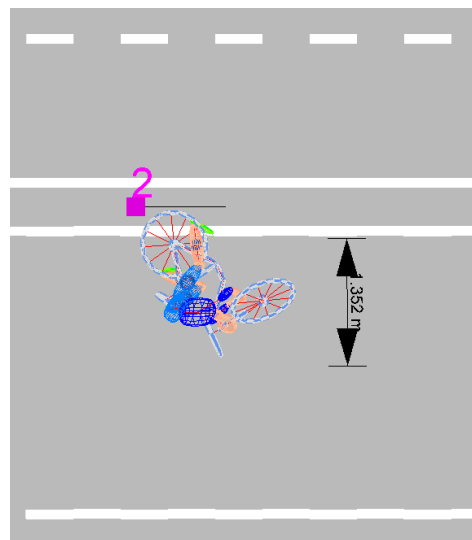


Figura 225. Distancia invadida en la calzada (10° /15 km/h)

Distancia de calzada invadida: 1.35 m

6.4.1.4 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 20 km/h

FUERZA DE CONTACTO

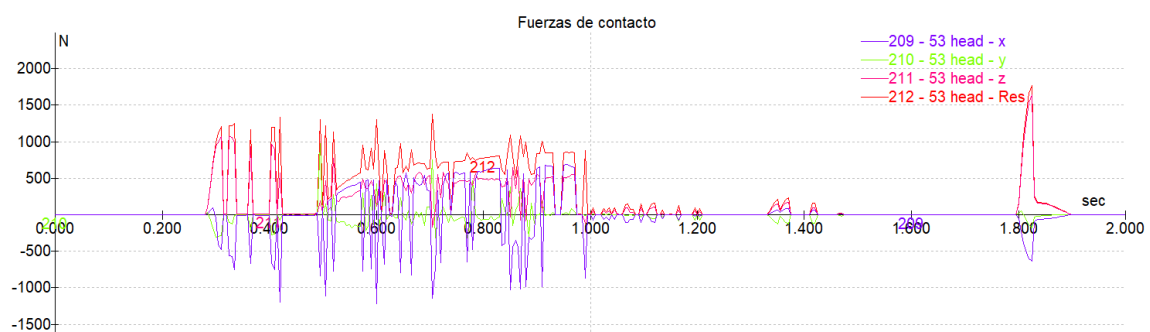


Figura 226. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /20 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 1.82 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

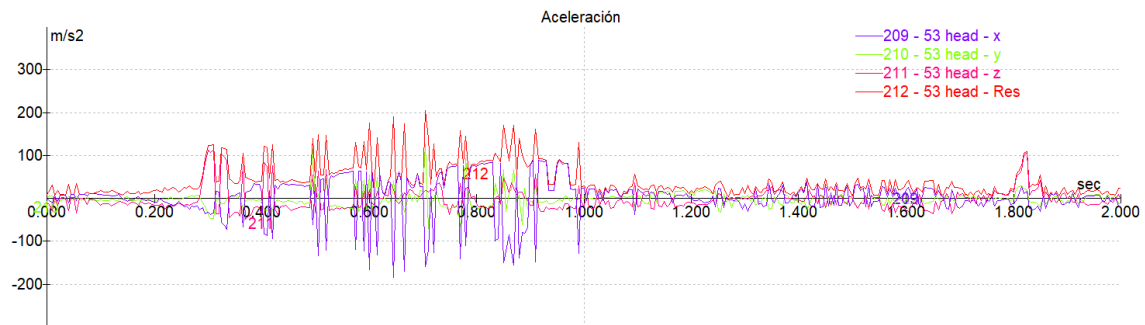


Figura 227. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída ($10^\circ / 20 \text{ km/h}$)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

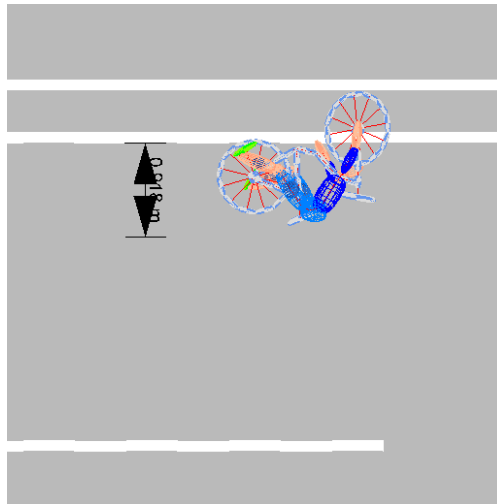


Figura 228. Distancia invadida en la calzada ($10^\circ / 20 \text{ km/h}$)

Distancia de calzada invadida: 0.92 m

6.4.1.5 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 25 km/h

FUERZA DE CONTACTO

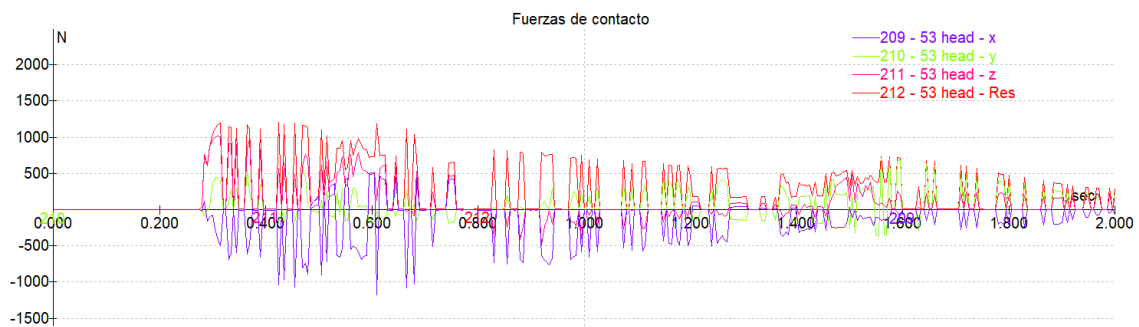


Figura 229. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída ($10^\circ / 25 \text{ km/h}$)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.42 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

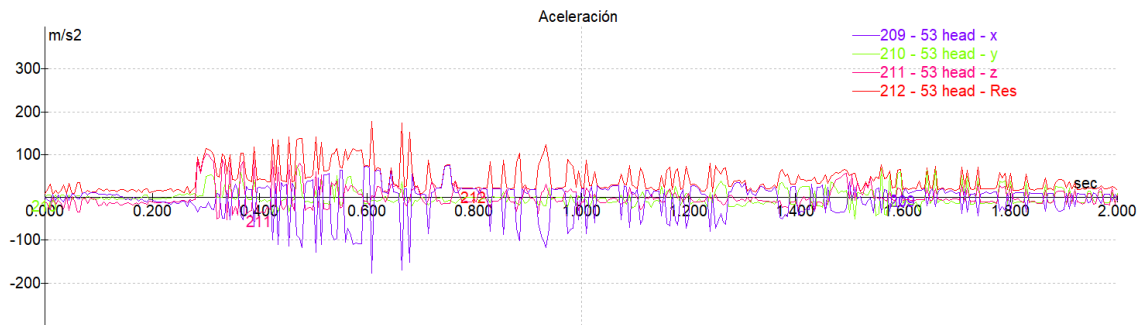


Figura 230. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /25 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

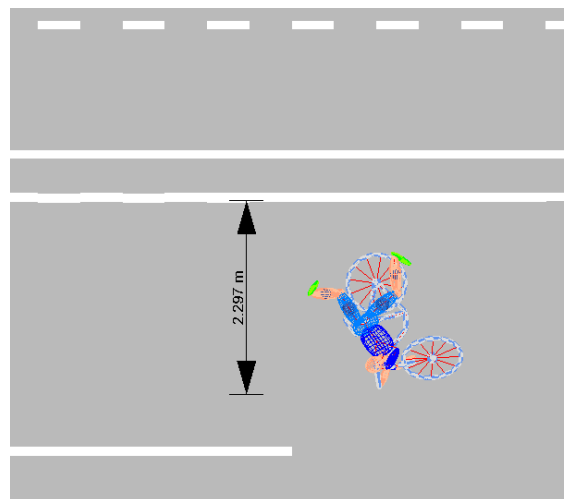


Figura 231. Distancia invadida en la calzada (10° /25 km/h)

Distancia de calzada invadida: 2.30 m

6.4.1.6 Ángulo de impacto 0° - Velocidad 5 km/h

FUERZA DE CONTACTO

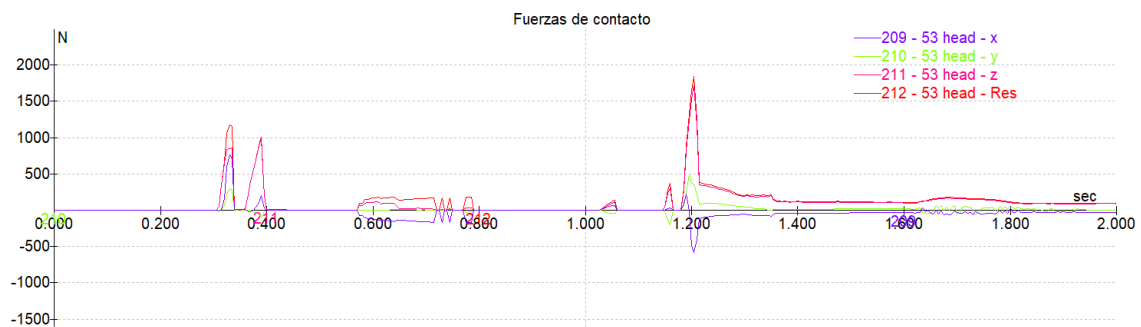


Figura 232. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /5 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.42 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

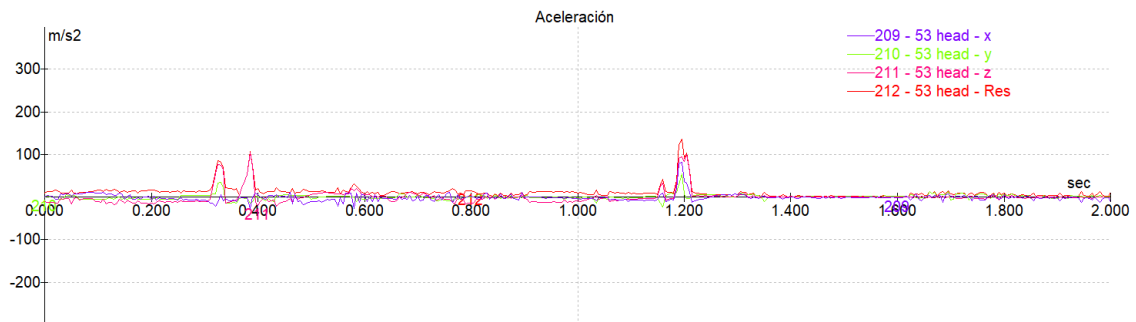


Figura 233. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /5 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

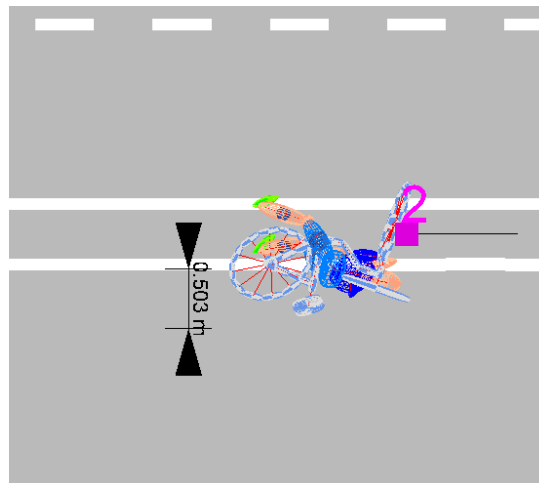


Figura 234. Distancia invadida en la calzada (0° /5 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.5 m

6.4.1.7 Ángulo de impacto 0° - Velocidad 10 km/h

FUERZA DE CONTACTO

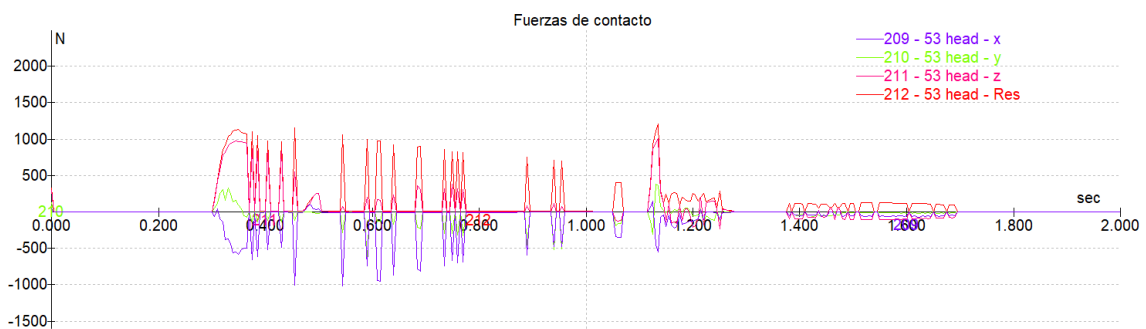


Figura 235. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /10 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 1.13 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

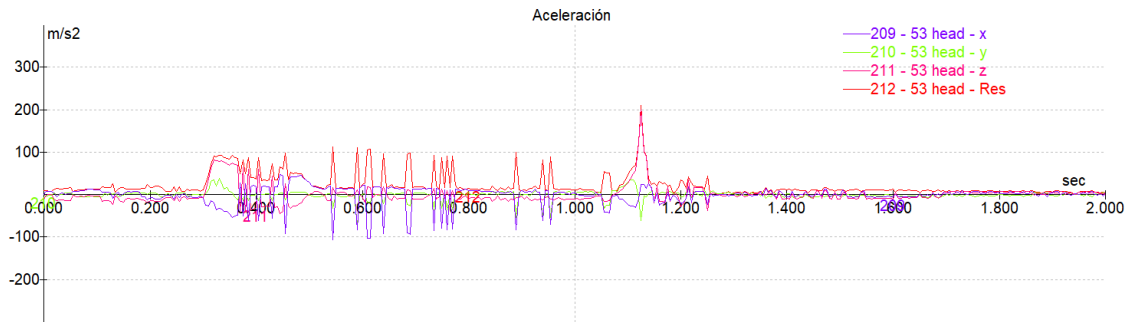


Figura 236. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /10 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

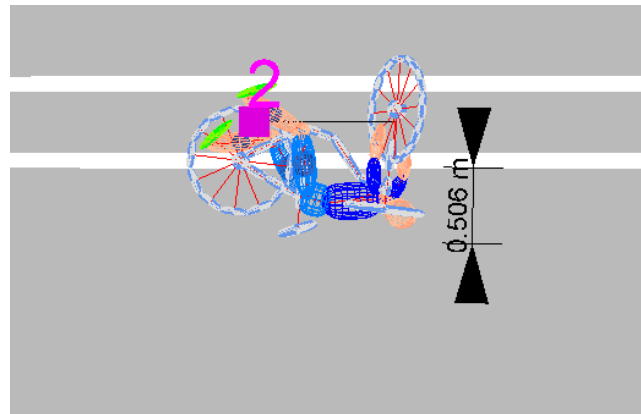


Figura 237. Distancia invadida en la calzada (0° /10 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.5 m

6.4.1.8 Ángulo de impacto 0° - Velocidad 15 km/h

FUERZA DE CONTACTO

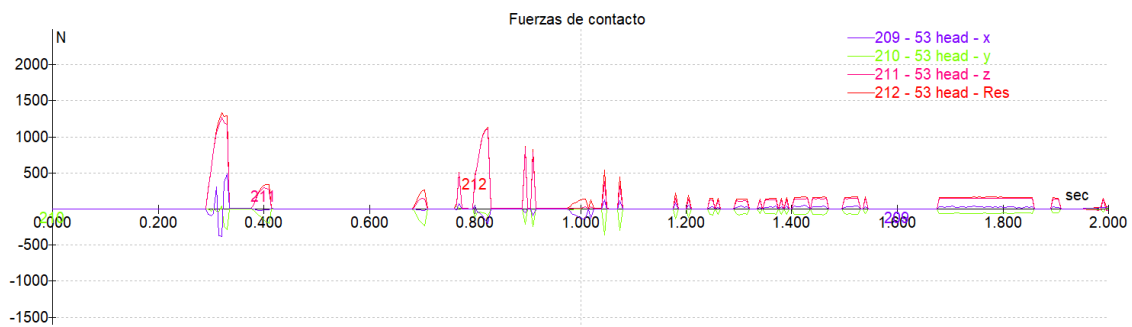


Figura 238. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /15 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.32 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

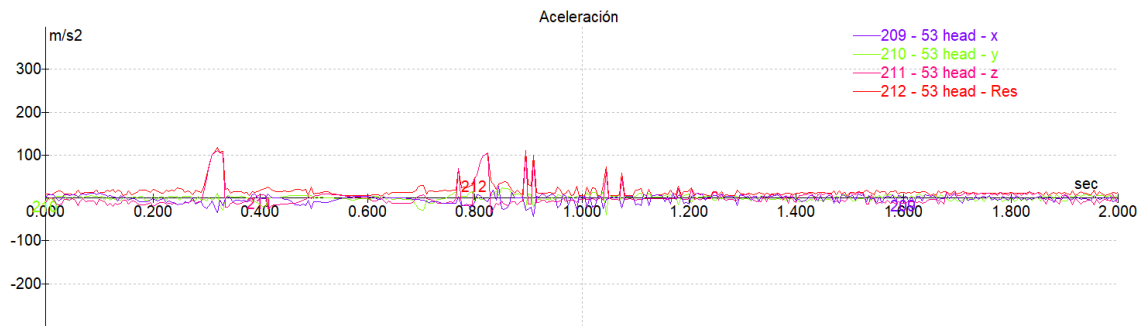


Figura 239. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /15 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

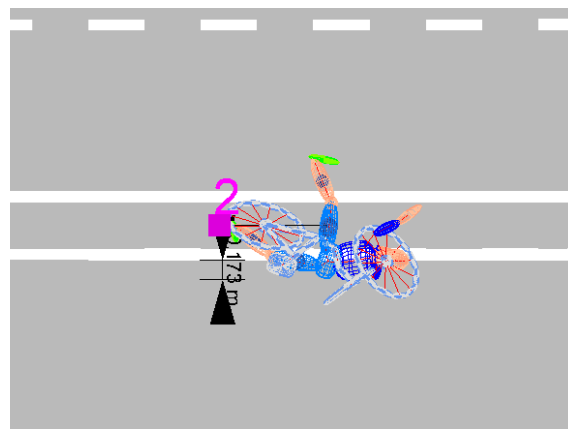


Figura 240. Distancia invadida en la calzada (0° /15 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.17 m

6.4.1.9 Ángulo de impacto 0° - Velocidad 20 km/h

FUERZA DE CONTACTO



Figura 241. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /20 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 1.045 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

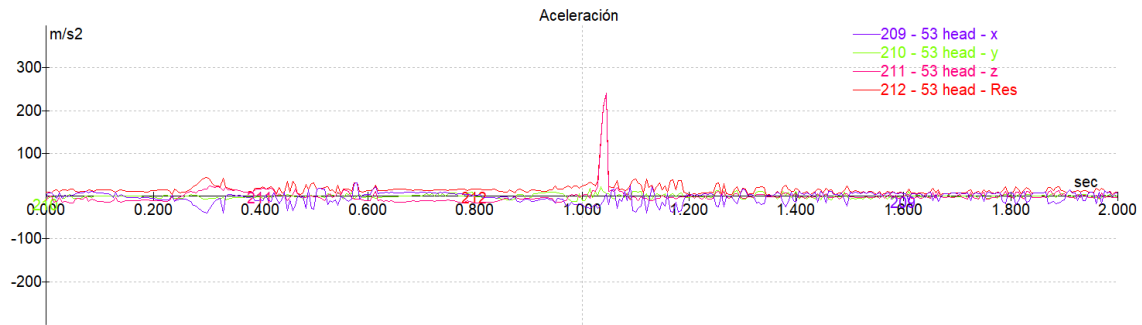


Figura 242. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /20 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

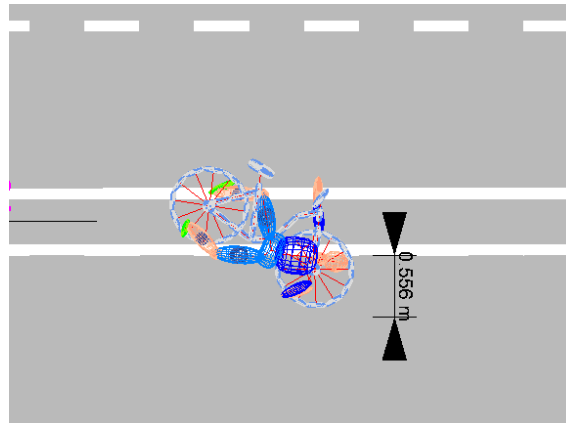


Figura 243. Distancia invadida en la calzada (0° /20 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.56 m

6.4.1.10 Ángulo de impacto 0° - Velocidad 25 km/h

FUERZA DE CONTACTO

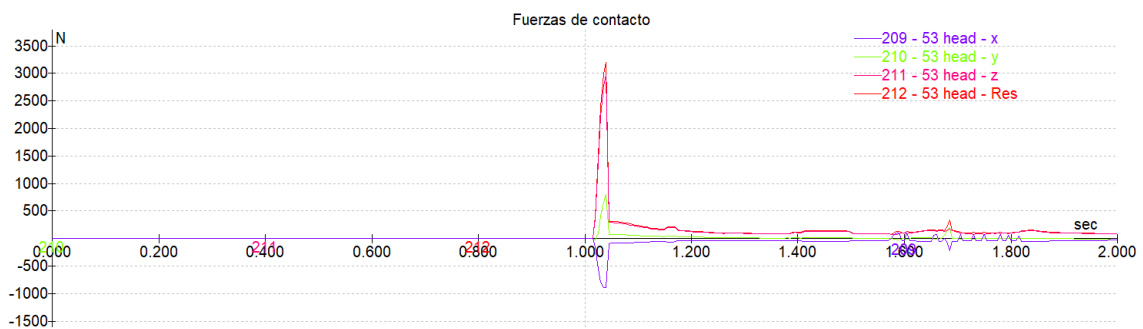


Figura 244. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /25 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 1.038 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

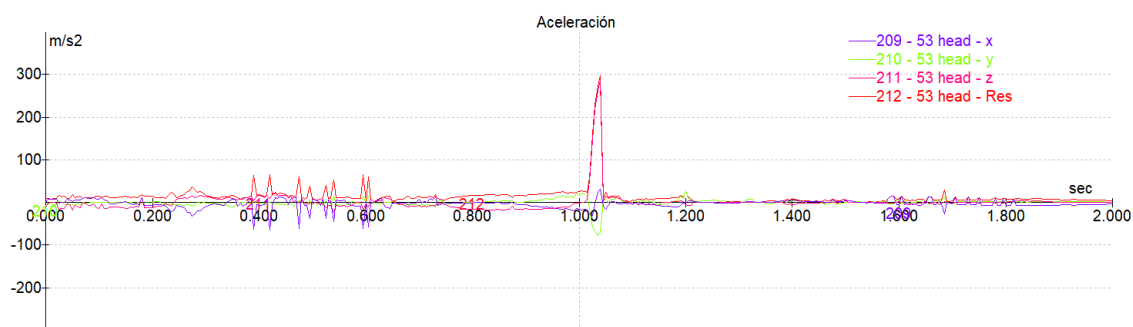


Figura 245. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /25 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

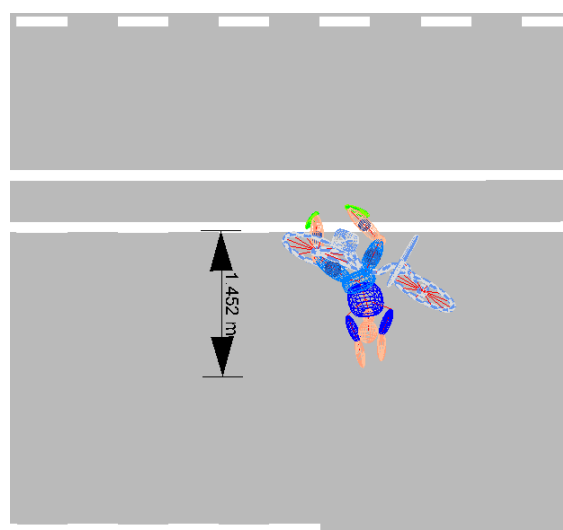


Figura 246. Distancia invadida en la calzada (0° /25 km/h)

Distancia de calzada invadida: 1.452 m

6.4.2 Usuaría femenina

6.4.2.1 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 5 km/h

Para esta simulación, se incluyen imágenes relacionadas con la reconstrucción del accidente provenientes del software utilizado, para las simulaciones subsiguientes, las imágenes en mención se relacionan en el ANEXO I. Es preciso resaltar que las zonas rojas de los multibodies simulados, representan contacto.

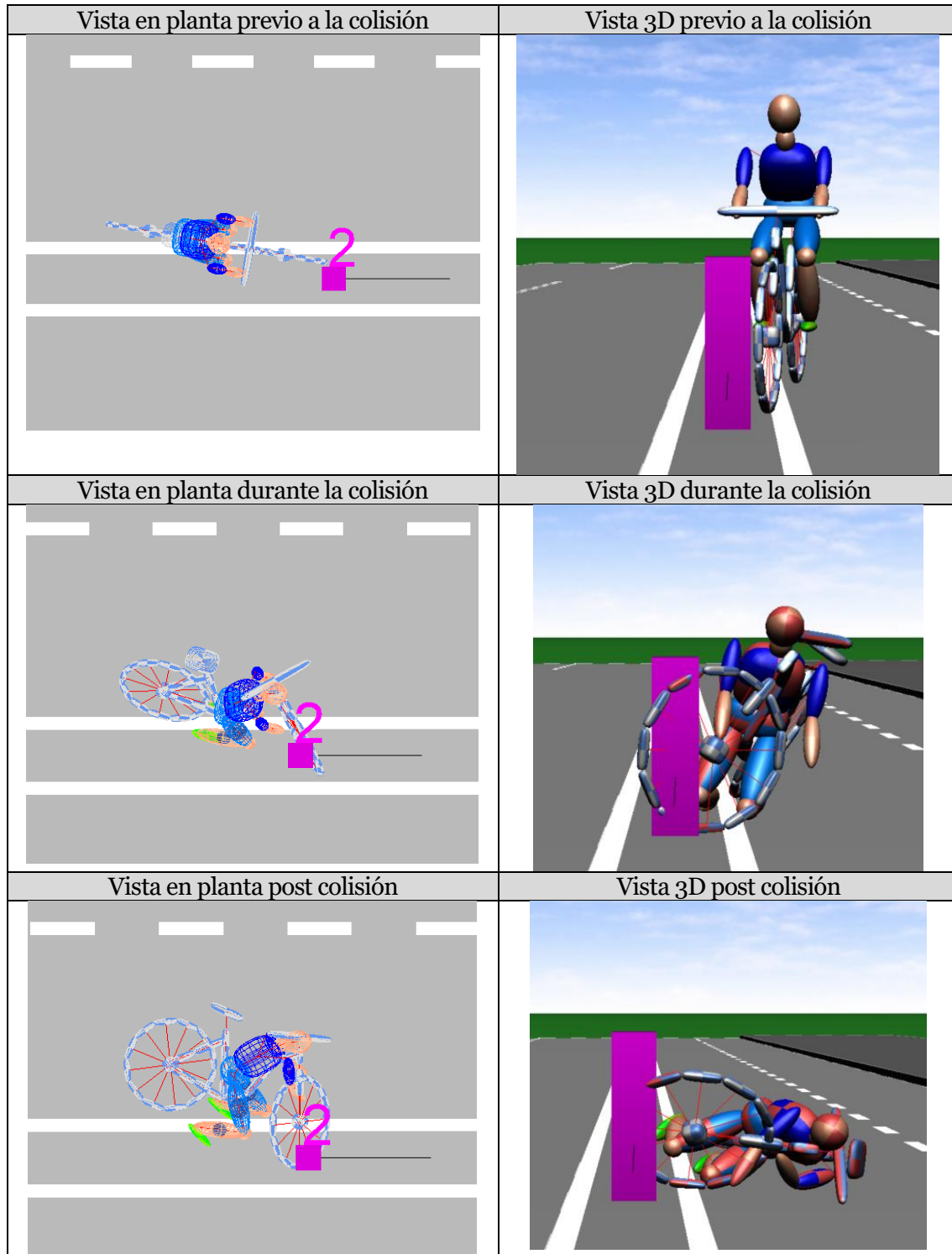


Figura 247. Reconstrucción del accidente para la colisión de la usuaria en bicicleta contra el bolardo a 5km/h

FUERZA DE CONTACTO



Figura 248. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10°/5 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.48 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

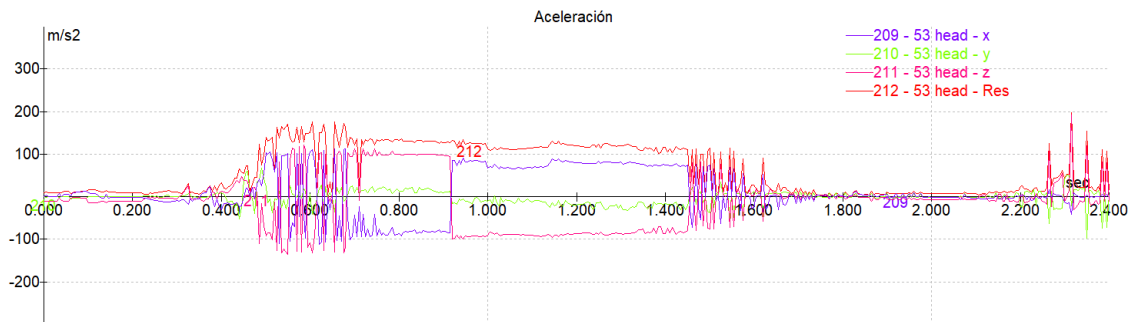


Figura 249. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /5 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

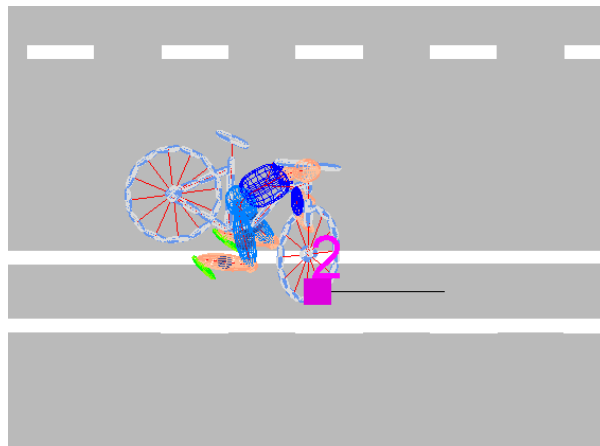


Figura 250. Distancia invadida en la calzada (10° /5 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0 m

6.4.2.2 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 10 km/h

FUERZA DE CONTACTO

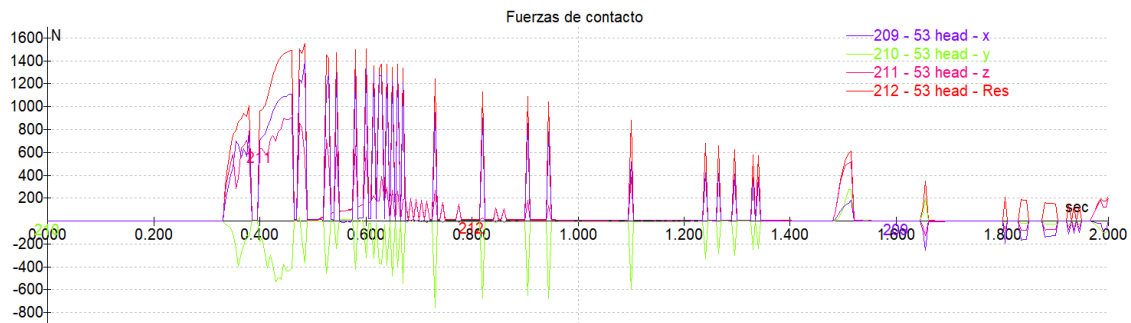


Figura 251. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° / 10 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.48 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

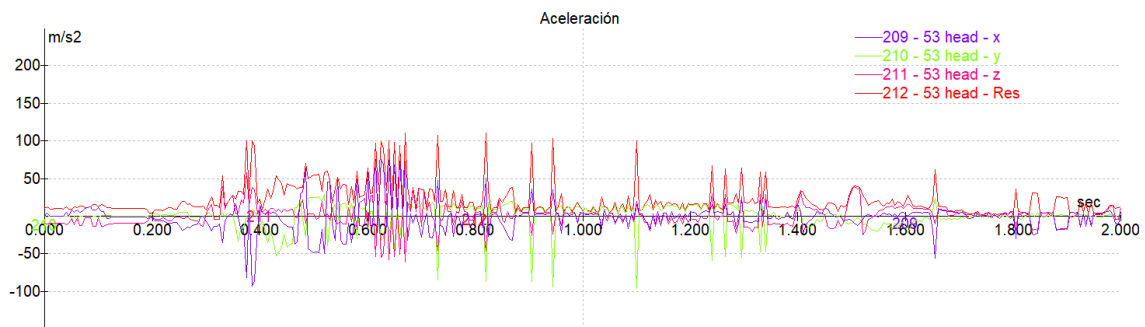


Figura 252. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° / 10 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

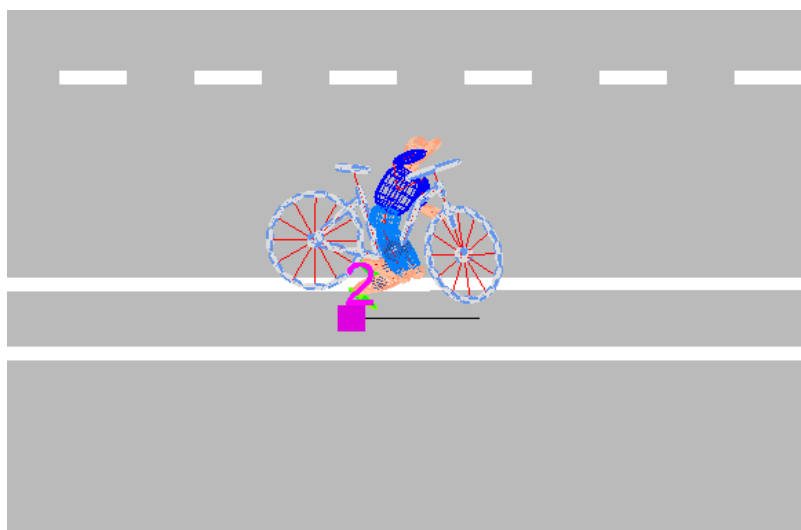


Figura 253. Distancia invadida en la calzada (10° / 10 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0 m

6.4.2.3 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 15 km/h

FUERZA DE CONTACTO

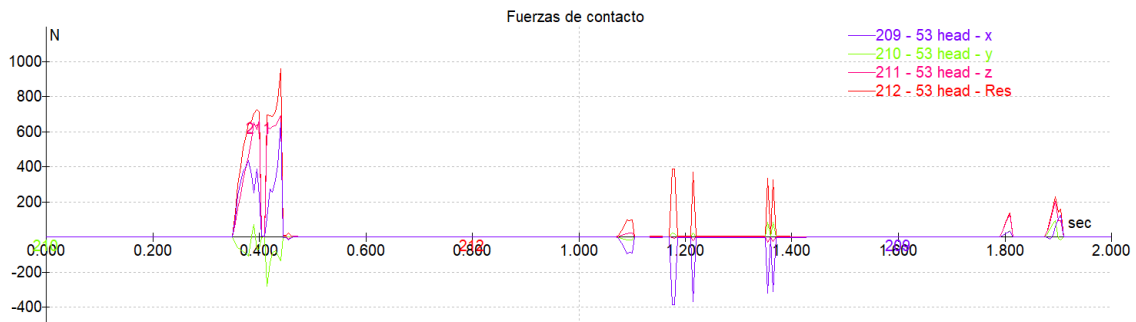


Figura 254. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.44 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

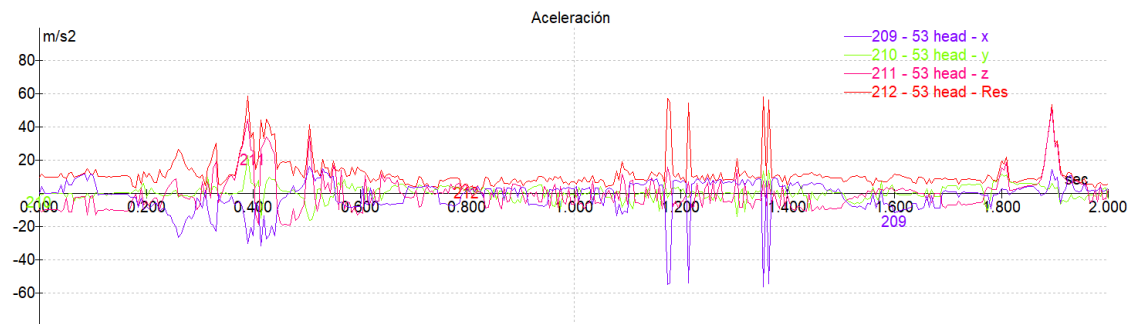


Figura 255. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /15 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

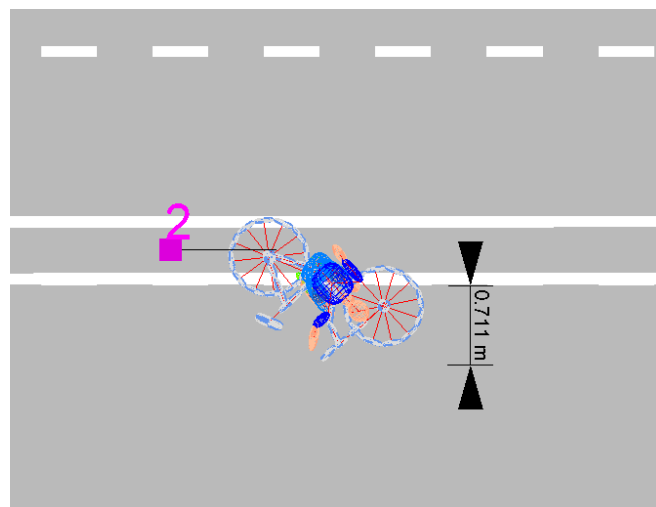


Figura 256. Distancia invadida en la calzada (10° /15 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.71 m

6.4.2.4 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 20 km/h

FUERZA DE CONTACTO

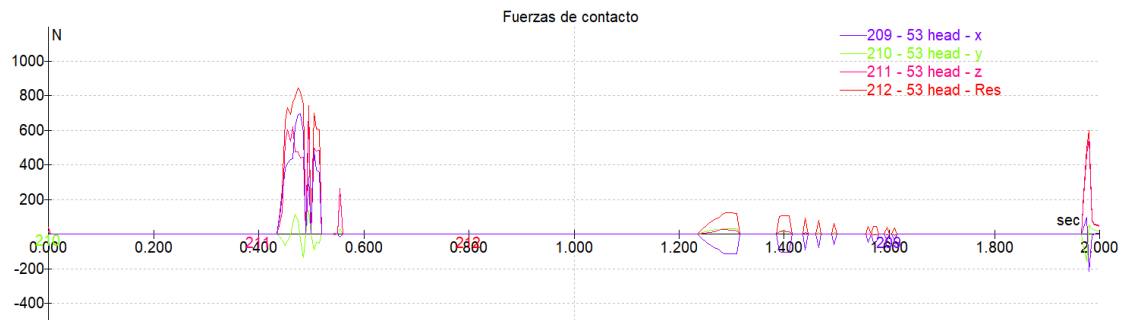


Figura 257. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° / 20 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.47 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

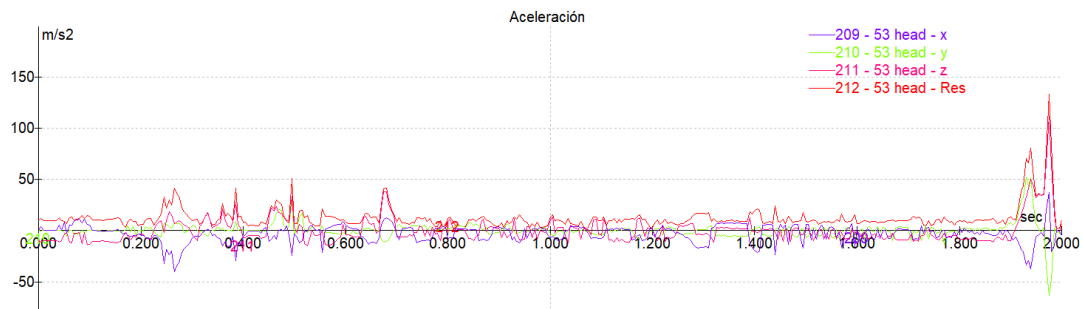


Figura 258. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° / 20 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

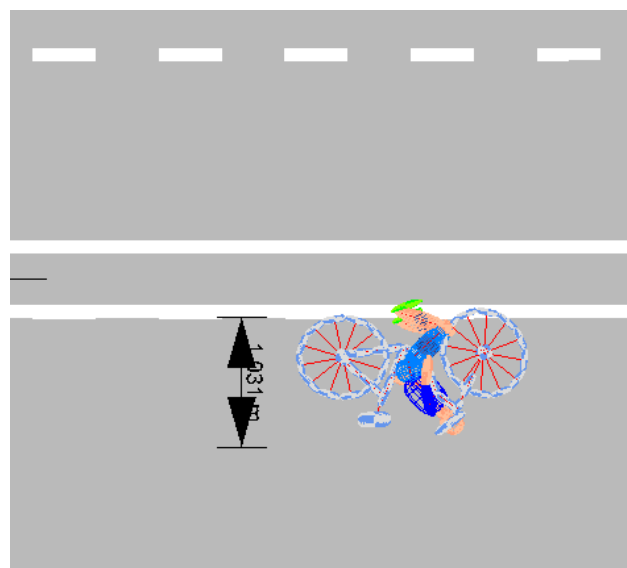


Figura 259. Distancia invadida en la calzada (10° / 20 km/h)

Distancia de calzada invadida: 1.93 m

6.4.2.5 Ángulo de impacto 10° - Velocidad 25 km/h

FUERZA DE CONTACTO

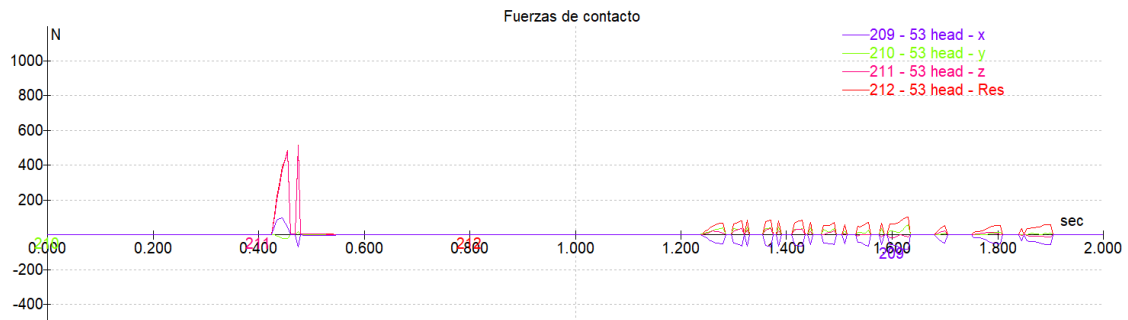


Figura 260. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (10° /25 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.48 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

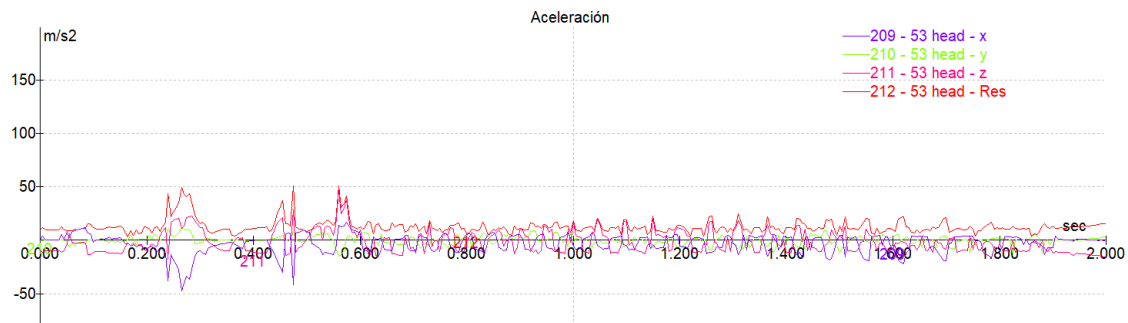


Figura 261. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (10° /25 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

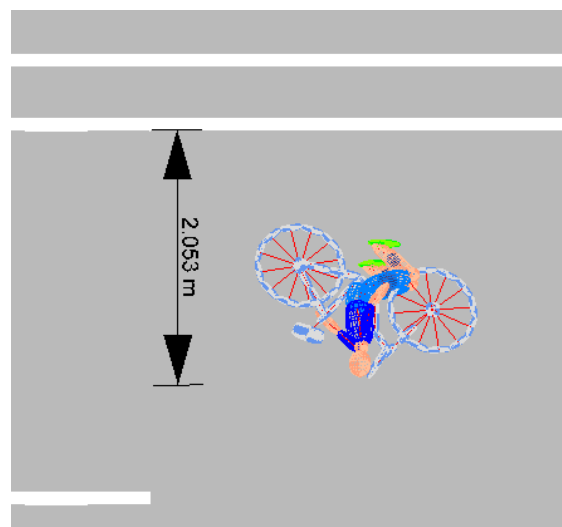


Figura 262. Distancia invadida en la calzada (10° /25 km/h)

Distancia de calzada invadida: 2.05

6.4.2.6 Ángulo de impacto 0° - Velocidad 5 km/h

FUERZA DE CONTACTO

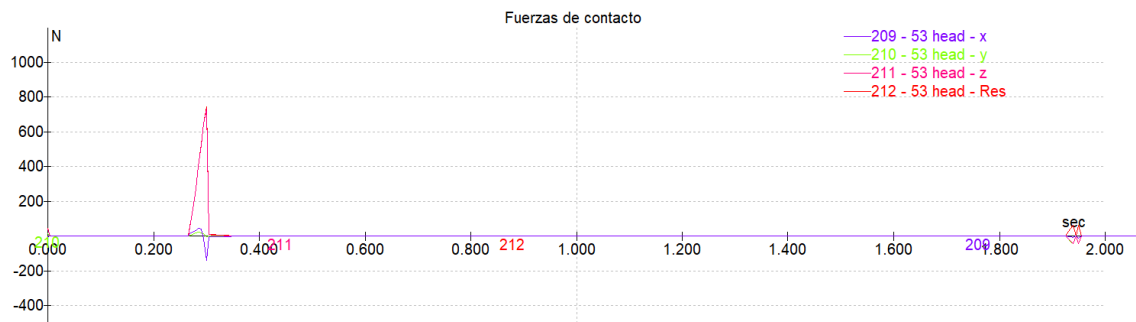


Figura 263. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /5 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.30 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

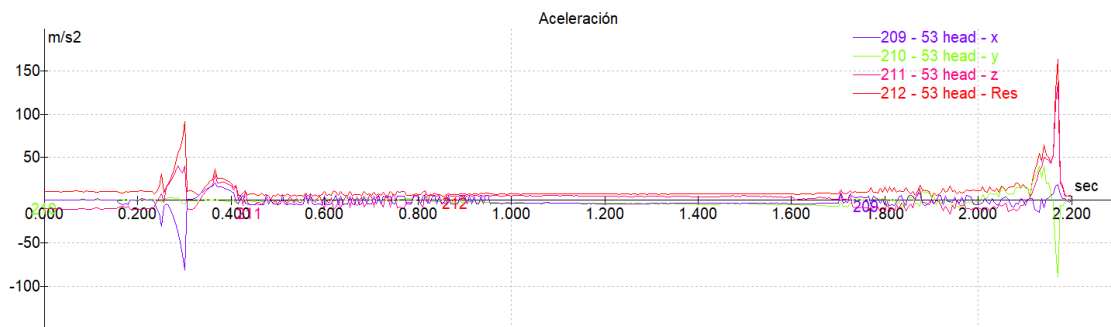


Figura 264. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /5 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

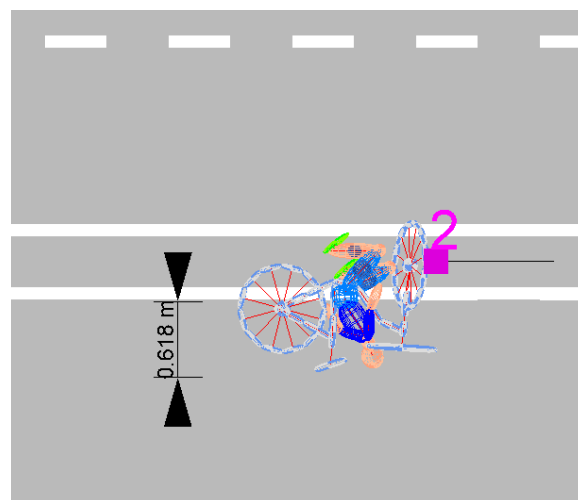


Figura 265. Distancia invadida en la calzada (0° /5 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.62

6.4.2.7 Ángulo de impacto 0° - Velocidad 10 km/h

FUERZA DE CONTACTO

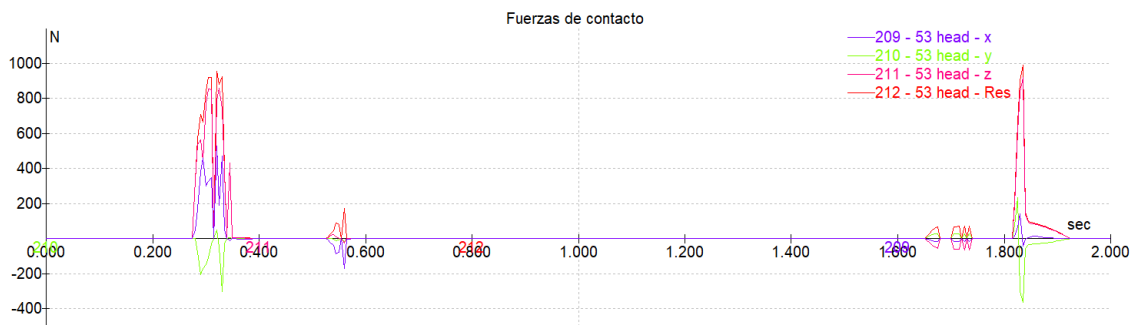


Figura 266. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /10 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 1.83 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

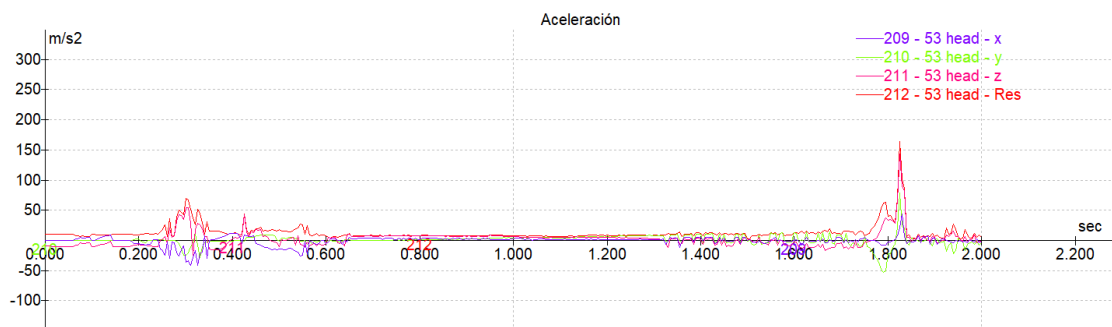


Figura 267. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /10 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

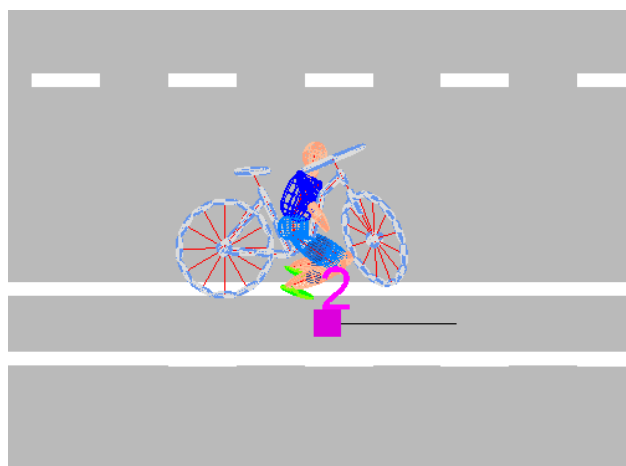


Figura 268. Distancia invadida en la calzada (0° /10 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0 m.

6.4.2.8 Ángulo de impacto 0° - Velocidad 15 km/h

FUERZA DE CONTACTO

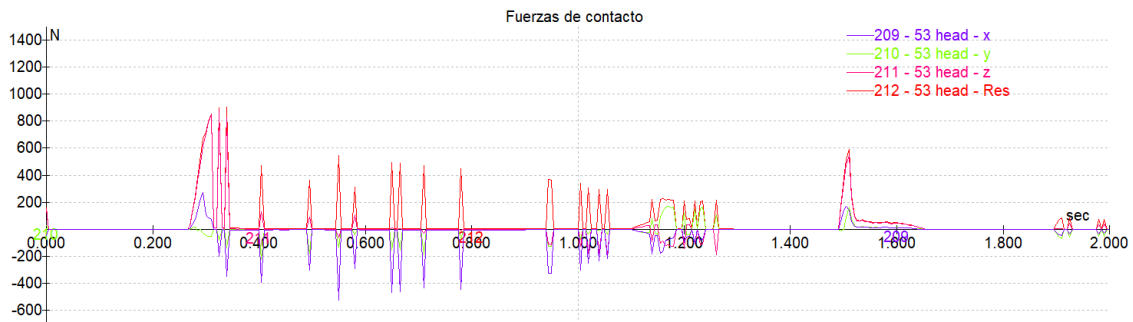


Figura 269. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /15 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.34 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

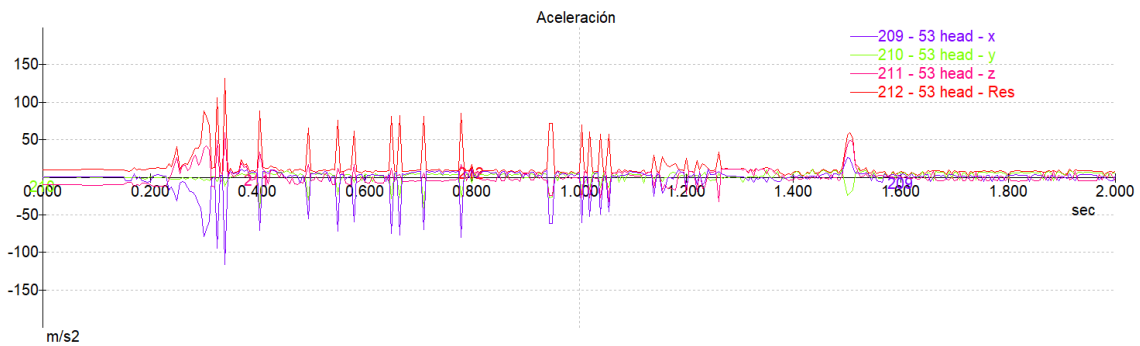


Figura 270. Evolución de la aceleración en la cabeza a lo largo de la caída (0° /15 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

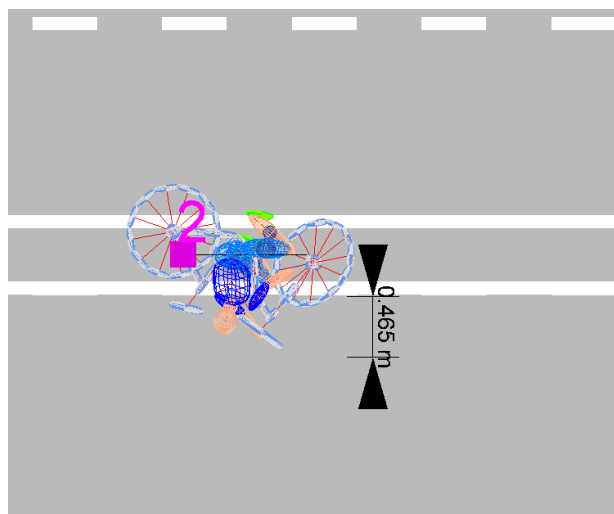


Figura 271. Distancia invadida en la calzada (0° /15 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.46 m.

6.4.2.9 Ángulo de impacto 0° - Velocidad 20 km/h

FUERZA DE CONTACTO

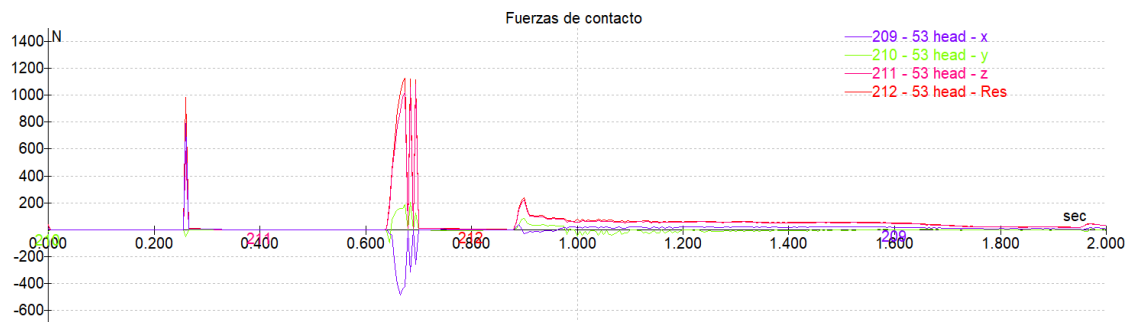


Figura 272. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /20 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.68 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

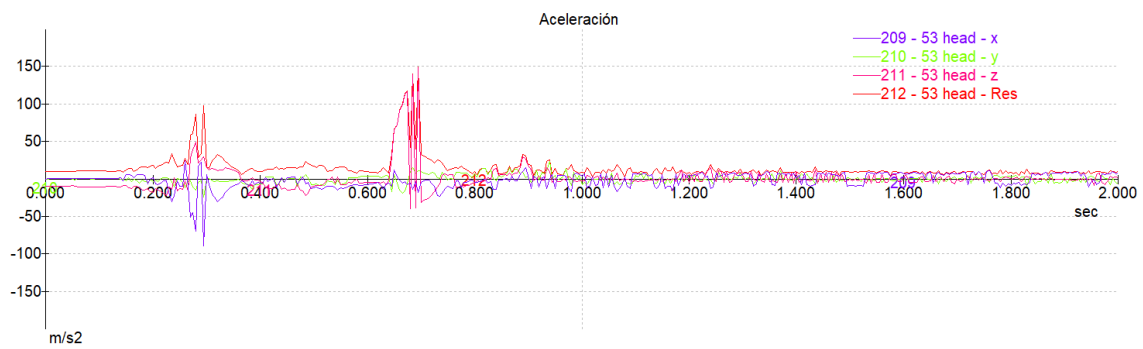


Figura 273. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /20 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

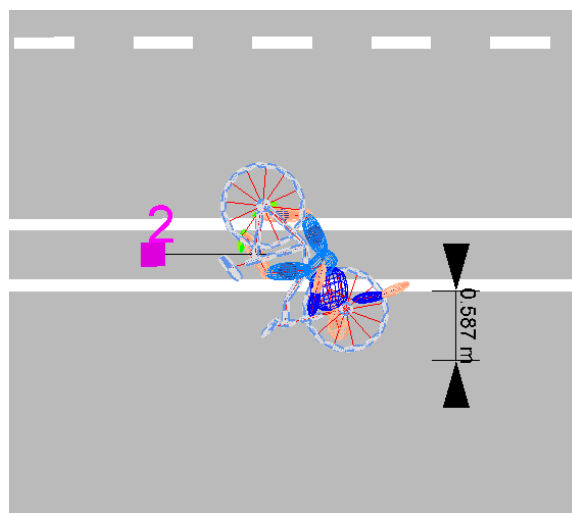


Figura 274. Distancia invadida en la calzada (0° /20 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.59 m.

6.4.2.10 Ángulo de impacto 0° - Velocidad 25 km/h

FUERZA DE CONTACTO



Figura 275. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /25 km/h)

Momento de mayor impacto en la cabeza: 0.76 s

ACELERACIÓN EN LA CABEZA

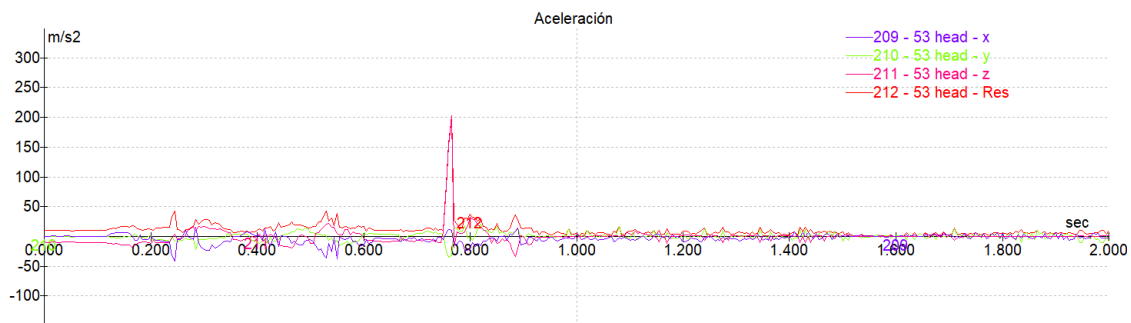


Figura 276. Evolución de la fuerza de contacto en la cabeza a lo largo de la caída (0° /25 km/h)

DISTANCIA INVADIDA EN LA CALZADA

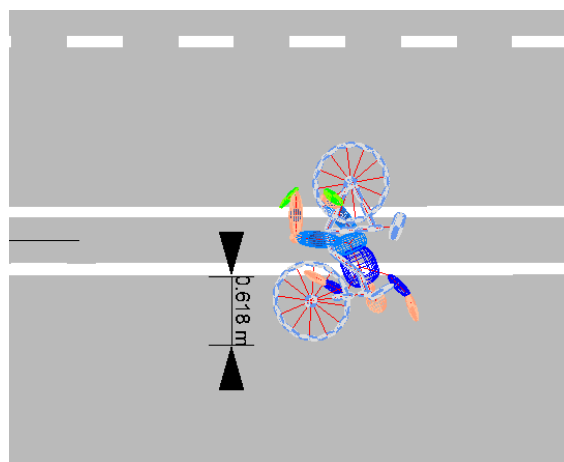


Figura 277. Distancia invadida en la calzada (0° /25 km/h)

Distancia de calzada invadida: 0.62 m.

7 DISCUSIÓN

7.1 Resultados colisión patinete eléctrico – bordillo

7.1.1 Resultados Head Injury Criterion – HIC

De acuerdo con las simulaciones realizadas, las cuales arrojan datos correspondientes a la aceleración de la cabeza para cada uno de los usuarios simulados, es posible calcular el HIC en intervalos de tiempo de 15 ms y de 36 ms, en los cuales según estableció la National Highway Traffic Safety Administration -NHTSA (Schmitt et al., 2004) son periodos en los cuales se indica que el 50% de los heridos sufrirá un nivel de trauma permanente (Anna Niska & Wenäll, 2019) obteniendo valores de HIC mayores o iguales 700 y 1000 respectivamente.

Se presentan en este numeral los resultados y gráficas que ilustran el comportamiento del indicador para los casos más desfavorables de acuerdo con los mostrados en el numeral 6.1.

Para aplicar la expresión presentada en la Ecuación 2. Cálculo HICEcuación 2, y así obtener el HIC en cada uno de los casos estudiados se tuvo en cuenta los siguientes parámetros:

- Conversión de la aceleración producto de las simulaciones en $[m/s^2]$ a $[g]$ con la finalidad de expresar las aceleraciones en términos relativos a la aceleración de la gravedad.
- Conversión de cada intervalo de tiempo $[s]$ a $[ms]$, con la finalidad de establecer fácilmente los periodos de integración, según se presenta en la Ecuación 2.
- Cálculo de la integral por medio del método de los trapecios, lo cual proporciona el área bajo la curva que describe el HIC a calcular.
- Cálculo de la integral definida para los periodos de tiempo de 15 ms y de 36 ms. Esto permite obtener el HIC 15ms y HIC 36 ms.

7.1.1.1 *Usuario masculino*

Los resultados referentes al HIC para los intervalos de tiempo de 15 ms y 36 ms obtenidos se presentan en la Tabla 14.

Patinete eléctrico usuario masculino			
ángulo [°]	velocidad [km/h]	HIC 15 ms	HIC 36 ms
10.00	5.00	32.37	122.19
10.00	10.00	99.84	216.09
10.00	15.00	93.61	218.75
10.00	20.00	104.79	326.45
10.00	25.00	81.18	302.59
40.00	5.00	105.54	198.48
40.00	10.00	58.02	258.67
40.00	15.00	66.18	256.21
40.00	20.00	80.56	223.76
40.00	25.00	92.40	285.79

Tabla 14. Resultados HIC 15 y HIC 36. Patinete eléctrico usuario masculino – bordillo

Según la Tabla 14, los mayores valores para el HIC para 15 ms como para 36 ms, se obtienen, en primer lugar, para un ángulo de colisión de 40° a una velocidad de 5km/h, en la cual, el usuario masculino de patinete eléctrico tiene probabilidad muy baja de sufrir una lesión grave en la cabeza al obtenerse un HIC 15 igual a 105.54 y en segundo lugar, para un ángulo de colisión de 10° a una velocidad de 20 km/h, el HIC 36 igual a 326.45 representa, de igual forma probabilidad muy baja de sufrir una lesión grave en la cabeza al impactar con el pavimento. Estos resultados se ilustran en la Figura 278 y Figura 279.

Es importante resaltar que un HIC de 1000 equivale a un 18% de probabilidad de una lesión grave en la cabeza, un 55% de probabilidad de una lesión seria y un 90% de probabilidad de una lesión moderada en un adulto promedio. Cómo varían esas probabilidades en la población en general es en gran medida desconocido. (Mackay, 2007)

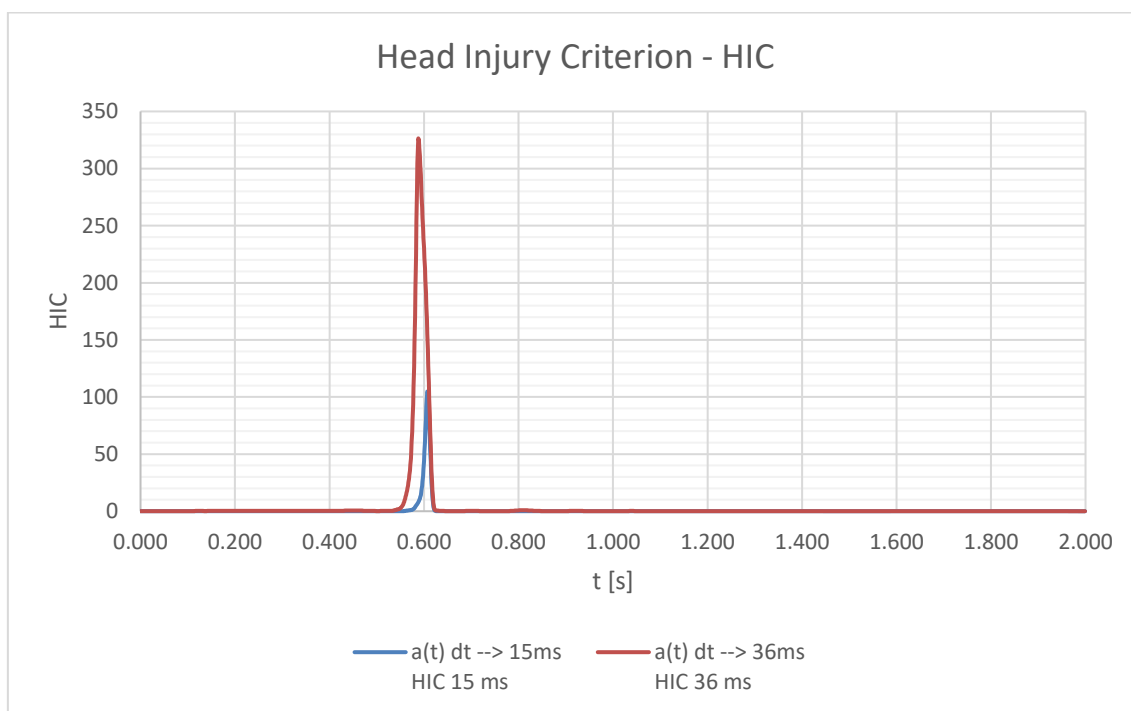


Figura 278. HIC vs tiempo. Usuario patinete eléctrico masculino colisión con bordillo (10° - 20 km/h).

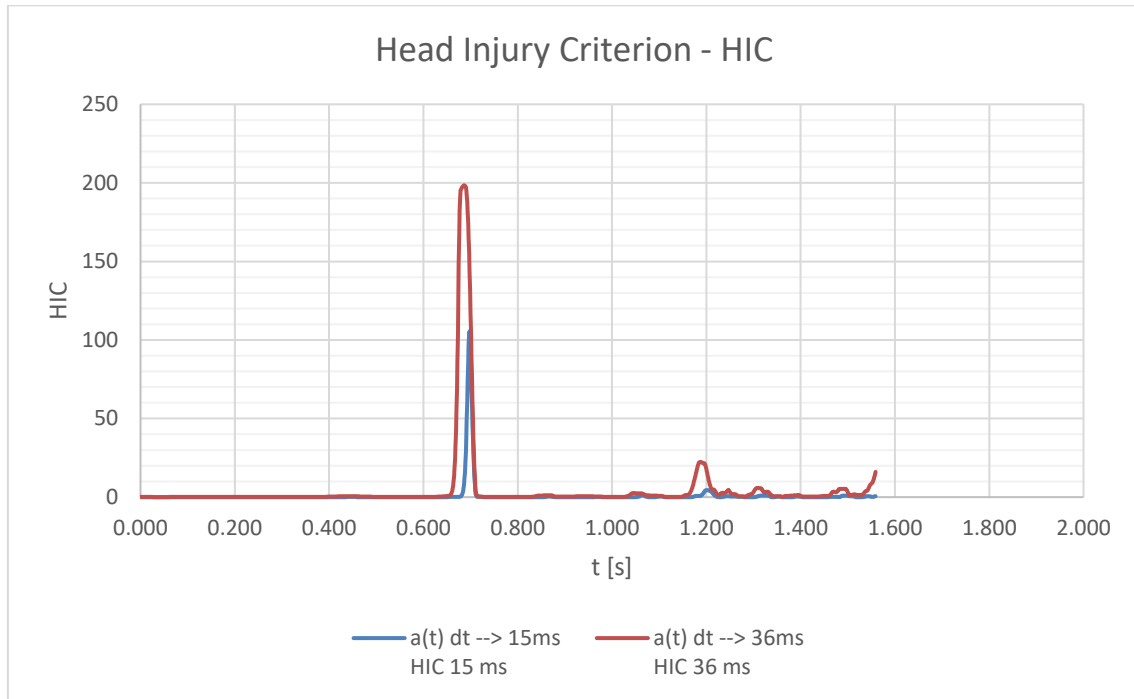


Figura 279. HIC vs tiempo. Usuario patinete eléctrico masculino colisión con bordillo (40° - 5 km/h).

Los resultados del HIC para todos los casos presentados en el numeral 6.1 se presentan en el ANEXO II.

Ahora bien, también fue objeto de estudio la variación del HIC en función de la velocidad del usuario y su relación con el ángulo de impacto. Evidenciando que el escenario más desfavorable, según se mencionó anteriormente, es el ángulo de 10° a una velocidad de 20 km/h por la configuración de la caída, que en este caso fue reconstruida por medio del software. Se presenta la Figura 280 y Figura 281 representando el comportamiento para cada uno de los ángulos de impacto. Sin embargo, es preciso resaltar que en ningún caso se supera el umbral del HIC para los dos índices estudiados (HIC 15 \geq 700 y/o HIC 36 \geq 1000).

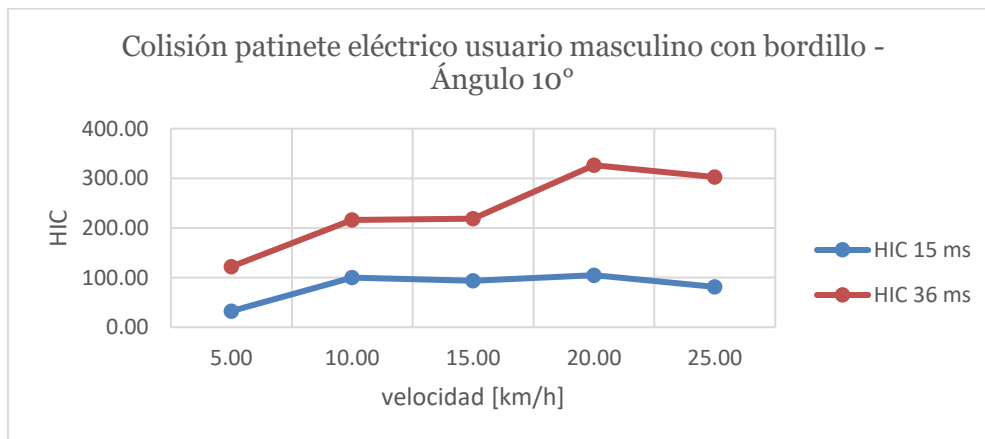


Figura 280. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. (patinete eléctrico usuario masculino – ángulo 10°)

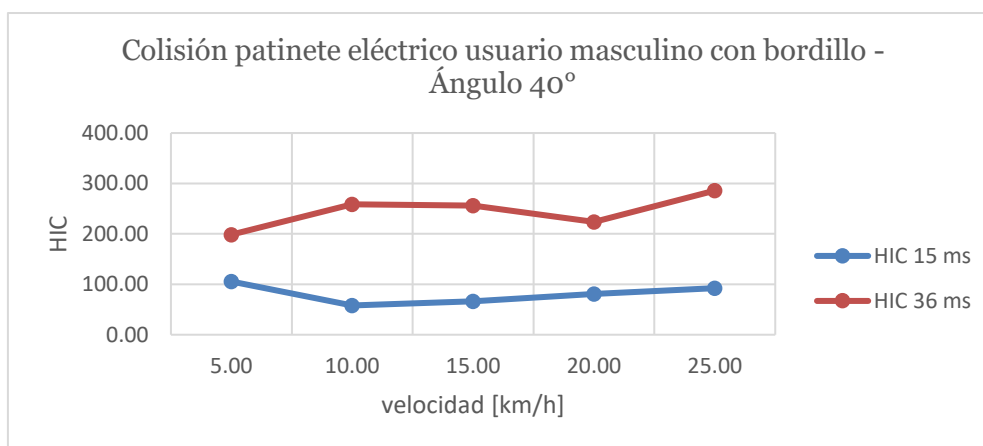


Figura 281. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. (patinete eléctrico usuario masculino – ángulo 40 °)

7.1.1.2 Usuaría femenina

Los resultados referentes al HIC para los intervalos de tiempo de 15 ms y 36 ms obtenidos se presentan en la Tabla 15.

Patinete eléctrico usuaria femenina			
ángulo [°]	velocidad [km/h]	HIC 15 ms	HIC 36 ms
10.00	5.00	75.51	168.67
10.00	10.00	139.58	535.46
10.00	15.00	75.29	123.57
10.00	20.00	141.25	298.84
10.00	25.00	164.16	296.05
40.00	5.00	78.24	153.82
40.00	10.00	52.12	287.97
40.00	15.00	59.08	255.71
40.00	20.00	93.77	265.61
40.00	25.00	93.44	510.81

Tabla 15. Resultados HIC 15 y HIC 36. Patinete eléctrico usuaria femenina – bordillo

Según la Tabla 15, los mayores valores para el HIC para 15 ms como para 36 ms, se obtienen, en primer lugar, para un ángulo de colisión de 10° a una velocidad de 25km/h, en la cual, la usuaria femenina de patinete eléctrico tendría una muy baja probabilidad de sufrir una lesión grave en la cabeza al obtenerse un HIC 15 igual a 164.16 y en segundo lugar, para un ángulo de colisión de 10° a una velocidad de 10 km/h, el HIC 36 igual a 535.46 representando una probabilidad de lesión moderada, lo cual también se obtiene para la colisión a 40° a una velocidad de 25 km/h con un HIC36 de 510.81. Estos resultados se ilustran en la Figura 282, Figura 283 y Figura 284.

Es importante resaltar que un HIC de 1000 equivale a un 18% de probabilidad de una lesión grave en la cabeza, un 55% de probabilidad de una lesión seria y un 90% de probabilidad de una lesión moderada en un adulto promedio. Cómo varían esas probabilidades en la población en general es en gran medida desconocido. (Mackay, 2007)

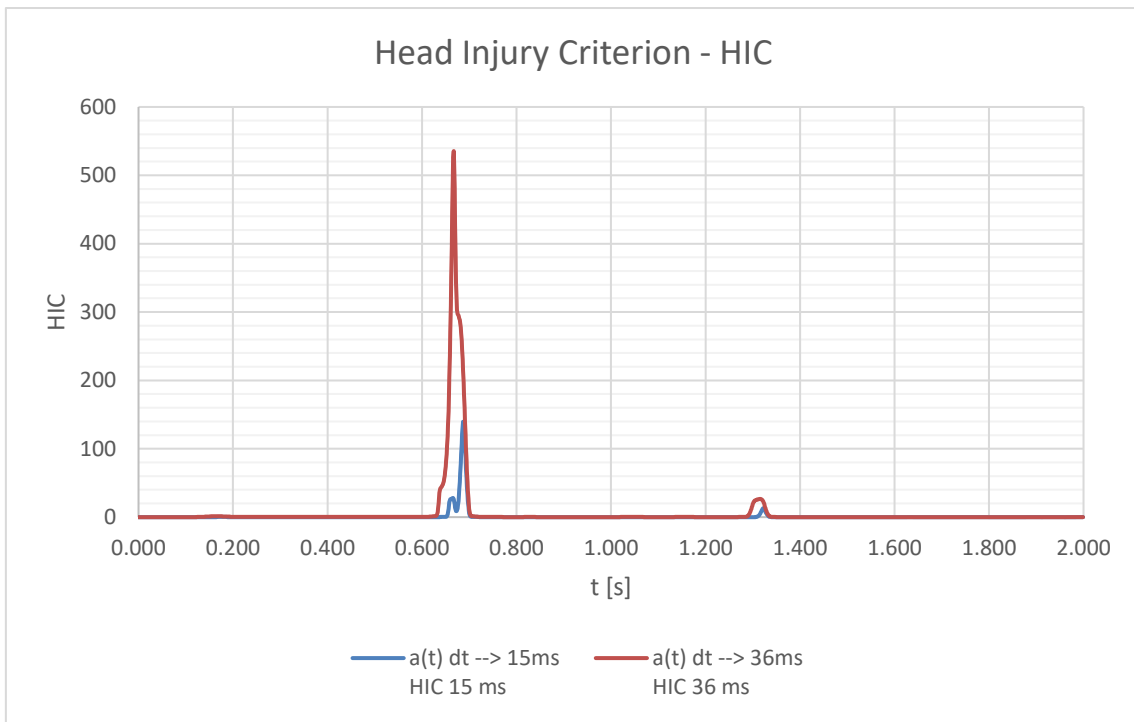


Figura 282. HIC vs tiempo. Usuario patinete eléctrico mujer colisión con bordillo (10° - 10 km/h).

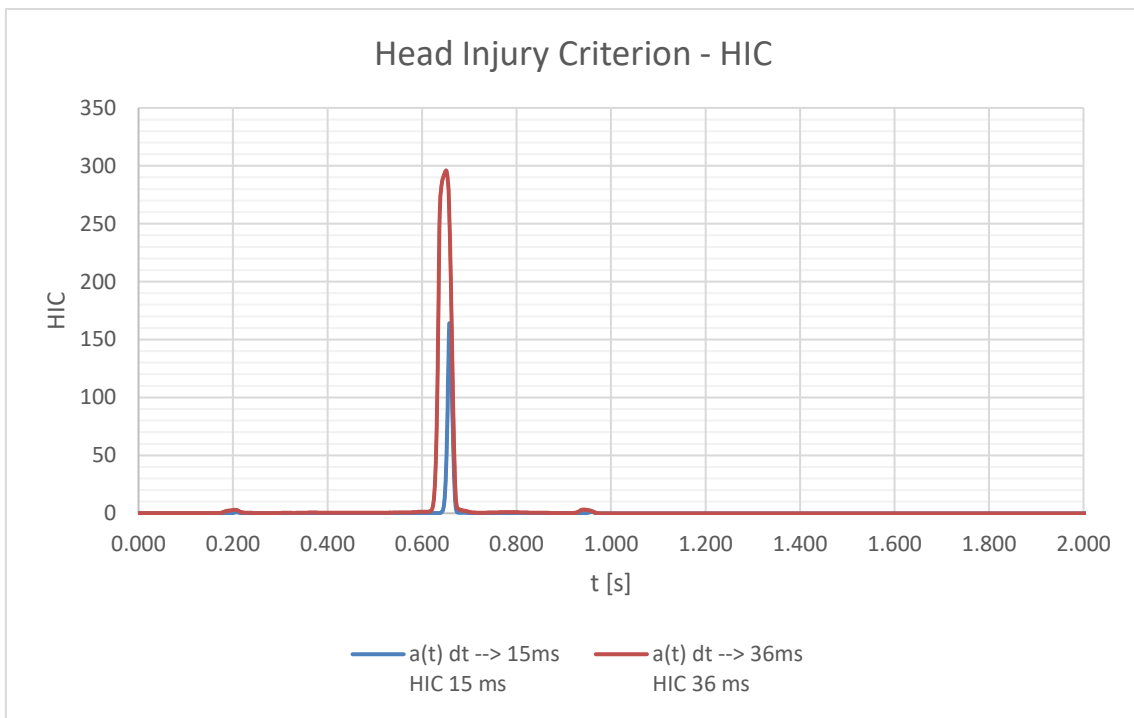


Figura 283. HIC vs tiempo. Usuario patinete eléctrico mujer colisión con bordillo (10° - 25 km/h).

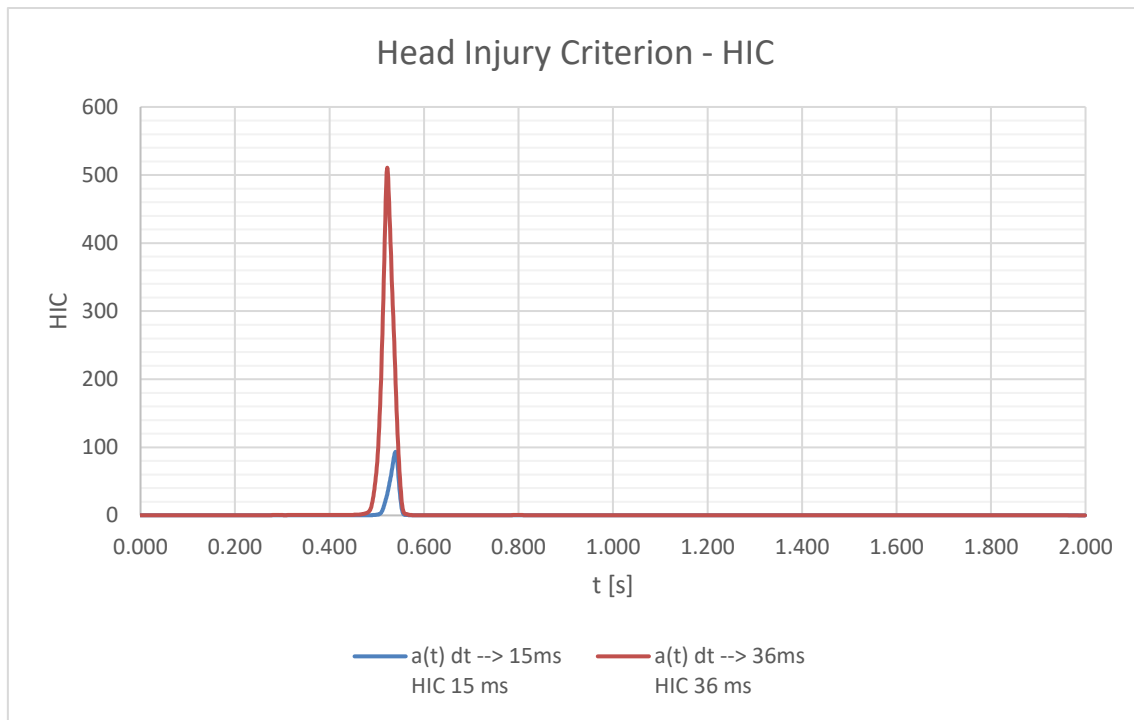


Figura 284. HIC vs tiempo. Usuario patinete eléctrico mujer colisión con bordillo (40° - 25 km/h).

Ahora bien, también fue objeto de estudio la variación del HIC en función de la velocidad del usuario y su relación con el ángulo de impacto. Evidenciando que el escenario más desfavorable, según se mencionó anteriormente, es el ángulo de 10° a una velocidad de 10 km/h por la configuración de la caída, que en este caso fue reconstruida por medio del software. Se presenta la Figura 285 y Figura 286 representando el comportamiento para cada uno de los ángulos de impacto. Sin embargo, es preciso resaltar que en ningún caso se supera el umbral del HIC para los dos índices estudiados ($HIC\ 15 \geq 700$ y/o $HIC\ 36 \geq 1000$).

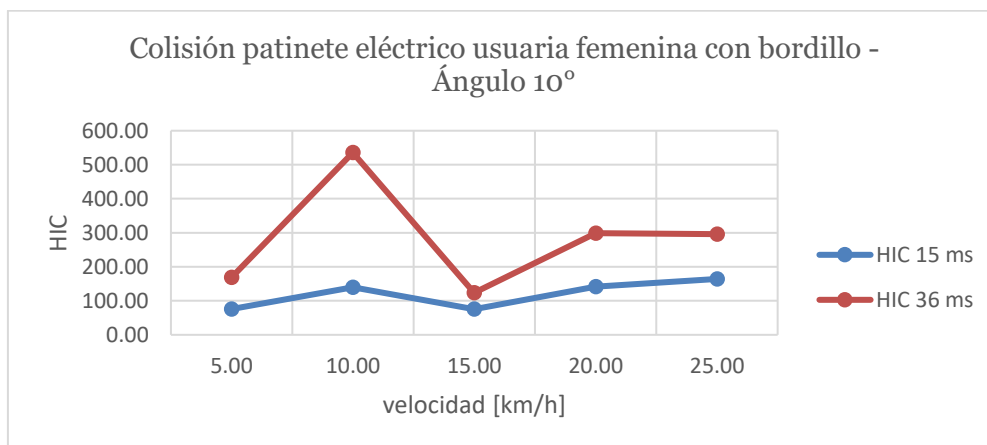


Figura 285. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. (patinete eléctrico usuaria femenina – ángulo 10°)

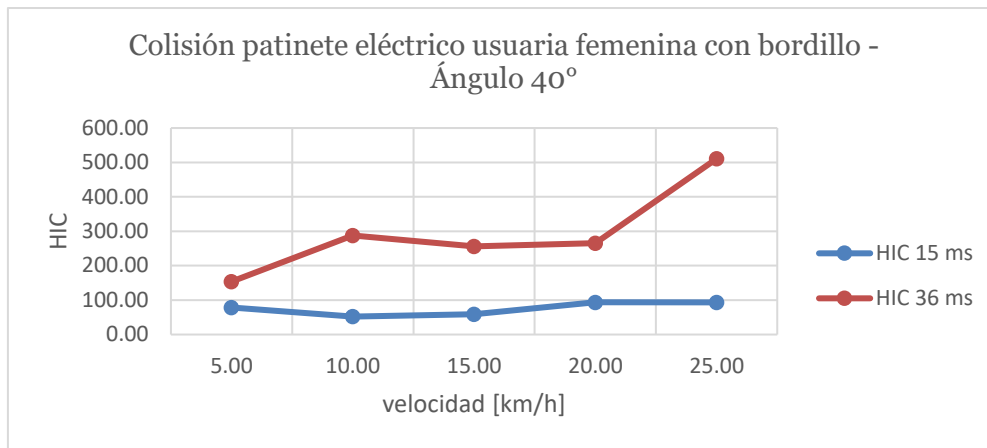


Figura 286. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. (patinete eléctrico usuaria femenina – ángulo 40 °)

De acuerdo con los resultados presentados de los valores de HIC tanto para hombres como para mujeres, es posible inferir para el caso de colisiones de usuarios en patinete eléctrico contra bordillo, son las usuarias mujeres quienes registran mayores valores para los ángulos de impacto analizados principalmente a velocidades de 10 km/h y 25 km/h.

7.1.2 Resultados distancia invadida en la calzada

Según los datos obtenidos referentes a la distancia alcanzada por la víctima posterior a la colisión, es posible inferir, que en general, esta se comporta de forma directamente proporcional a la velocidad y al ángulo con el cual impacta, encontrando algunos casos excepcionales, como las caídas con el ángulo de 10 ° que se ven influenciadas a bajas velocidades por contacto con el elemento separador, según se muestra en la Figura 287 y Figura 288.

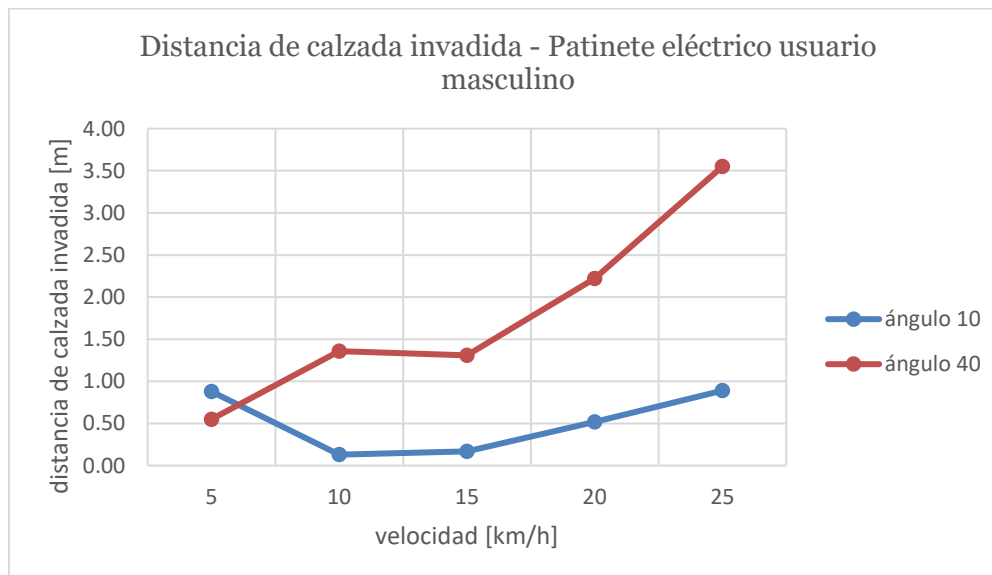


Figura 287. Evolución de la distancia invadida en la calzada en función de la velocidad (patinete eléctrico usuario masculino colisión bordillo)

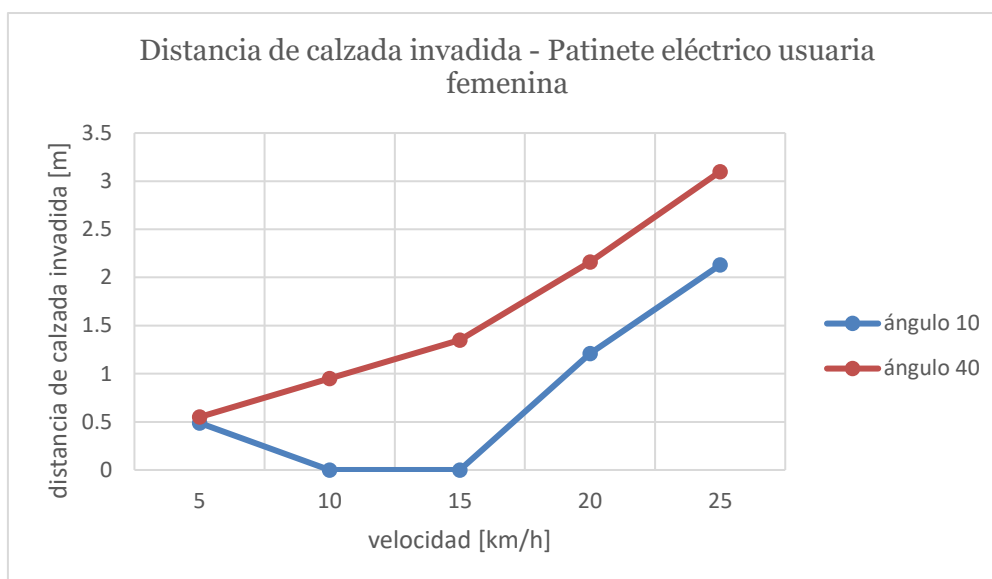


Figura 288. Evolución de la distancia invadida en la calzada en función de la velocidad (patinete eléctrico usuaria femenina colisión bordillo)

Además, estos resultados también permiten identificar que para el ángulo de colisión mayor (40°) el usuario masculino alcanza mayor distancia invadida en la calzada y para el ángulo de colisión menor (10°) es la usuaria femenina la que alcanza mayor distancia en la calzada.

7.2 **Resultados colisión bicicleta – bordillo**

7.2.1 **Resultados Head Injury Criterion – HIC**

De acuerdo con las simulaciones realizadas, las cuales arrojan datos correspondientes a la aceleración de la cabeza para cada uno de los usuarios simulados, es posible calcular el HIC en intervalos de tiempo de 15 ms y de 36 ms, en los cuales según estableció la National Highway Traffic Safety Administration -NHTSA (Schmitt et al., 2004) son periodos en los cuales se indica que el 50% de los heridos sufrirá un nivel de trauma permanente (Anna Niska & Wenäll, 2019) obteniendo valores de HIC mayores o iguales 700 y 1000 respectivamente.

Se presentan en este numeral los resultados y gráficas que ilustran el comportamiento del indicador para los casos más desfavorables de acuerdo con los mostrados en el numeral 6.2 y teniendo en cuenta los mismos parámetros mencionados en el numeral 7.1.1 para el cálculo del HIC.

7.2.1.1 *Usuario masculino*

Los resultados referentes al HIC para los intervalos de tiempo de 15 ms y 36 ms obtenidos se presentan en la Tabla 16.

Bicicleta usuario masculino			
ángulo [°]	velocidad [km/h]	HIC 15 ms	HIC 36 ms
10.00	5.00	3.95	28.98
10.00	10.00	5.75	14.90
10.00	15.00	13.40	51.38
10.00	20.00	2.69	20.99
10.00	25.00	18.55	61.40
40.00	5.00	3.10	18.43
40.00	10.00	14.88	45.14
40.00	15.00	31.01	90.18
40.00	20.00	4.84	20.25
40.00	25.00	6.06	23.79

Tabla 16. Resultados HIC 15 y HIC 36. Bicicleta usuario masculino – bordillo

Según la Tabla 16, los mayores valores para el HIC para 15 ms como para 36 ms, se obtienen, en primer lugar, para un ángulo de colisión de 40° a una velocidad de 15km/h, en la cual, el ciclista tiene baja probabilidad de sufrir una lesión grave en la cabeza al obtenerse un HIC 15 igual a 31.01 y en segundo lugar, para el mismo ángulo de colisión mencionado y la misma velocidad, el HIC 36 igual a 90.18, representando de igual forma una probabilidad baja de sufrir una lesión grave en la cabeza al impactar con el pavimento. Estos resultados se ilustran en la Figura 289.

Es importante resaltar que un HIC de 1000 equivale a un 18% de probabilidad de una lesión grave en la cabeza, un 55% de probabilidad de una lesión seria y un 90% de probabilidad de una lesión moderada en un adulto promedio. Cómo varían esas probabilidades en la población en general es en gran medida desconocido. (Mackay, 2007)

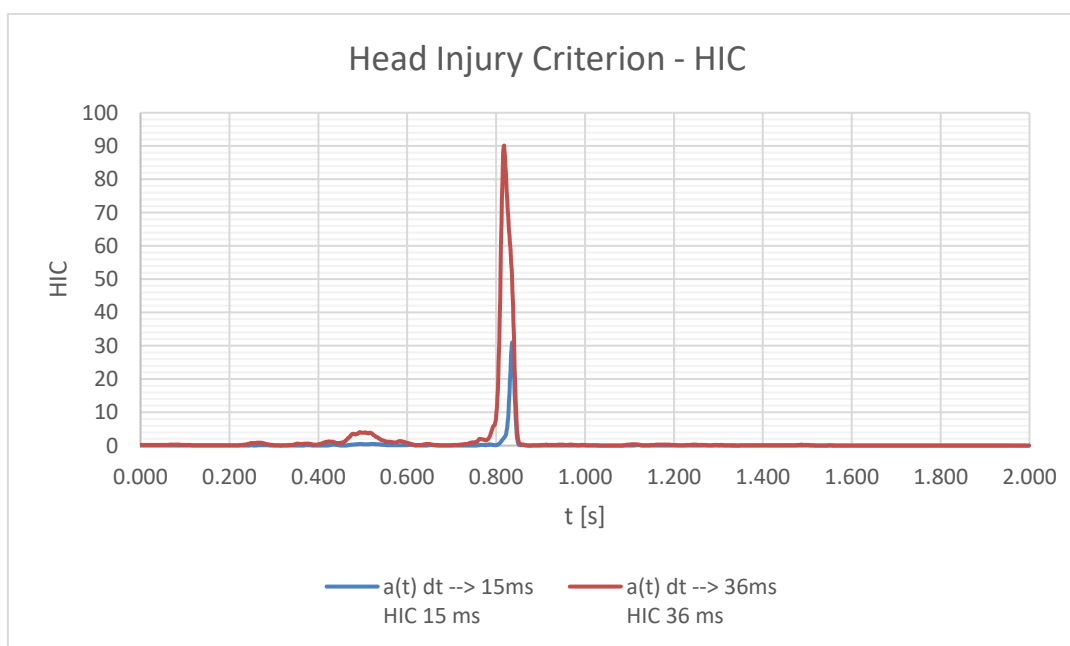


Figura 289. HIC vs tiempo. Ciclista masculino colisión con bordillo (40° - 15 km/h).

Los resultados del HIC para todos los casos presentados en el numeral 6.2 se presentan en el ANEXO II.

Ahora bien, también fue objeto de estudio la variación del HIC en función de la velocidad del usuario y su relación con el ángulo de impacto. Evidenciando que el escenario más desfavorable, según se mencionó anteriormente, es el ángulo de 40° a una velocidad de 15 km/h por la configuración de la caída, que en este caso fue reconstruida por medio del software. Se presenta la Figura 290 y Figura 291 representando el comportamiento para cada uno de los ángulos de impacto. Sin embargo, es preciso resaltar que en ningún caso se supera el umbral del HIC para los dos índices estudiados ($HIC_{15} \geq 700$ y/o $HIC_{36} \geq 10000$).

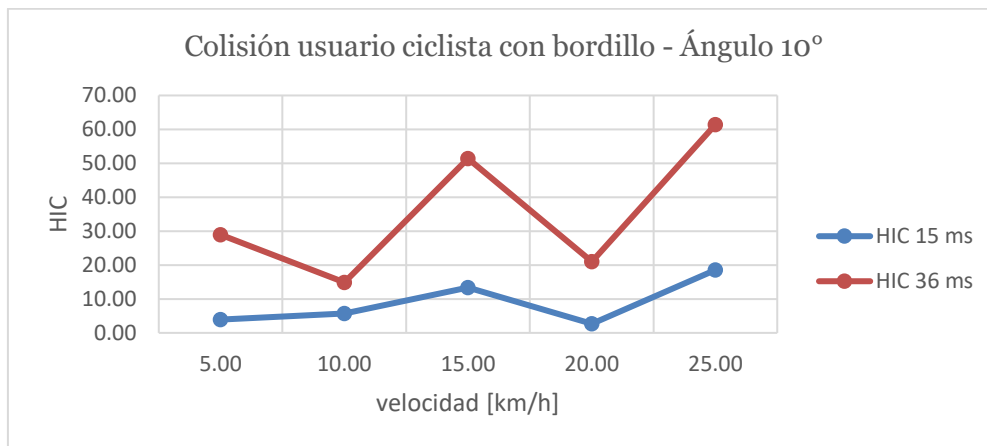


Figura 290. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. (usuario ciclista – ángulo 10°)

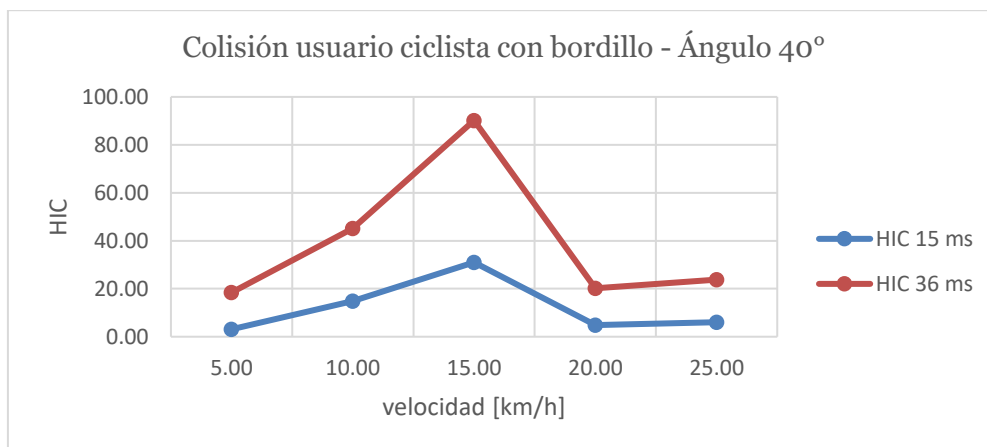


Figura 291. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. (usuario ciclista – ángulo 40°)

7.2.1.2 Usuaría femenina

Los resultados referentes al HIC para los intervalos de tiempo de 15 ms y 36 ms obtenidos se presentan en la Tabla 17.

Bicicleta usuaria femenina			
ángulo [°]	velocidad [km/h]	HIC 15 ms	HIC 36 ms
10.00	5.00	8.30	69.47
10.00	10.00	38.39	195.69
10.00	15.00	10.92	78.31
10.00	20.00	8.26	26.23
10.00	25.00	24.51	64.26
40.00	5.00	6.23	17.84
40.00	10.00	36.95	109.82
40.00	15.00	10.31	52.84
40.00	20.00	1.21	9.31
40.00	25.00	5.44	16.92

Tabla 17. Resultados HIC 15 y HIC 36. Bicicleta usuaria femenina – bordillo

Según la Tabla 17, los mayores valores para el HIC para 15 ms como para 36 ms, se obtienen, en primer lugar, para un ángulo de colisión de 10° a una velocidad de 10km/h, en la cual, la ciclista tiene baja probabilidad de sufrir una lesión grave en la cabeza al obtenerse un HIC 15 igual a 38.39 y en segundo lugar, para el mismo ángulo de colisión mencionado y la misma velocidad, el HIC 36 igual a 195.69, representando de igual forma una probabilidad baja de sufrir una lesión grave en la cabeza al impactar con el pavimento. Estos resultados se ilustran en la Figura 292.

Es importante resaltar que un HIC de 1000 equivale a un 18% de probabilidad de una lesión grave en la cabeza, un 55% de probabilidad de una lesión seria y un 90% de probabilidad de una lesión moderada en un adulto promedio. Cómo varían esas probabilidades en la población en general es en gran medida desconocido. (Mackay, 2007)

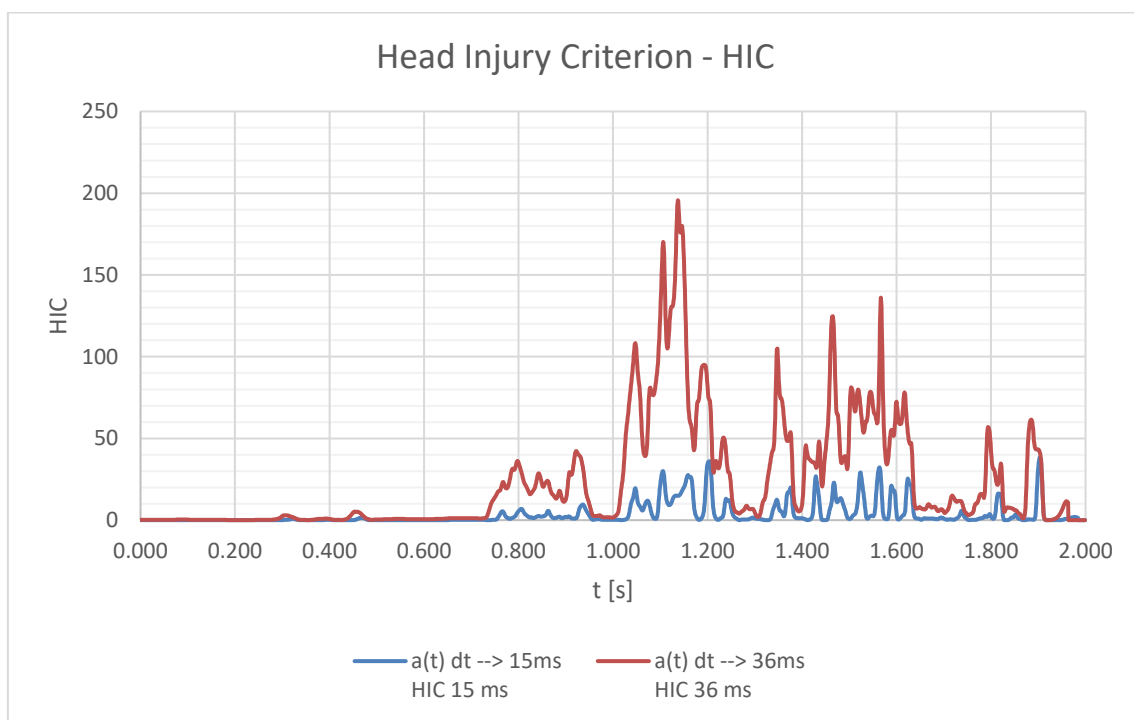


Figura 292. HIC vs tiempo. Ciclista femenina colisión con bordillo (10° - 10 km/h).

Los resultados del HIC para todos los casos presentados en el numeral 6.2 se presentan en el ANEXO II.

Ahora bien, también fue objeto de estudio la variación del HIC en función de la velocidad del usuario y su relación con el ángulo de impacto. Evidenciando que el escenario más desfavorable, según se mencionó anteriormente, es el ángulo de 10 ° a una velocidad de 10 km/h por la configuración de la caída, que en este caso fue reconstruida por medio del software. Se presenta la Figura 293 y Figura 294 representando el comportamiento para cada uno de los ángulos de impacto. Sin embargo, es preciso resaltar que en ningún caso se supera el umbral del HIC para los dos índices estudiados ($HIC_{15} \geq 700$ y/o $HIC_{36} \geq 1000$).

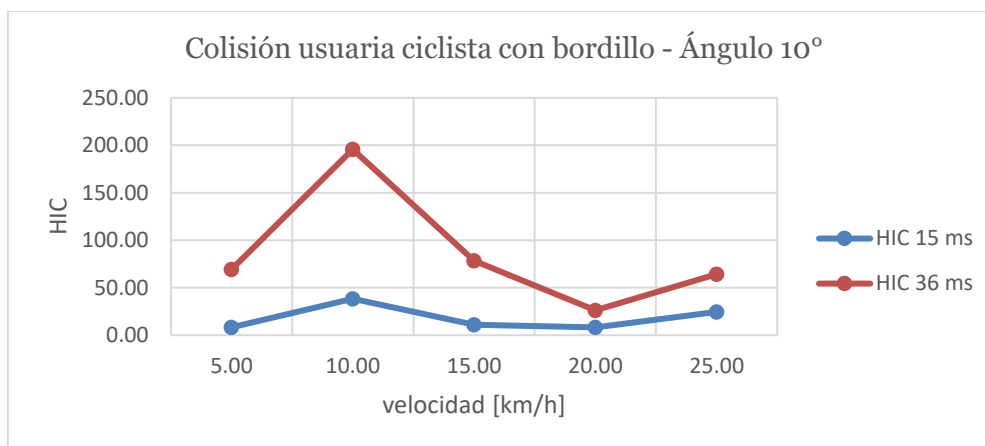


Figura 293. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. (usuaria ciclista – ángulo 10 °)

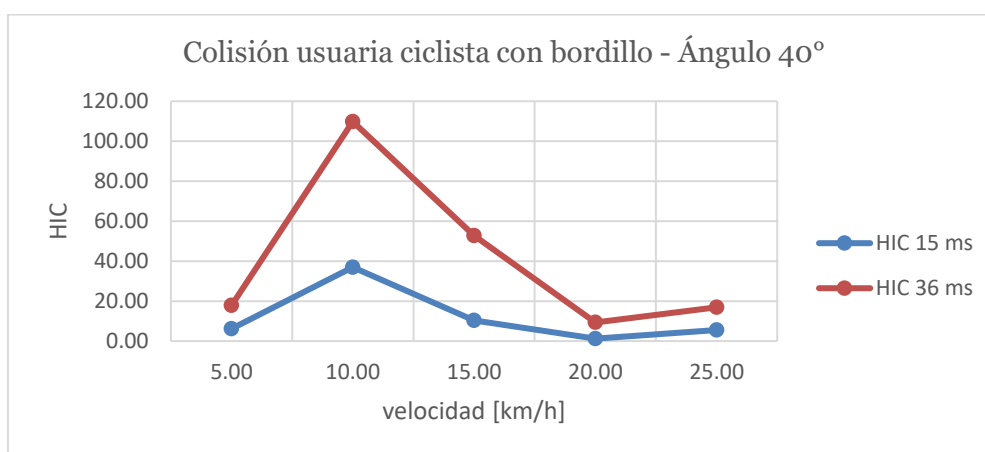


Figura 294. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. (usuaria ciclista – ángulo 40 °)

De acuerdo con los resultados presentados de los valores de HIC tanto para hombres como para mujeres, es posible inferir para el caso de colisiones de usuarios en bicicleta contra bordillo, son las usuarias mujeres quienes registran mayores valores para los ángulos de impacto analizados principalmente a velocidades de 10 km/h.

7.2.2 Resultados distancia invadida en la calzada

Según los datos obtenidos referentes a la distancia alcanzada por la víctima posterior a la colisión, es posible inferir, que en general, esta se comporta de forma directamente proporcional a la velocidad y al ángulo con el cual impacta, encontrando algunos casos excepcionales, como las caídas con el ángulo de 10 ° que se ven influenciadas a bajas velocidades por contacto con el elemento separador, según se muestra en la Figura 295 y Figura 296.

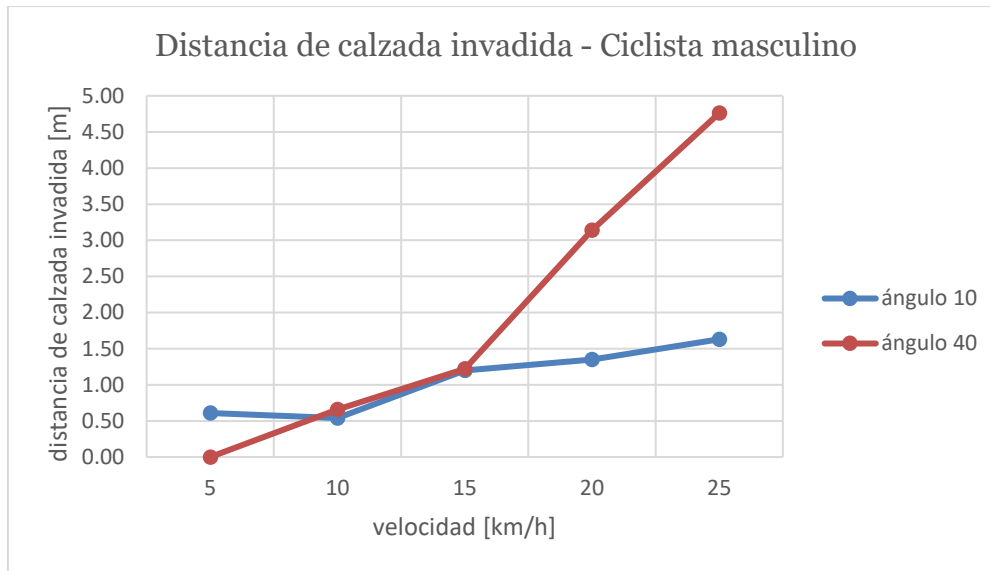


Figura 295. Evolución de la distancia invadida en la calzada en función de la velocidad (bicicleta usuario masculino colisión bordillo)

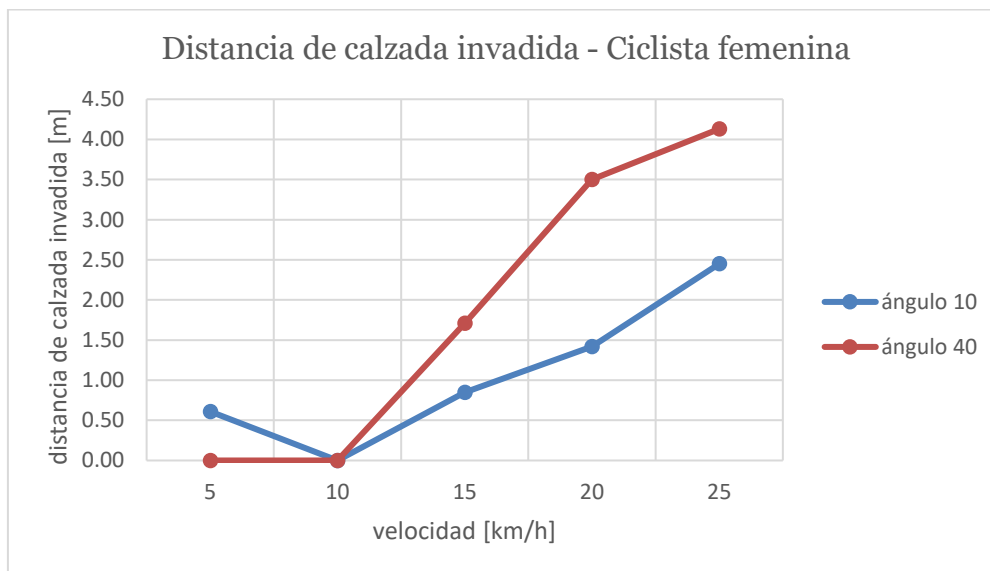


Figura 296. Evolución de la distancia invadida en la calzada en función de la velocidad (bicicleta usuaria femenina colisión bordillo)

7.3 Resultados colisión patinete eléctrico – bolardo

7.3.1 Resultados Head Injury Criterion – HIC

De acuerdo con las simulaciones realizadas, las cuales arrojan datos correspondientes a la aceleración de la cabeza para cada uno de los usuarios simulados, es posible calcular el HIC en intervalos de tiempo de 15 ms y de 36 ms, en los cuales según estableció la National Highway Traffic Safety Administration -NHTSA (Schmitt et al., 2004) son periodos en los cuales se indica que el 50% de los heridos sufrirá un nivel de trauma permanente (Anna Niska & Wenäll, 2019) obteniendo valores de HIC mayores o iguales 700 y 1000 respectivamente.

Se presentan en este numeral los resultados y gráficas que ilustran el comportamiento del indicador para los casos más desfavorables de acuerdo con los mostrados en el numeral 6.3 y teniendo en cuenta los mismos parámetros mencionados en el numeral 7.1.1 para el cálculo del HIC.

7.3.1.1 Usuario masculino

Los resultados referentes al HIC para los intervalos de tiempo de 15 ms y 36 ms obtenidos se presentan en la Tabla 18.

Patinete eléctrico usuario masculino			
ángulo [°]	velocidad [km/h]	HIC 15 ms	HIC 36 ms
10.00	5.00	3.62	13.45
10.00	10.00	58.47	165.93
10.00	15.00	49.42	175.99
10.00	20.00	53.70	243.36
10.00	25.00	53.32	283.57
0.00	5.00	20.10	89.31
0.00	10.00	28.07	124.36
0.00	15.00	85.29	186.11
0.00	20.00	56.67	267.56
0.00	25.00	81.66	228.12

Tabla 18. Resultados HIC 15 y HIC 36. Patinete eléctrico usuario masculino – bolardo

Según la Tabla 18, los mayores valores para el HIC para 15 ms como para 36 ms, se obtienen, en primer lugar, para un ángulo de colisión de 0° a una velocidad de 15km/h, en la cual, el usuario de patinete eléctrico tiene muy baja probabilidad de sufrir una lesión grave en la cabeza al obtenerse un HIC 15 igual a 85.29 y en segundo lugar, para un ángulo de colisión de 10° a una velocidad de 25km/h, el HIC 36 igual a 283.57, representando de igual forma, una probabilidad muy baja de sufrir una lesión grave en la cabeza al impactar con el pavimento. Estos resultados se ilustran en la Figura 297 y Figura 298.

Es importante resaltar que un HIC de 1000 equivale a un 18% de probabilidad de una lesión grave en la cabeza, un 55% de probabilidad de una lesión seria y un 90% de probabilidad de una lesión moderada en un adulto promedio. Cómo varían esas

probabilidades en la población en general es en gran medida desconocido. (Mackay, 2007)

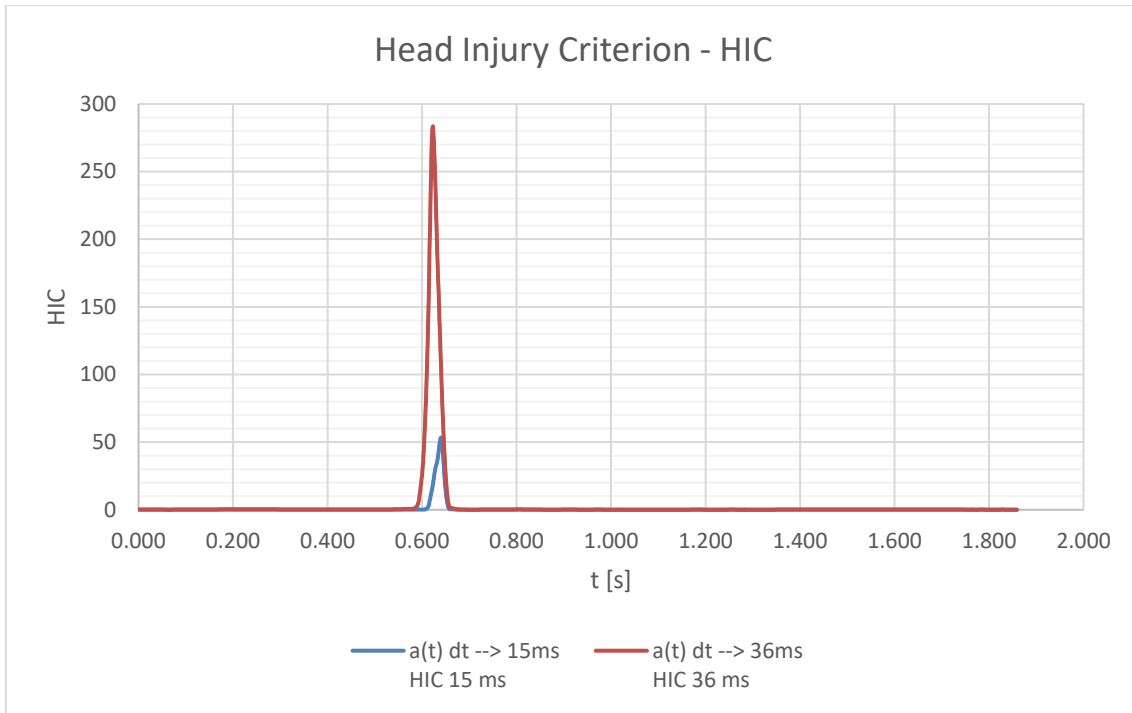


Figura 297. HIC vs tiempo. Usuario patinete eléctrico hombre colisión con bolardo (10° - 25 km/h).

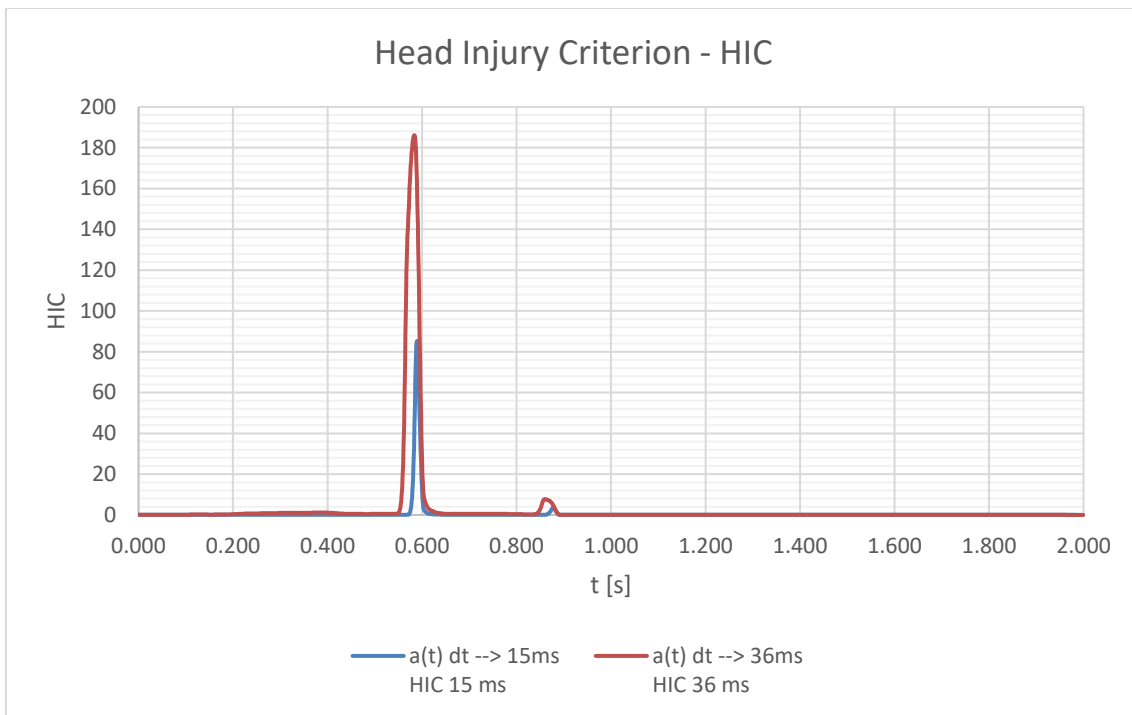


Figura 298. HIC vs tiempo. Usuario patinete eléctrico hombre colisión con bolardo (0° - 15 km/h).

Ahora bien, también fue objeto de estudio la variación del HIC en función de la velocidad del usuario y su relación con el ángulo de impacto. Evidenciando que el escenario más desfavorable, según se mencionó anteriormente, es el ángulo de 10° a una velocidad de 10 km/h por la configuración de la caída, que en este caso fue reconstruida por medio del

software. Se presenta la Figura 299 y Figura 300 representando el comportamiento para cada uno de los ángulos de impacto. Sin embargo, es preciso resaltar que en ningún caso se supera el umbral del HIC para los dos índices estudiados ($HIC_{15} \geq 700$ y/o $HIC_{36} \geq 1000$).

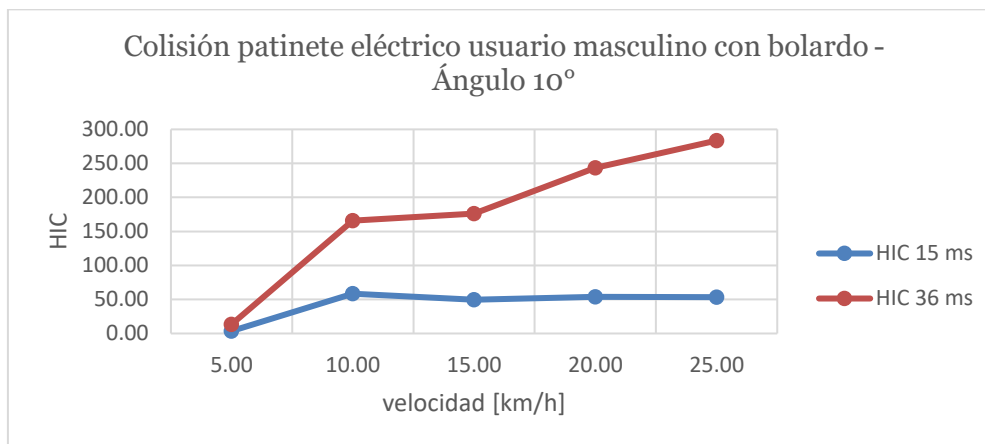


Figura 299. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. (patinete eléctrico usuario masculino – ángulo 10 °)

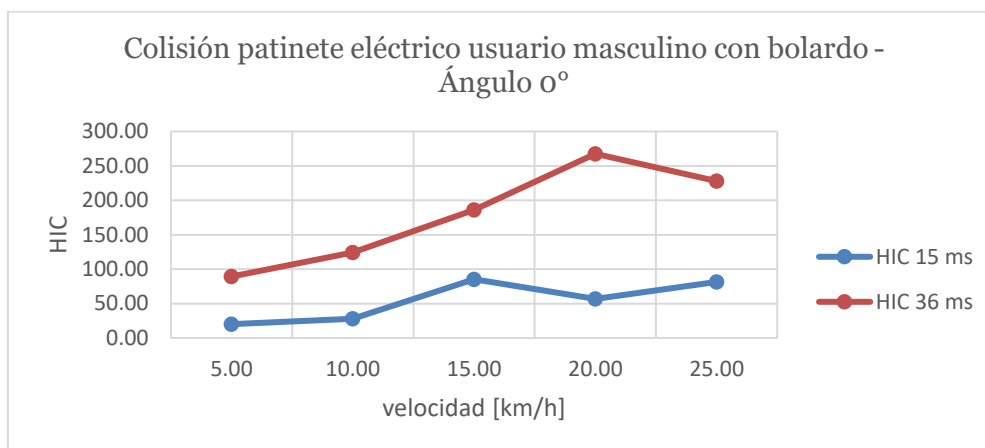


Figura 300. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. (patinete eléctrico usuario masculino – ángulo 0 °)

7.3.1.2 Usuaría femenina

Los resultados referentes al HIC para los intervalos de tiempo de 15 ms y 36 ms obtenidos se presentan en la Tabla 19 y Tabla 18.

Patinete usuaria femenina			
ángulo [°]	velocidad [km/h]	HIC 15 ms	HIC 36 ms
10.00	5.00	76.99	160.59
10.00	10.00	54.34	113.59
10.00	15.00	56.01	248.66
10.00	20.00	73.50	300.34
10.00	25.00	88.63	349.73
0.00	5.00	9.20	25.47
0.00	10.00	10.63	51.15
0.00	15.00	42.02	88.22
0.00	20.00	94.50	212.23
0.00	25.00	49.12	154.44

Tabla 19. Resultados HIC 15 y HIC 36. Patinete usuario masculino – bolardo

Según la Tabla 19, los mayores valores para el HIC para 15 ms como para 36 ms, se obtienen, en primer lugar, para un ángulo de colisión de 0° a una velocidad de 20km/h, en la cual, la usuaria de patinete eléctrico tiene muy baja probabilidad de sufrir una lesión grave en la cabeza al obtenerse un HIC 15 igual a 94.50 y en segundo lugar, para un ángulo de colisión de 10° a una velocidad de 25km/h, el HIC 36 igual a 349.73, representando de igual forma, una probabilidad muy baja de sufrir una lesión grave en la cabeza al impactar con el pavimento. Estos resultados se ilustran en la Figura 301 y Figura 302.

Es importante resaltar que un HIC de 1000 equivale a un 18% de probabilidad de una lesión grave en la cabeza, un 55% de probabilidad de una lesión seria y un 90% de probabilidad de una lesión moderada en un adulto promedio. Cómo varían esas probabilidades en la población en general es en gran medida desconocido. (Mackay, 2007)

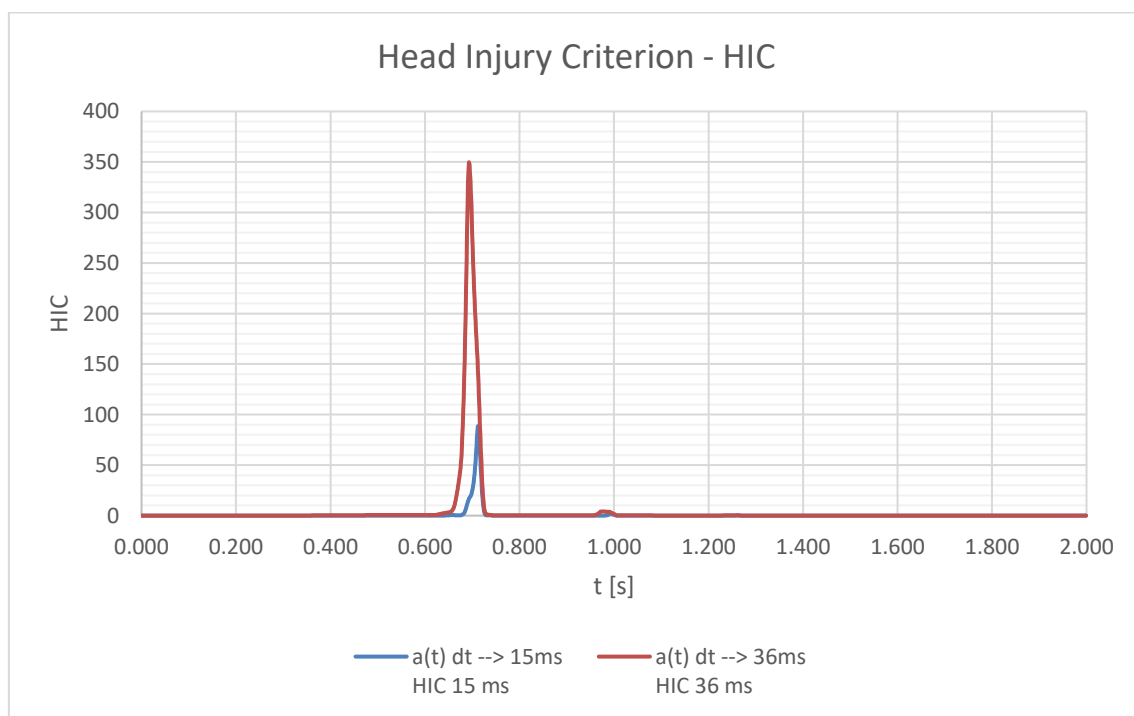


Figura 301. HIC vs tiempo. Usuario patinete eléctrico mujer colisión con bolardo (10° - 25 km/h).

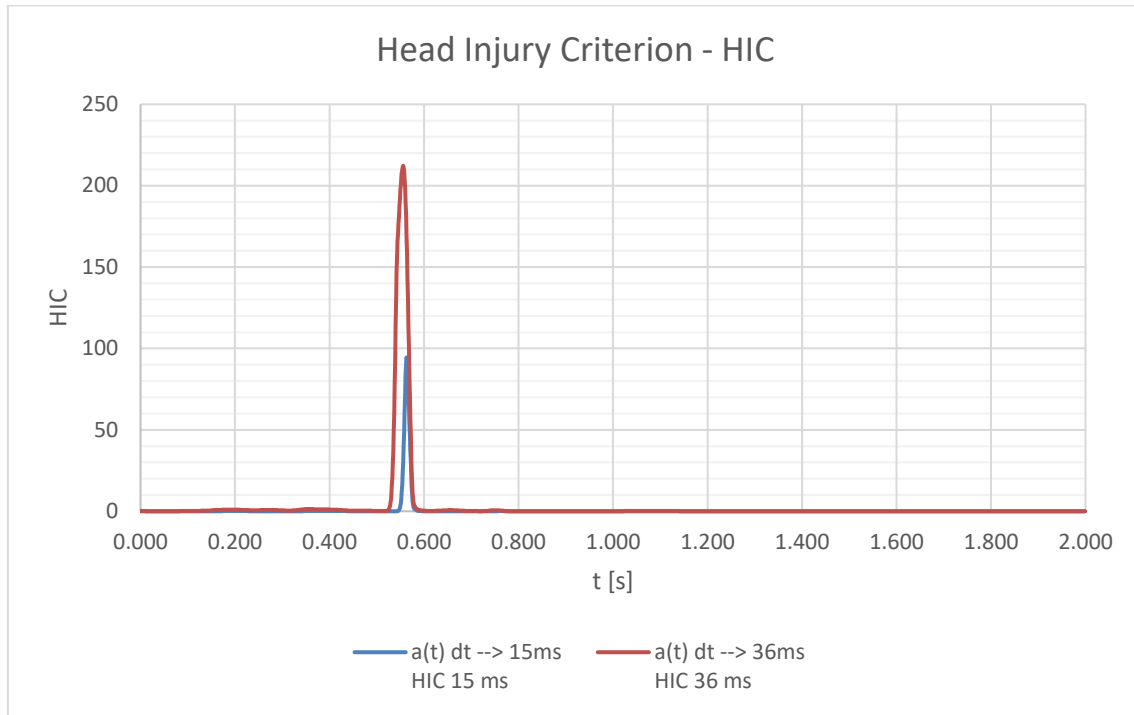


Figura 302. HIC vs tiempo. Usuario patinete eléctrico mujer colisión con bolardo (0° - 20 km/h).

Ahora bien, también fue objeto de estudio la variación del HIC en función de la velocidad del usuario y su relación con el ángulo de impacto. Evidenciando que el escenario más desfavorable, según se mencionó anteriormente, es el ángulo de 10° a una velocidad de 25 km/h por la configuración de la caída, que en este caso fue reconstruida por medio del software. Se presenta la Figura 303 y Figura 304 Figura 285 representando el comportamiento para cada uno de los ángulos de impacto. Sin embargo, es preciso resaltar que en ningún caso se supera el umbral del HIC para los dos índices estudiados ($HIC_{15} \geq 700$ y/o $HIC_{36} \geq 1000$).

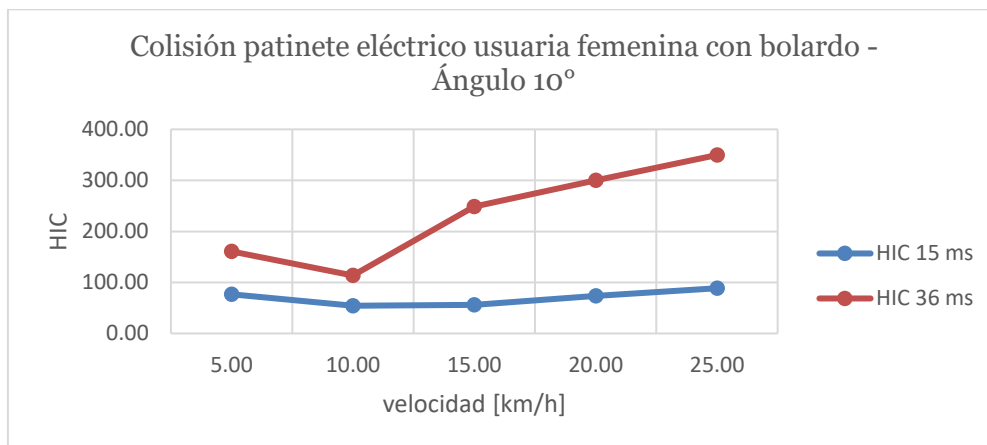


Figura 303. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. (patinete eléctrico usuaria femenina – ángulo 10°)

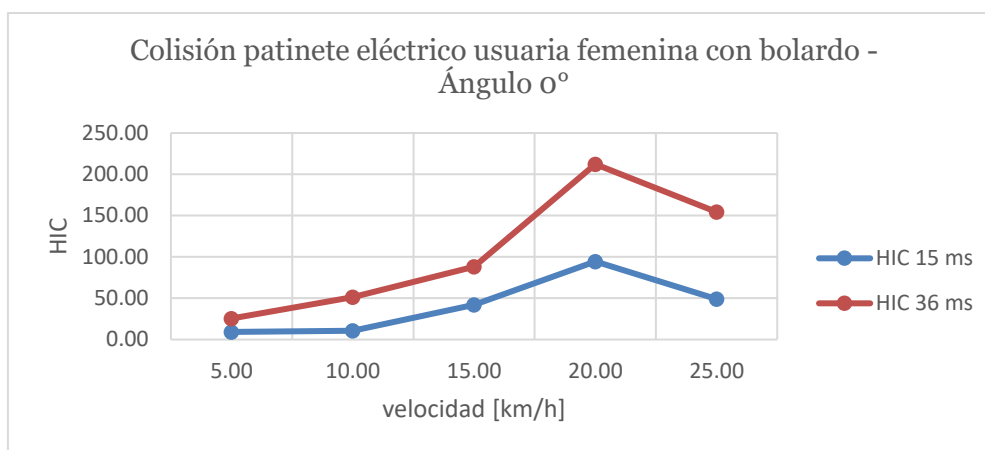


Figura 304. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. (patinete eléctrico)

De acuerdo con los resultados presentados de los valores de HIC tanto para hombres como para mujeres, es posible inferir para el caso de colisiones de usuarios en patinete eléctrico contra bolardo, son las usuarias mujeres quienes registran mayores valores para los ángulos de impacto analizados principalmente a velocidades de 20 km/h y 25 km/h.

7.3.2 Resultados distancia invadida en la calzada

Según los datos obtenidos referentes a la distancia alcanzada por la víctima posterior a la colisión, es posible inferir que, para el caso de las colisiones con bolardo para el ángulo de colisión de 10°, el comportamiento es de forma directamente proporcional a la velocidad. De otra parte, para la colisión a un ángulo de 0° con el bolardo, la distancia invadida en la calzada es un dato que se comporta de forma más aleatoria y, según los análisis, no representa una dependencia directa con la velocidad con que se da el impacto ni el ángulo. Los análisis anteriores se ilustran en la Figura 305 y Figura 306.

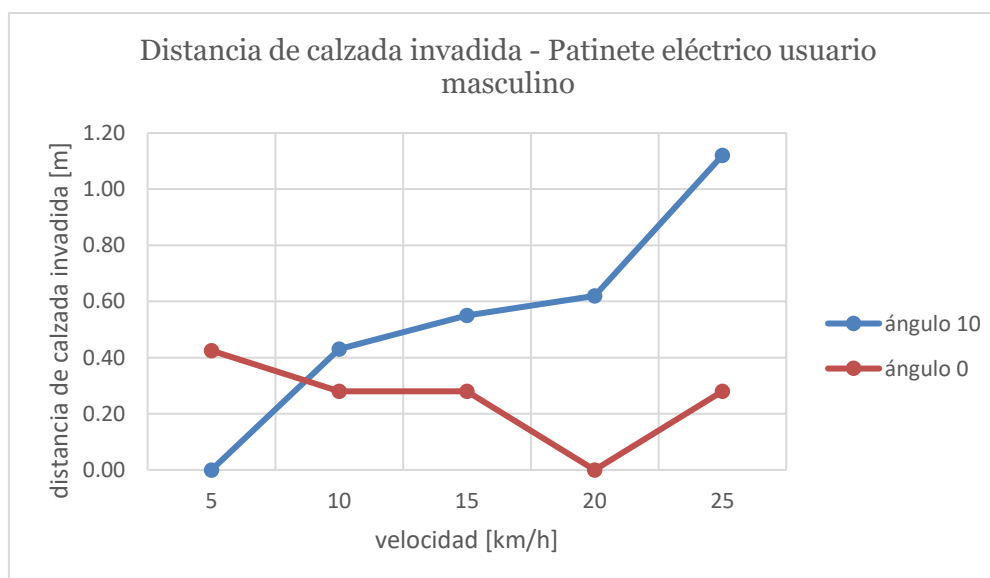


Figura 305. Evolución de la distancia invadida en la calzada en función de la velocidad (patinete eléctrico usuario masculino colisión bolardo)

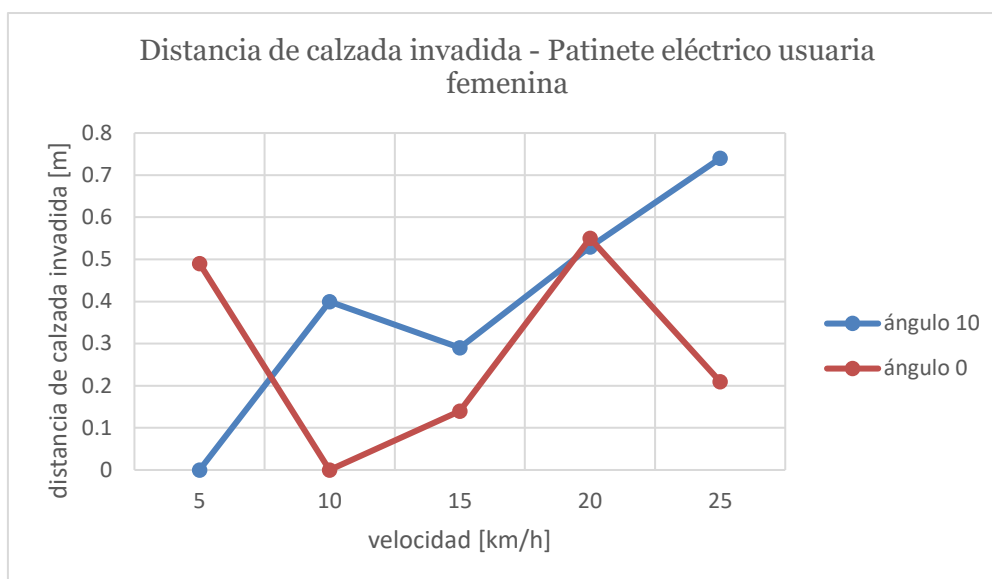


Figura 306. Evolución de la distancia invadida en la calzada en función de la velocidad (patinete eléctrico usuaria femenina colisión bolardo)

7.4 **Resultados colisión bicicleta – bolardo**

7.4.1 **Resultados Head Injury Criterion – HIC**

De acuerdo con las simulaciones realizadas, las cuales arrojan datos correspondientes a la aceleración de la cabeza para cada uno de los usuarios simulados, es posible calcular el HIC en intervalos de tiempo de 15 ms y de 36 ms, en los cuales según estableció la National Highway Traffic Safety Administration -NHTSA (Schmitt et al., 2004) son periodos en los cuales se indica que el 50% de los heridos sufrirá un nivel de trauma permanente (Anna Niska & Wenäll, 2019) obteniendo valores de HIC mayores o iguales 700 y 1000 respectivamente.

Se presentan en este numeral los resultados y gráficas que ilustran el comportamiento del indicador para los casos más desfavorables de acuerdo con los mostrados en el numeral 6.4 y teniendo en cuenta los mismos parámetros mencionados en el numeral 7.1.1 para el cálculo del HIC.

7.4.1.1 *Usuario masculino*

Los resultados referentes al HIC para los intervalos de tiempo de 15 ms y 36 ms obtenidos se presentan en la Tabla 20.

Bicicleta usuario masculino			
ángulo [°]	velocidad [km/h]	HIC 15 ms	HIC 36 ms
10.00	5.00	7.90	25.42
10.00	10.00	7.13	31.85
10.00	15.00	23.30	57.58
10.00	20.00	9.46	75.95
10.00	25.00	9.38	50.14
0.00	5.00	7.01	24.65
0.00	10.00	12.06	44.72
0.00	15.00	6.42	36.72
0.00	20.00	22.22	42.38
0.00	25.00	50.41	117.72

Tabla 20. Resultados HIC 15 y HIC 36. Bicicleta usuario masculino – bolardo

Según la Tabla 20, los mayores valores para el HIC para 15 ms como para 36 ms, se obtienen, en primer lugar, para un ángulo de colisión de 0° a una velocidad de 15km/h, en la cual, el ciclista tiene muy baja probabilidad de sufrir una lesión grave en la cabeza al obtenerse un HIC 15 igual a 50.41 y en segundo lugar, también para un ángulo de colisión de 0° a una velocidad de 25km/h, el HIC 36 igual a 117.72, representando de igual forma, una probabilidad muy baja de sufrir una lesión grave en la cabeza al impactar con el pavimento. Estos resultados se ilustran en la Figura 307.

Es importante resaltar que un HIC de 1000 equivale a un 18% de probabilidad de una lesión grave en la cabeza, un 55% de probabilidad de una lesión seria y un 90% de probabilidad de una lesión moderada en un adulto promedio. Cómo varían esas probabilidades en la población en general es en gran medida desconocido. (Mackay, 2007)

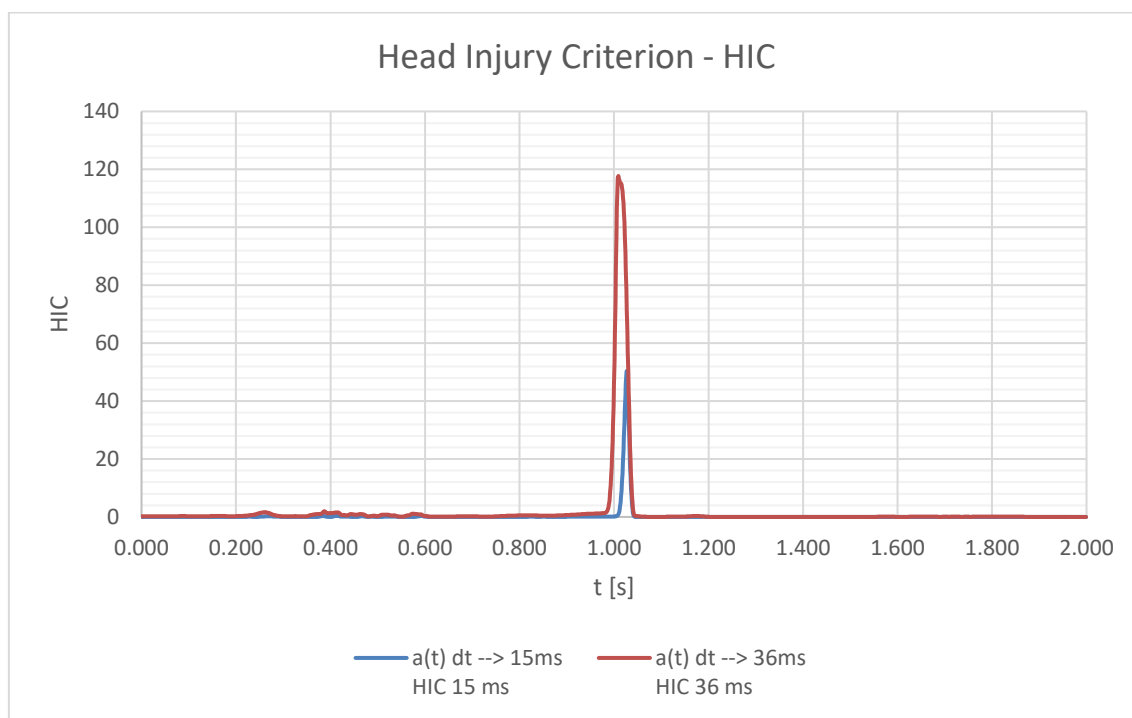


Figura 307. HIC vs tiempo. Ciclista masculino colisión con bolardo (0° - 25 km/h).

Ahora bien, también fue objeto de estudio la variación del HIC en función de la velocidad del usuario y su relación con el ángulo de impacto. Evidenciando que el escenario más desfavorable, según se mencionó anteriormente, es el ángulo de 0 ° a una velocidad de 25 km/h por la configuración de la caída, que en este caso fue reconstruida por medio del software. Se presenta la Figura 308 y Figura 309, representando el comportamiento para cada uno de los ángulos de impacto. Sin embargo, es preciso resaltar que en ningún caso se supera el umbral del HIC para los dos índices estudiados ($HIC_{15} \geq 700$ y/o $HIC_{36} \geq 1000$).

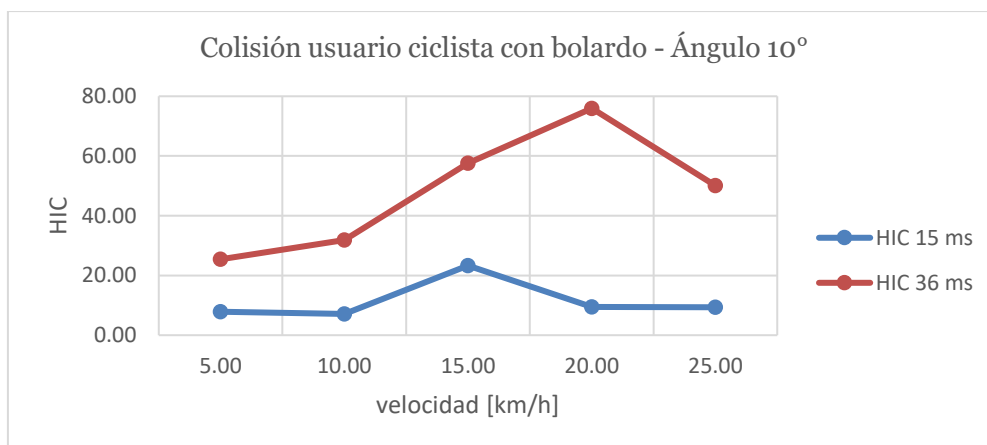


Figura 308. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. (bicicleta usuario masculino – ángulo 10 °)

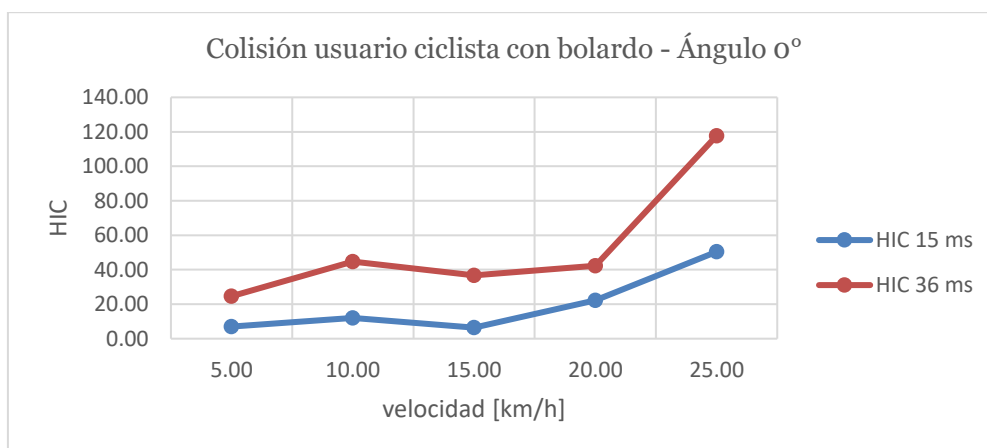


Figura 309. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. (bicicleta usuario masculino – ángulo 0 °)

7.4.1.2 Usuaría femenina

Los resultados referentes al HIC para los intervalos de tiempo de 15 ms y 36 ms obtenidos se presentan en la Tabla 21.

Bicicleta usuaria femenina			
ángulo [°]	velocidad [km/h]	HIC 15 ms	HIC 36 ms
10.00	5.00	16.94	130.78
10.00	10.00	2.43	16.27
10.00	15.00	0.68	3.40
10.00	20.00	4.25	12.85
10.00	25.00	0.64	4.29
0.00	5.00	2.07	8.71
0.00	10.00	6.97	20.03
0.00	15.00	2.55	11.02
0.00	20.00	5.98	42.48
0.00	25.00	11.80	19.81

Tabla 21. Resultados HIC 15 y HIC 36. Bicicleta usuaria femenina – bolardo

Según la Tabla 21, los mayores valores para el HIC para 15 ms como para 36 ms, se obtienen, en primer lugar, para un ángulo de colisión de 10° a una velocidad de 5km/h, en la cual, la ciclista tiene muy baja probabilidad de sufrir una lesión grave en la cabeza al obtenerse un HIC 15 igual a 16.94 y en segundo lugar, también para un ángulo de colisión de 10° a una velocidad de 5km/h, el HIC 36 igual a 130.78, representando de igual forma, una probabilidad muy baja de sufrir una lesión grave en la cabeza al impactar con el pavimento. Estos resultados se ilustran en la Figura 310. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Es importante resaltar que un HIC de 1000 equivale a un 18% de probabilidad de una lesión grave en la cabeza, un 55% de probabilidad de una lesión seria y un 90% de probabilidad de una lesión moderada en un adulto promedio. Cómo varían esas probabilidades en la población en general es en gran medida desconocido. (Mackay, 2007)

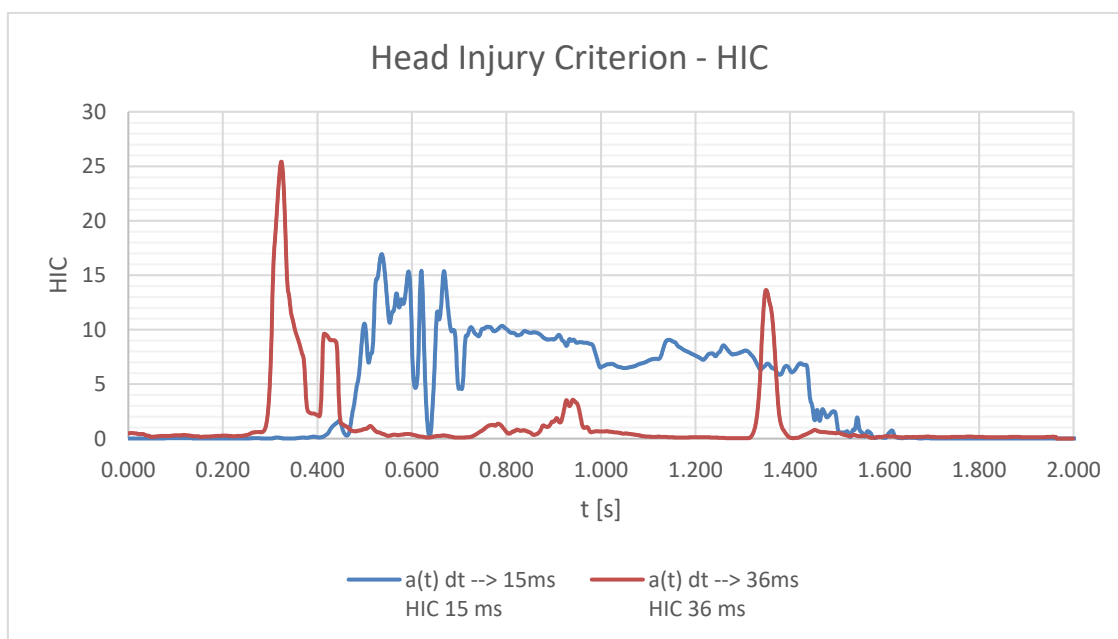


Figura 310. HIC vs tiempo. Ciclista femenina colisión con bolardo (0° - 5 km/h).

Ahora bien, también fue objeto de estudio la variación del HIC en función de la velocidad del usuario y su relación con el ángulo de impacto. Evidenciando que el escenario más desfavorable, según se mencionó anteriormente, es el ángulo de 10° a una velocidad de 25 km/h por la configuración de la caída, que en este caso fue reconstruida por medio del software. Se presenta la Figura 311 y Figura 312, representando el comportamiento para cada uno de los ángulos de impacto. Sin embargo, es preciso resaltar que en ningún caso se supera el umbral del HIC para los dos índices estudiados ($HIC_{15} \geq 700$ y/o $HIC_{36} \geq 10000$).

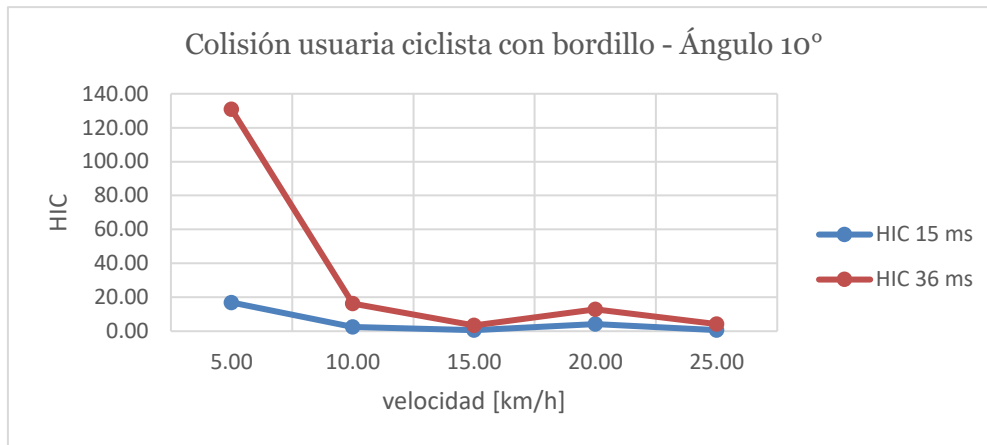


Figura 311. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. (ciclista femenina – ángulo 10°)

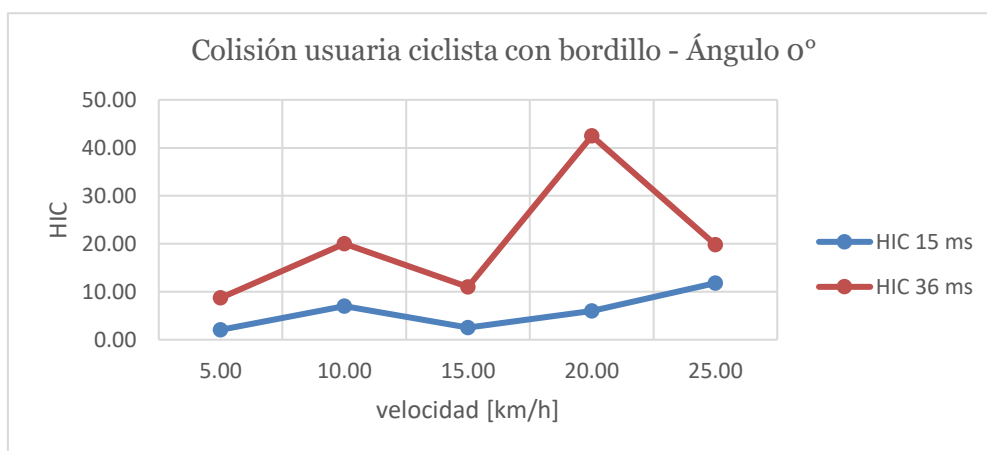


Figura 312. Evolución de los valores de HIC 15 e HIC 36 en función de la velocidad. Ciclista femenina – ángulo 0°)

De acuerdo con los resultados presentados de los valores de HIC tanto para hombres como para mujeres, es posible inferir para el caso de colisiones de usuarios en bicicleta contra bolardo, son las usuarias mujeres quienes registran mayores valores para los ángulos de impacto analizados principalmente a velocidades de 5 km/h, en este caso, particularmente por la incidencia que tiene las bajas velocidades con un obstáculo en altura, en la gravedad de la lesión.

7.4.2 Resultados distancia invadida en la calzada

Según los datos obtenidos referentes a la distancia alcanzada por la víctima posterior a la colisión, es posible inferir que, para el caso de las colisiones con bolardo para el ángulo de colisión de 10° , el comportamiento es de forma directamente proporcional a la velocidad. De otra parte, para la colisión a un ángulo de 0° con el bolardo, la distancia invadida en la calzada es un dato que se comporta de forma más aleatoria y, según los análisis, no representa una dependencia directa con la velocidad con que se da el impacto ni el ángulo. Los análisis anteriores se ilustran en la Figura 313 y Figura 314.

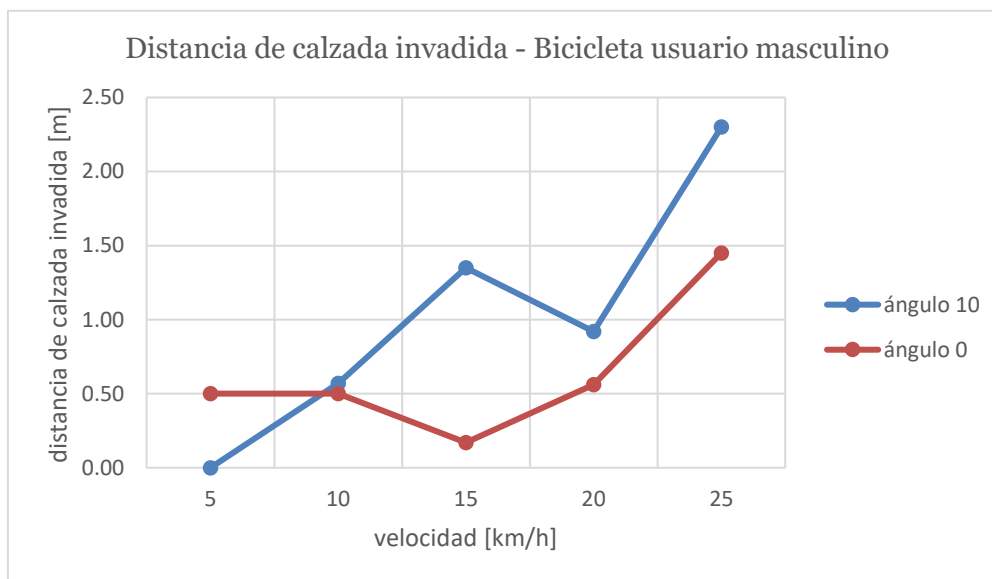


Figura 313. Evolución de la distancia invadida en la calzada en función de la velocidad (bicicleta usuario masculino colisión bolardo)

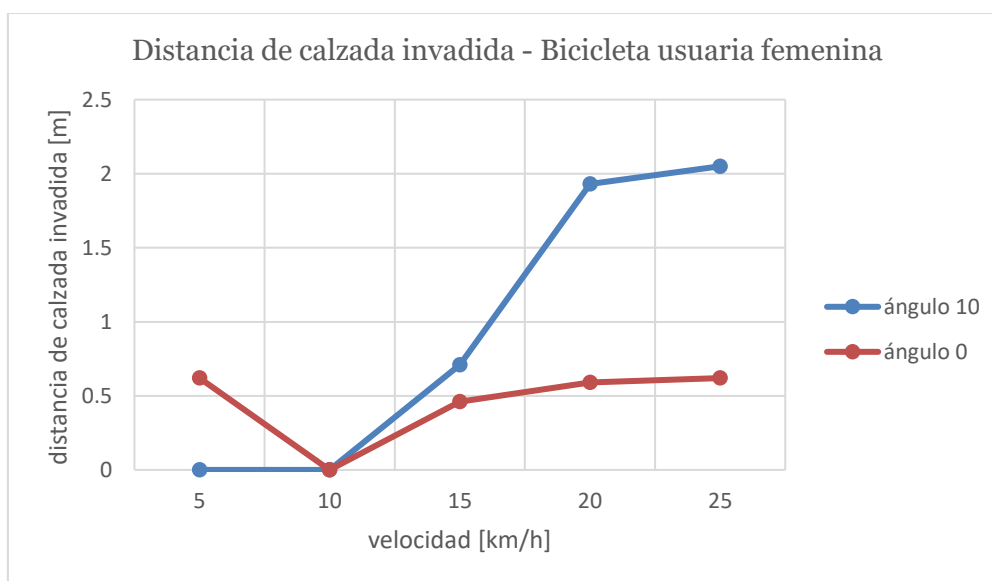


Figura 314. Evolución de la distancia invadida en la calzada en función de la velocidad (bicicleta usuaria femenina colisión bolardo)

8 RECOMENDACIONES DE DISEÑO

La propuesta de diseño de distancias de resguardo entre carril bici y calzada se basa en los resultados obtenidos en el presente trabajo, el cual se enfocó en obtener resultados numéricos para los escenarios más desfavorables en caso de una eventual colisión contra los elementos separadores más comunes en la ciudad de Valencia (bordillos y bolardos), estos son daño encefálico y/o riesgo de atropello al invadir la calzada por cuenta del accidente.

Actualmente, la Guía de Recomendaciones Para el Diseño de Infraestructura Ciclista dispone de las siguientes distancias (enmarcadas en color verde) según se muestra en la Tabla 22. Sin embargo, estas distancias mínimas no son un escenario totalmente seguro en caso de una eventual colisión contra los elementos separadores, de acuerdo con los resultados obtenidos.

CLAVE GRÁFICA*	TIPO DE OBSTÁCULO	DIMENSIÓN (m)	COMENTARIOS COMPLEMENTARIOS
1	Bordillo	≥ 0,15	A partir de 5 cm de resalto
2	Elementos puntuales (árboles, farolas, mobiliario urbano, etc.)	≥ 0,30	
3	Elementos continuos (valladas, barandillas, setos, muros, etc.)	≥ 0,40	
CLAVE GRÁFICA*	RESGUARDO RESPECTO A LAS BANDAS DE SERVICIO	DIMENSIÓN (m)	COMENTARIOS COMPLEMENTARIOS
4	Bandas de servicio entre vía ciclista y calzada con estacionamiento en línea	≥ 0,90	
5	Bandas de servicio entre vía ciclista y calzada con estacionamiento en batería	≥ 1,40	
6	Bandas de servicio entre vía ciclista y acera con estacionamiento en línea (**)	≥ 0,50	
7	Bandas de servicio entre vía ciclista y acera con estacionamiento en batería (**)	≥ 0,50	Se recomienda invertir el sentido del aparcamiento
RESGUARDO RESPECTO A LOS ELEMENTOS DE BALIZAMIENTO Y SEPARACIÓN		DIMENSIÓN (m)	COMENTARIOS COMPLEMENTARIOS
Elementos h ≤ 15 cm		≥ 0,10	
Elementos puntuales h > 15 cm		≥ 0,30	Bolardos, balizas flexibles, etc.
Elementos continuos h > 15 cm		≥ 0,40	Barandillas, barreras, New Jersey, etc.

Tabla 22. Dimensiones de resguardo de la infraestructura ciclista. (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2023)

Los registros de distancias invadidas en la calzada en las simulaciones realizadas indican que, es recomendable que en el diseño de infraestructura ciclista la distancia del resguardo entre el carril bici y la calzada sea como mínimo de 0.65 m. Este valor se obtiene teniendo en cuenta que, la mayor distancia invadida para los casos de colisiones con bordillo es por parte de la ciclista con un ángulo de trayectoria de 10° a 20 km/h, siendo este uno de los escenarios más comunes, se obtuvo una distancia invadida de 1.42 m.

El detalle del análisis se basa en el escenario si un vehículo motorizado esquiva un obstáculo sin invadir el carril contiguo, la distancia libre es de 1m (teniendo en cuenta carriles en zona urbana de 3m de ancho y vehículos motor de 2m de ancho), en este orden de ideas, según el dato obtenido (1.42 m) por medio de las simulaciones, como mínimo la distancia de resguardo debería ser de 0.42 m ≈ 0.5 m. Ahora, agregando la distancia mínima de 0.15 m correspondiente al resguardo entre el bordillo y la calzada, según los casos analizados, se tendría como mínimo 0.65 m para la zona entre el bordillo y la calzada.

De otra parte, realizando el mismo análisis para las colisiones con bolardo en el escenario mencionado (ángulo de trayectoria de 10° a 20 km/h) por parte de la ciclista se obtuvo una distancia invadida en la calzada de 1.93 m. Indicando que el resguardo debería ser de 0.93 m ≈ 0.95 m, agregando la distancia mínima de 0.15 m se tendría como resguardo entre el carril bici y la calzada según las simulaciones de 1.1 m ≈ 1 m. Estos casos se ilustran en la Figura 315 y Figura 316.

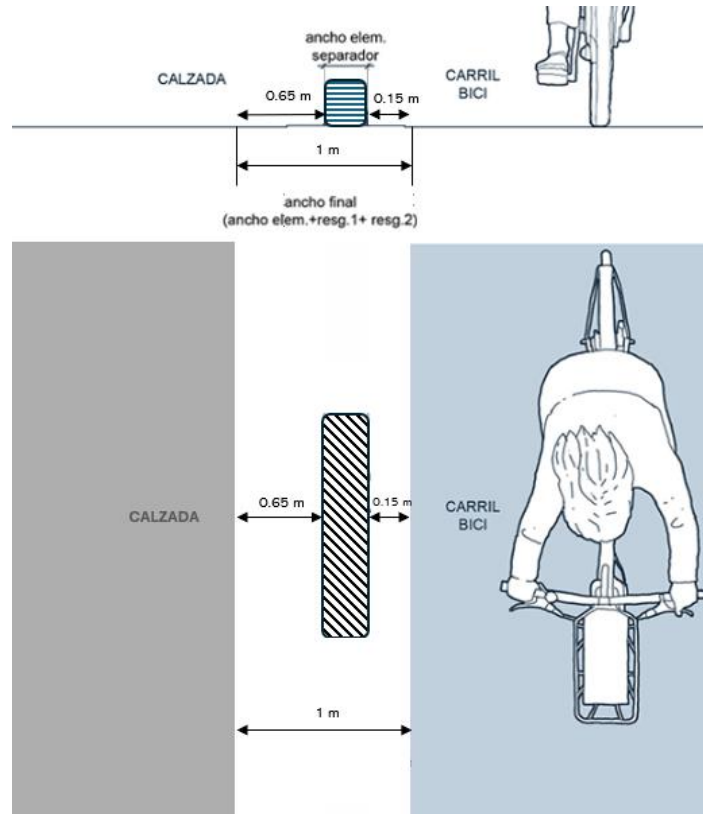


Figura 315. Propuesta de diseño distancias mínimas de resguardo carril bici/calzada caso bordillo
Fuente: Elaboración propia. (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2023)

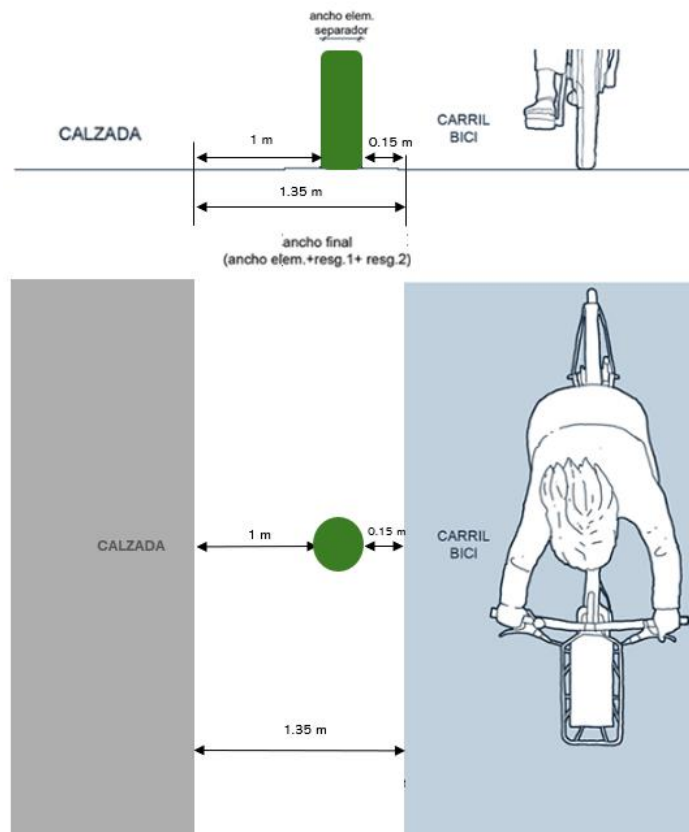


Figura 316. Propuesta de diseño distancias mínimas de resguardo carril bici/calzada caso bolardo
Fuente: Elaboración propia. (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2023)

Contrastando los escenarios mostrados en la Figura 315 y Figura 316 el caso para el elemento separador bolardo demandaría mayor distancia de seguridad. Sin embargo, este tipo de elemento no sólo tiene la función de segregar la infraestructura exclusiva para usuarios de micromovilidad sino también señalar zonas de mayor atención, como vados y semáforos en los que los usuarios suelen disminuir la velocidad. Además, los bolardos analizados no suelen instalarse de forma continua en la infraestructura como es el caso de los bordillos.

De otra parte, hay casos en los cuales se obtuvo una distancia de calzada invadida mayor a una velocidad de 25 km/h, frente a lo cual es recomendable que las autoridades locales restrinjan la velocidad de los vehículos de micromovilidad a 20km/h.

9 CONCLUSIONES

- Según los resultados obtenidos para los casos analizados correspondientes a colisiones de usuarios de patinete eléctrico y ciclistas contra bordillos y/o bolardos, en general, el Head Injury Criterion – HIC es más desfavorable para las mujeres, esto puede relacionarse con diferencias anatómicas y fisiológicas, toda vez que las mujeres tienden a tener una menor masa corporal y densidad ósea en comparación con los hombres, lo que puede resultar en una mayor aceleración de la cabeza durante un impacto.

Así mismo, los músculos del cuello, que son cruciales para la absorción de impactos y la estabilidad de la cabeza, tienden a ser menos desarrollados en mujeres en comparación con hombres, lo que puede aumentar el riesgo de movimientos bruscos de la cabeza durante un impacto. (Ambrosio, 2001)

- Con relación al contraste de los resultados del Head Injury Criterion – HIC entre elementos separadores, las simulaciones indican que, en un eventual impacto contra un elemento separador, son los tipo bordillo los que generarían mayor probabilidad de afectación a nivel encefálico a los usuarios de patinete eléctrico y a las ciclistas (los ciclistas en este caso, son una excepción).

- En general, según las simulaciones y análisis realizados, en todos los casos los valores del Head Injury Criterion – HIC son mayores para los usuarios de patinete eléctrico, lo cual indica que tendrían una mayor probabilidad de daño encefálico al colisionar con alguno de los elementos separadores objeto del presente estudio (bordillo y/o bolardo). Esto en general, gira entorno a factores como la estabilidad y el centro de gravedad, ya que las bicicletas cuentan con una base más amplia, permitiendo mejor distribución del peso y mayor control del vehículo. La posición del conductor influye ya que los usuarios de patinetes eléctricos tienen una postura erguida lo que eleva su centro de gravedad haciéndolos más propensos de caídas hacia adelante o hacia atrás. Factores como la maniobrabilidad y velocidad, también son un factor influyente, ya que los patinetes eléctricos debido a su tamaño y diseño dificulta la evasión de obstáculos.

En general, estos factores se resumen a que la combinación de menor estabilidad, mayor altura del centro de gravedad, menos maniobrabilidad y diferentes patrones de impacto contribuye a que los usuarios de patinete eléctrico tengan mayores valores de HIC en comparación con los ciclistas al colisionar con los elementos separadores de un carril bici como bordillos y bolardos.

- La distancia invadida en la calzada es otro de los parámetros tenidos en cuenta para evaluar la gravedad de los accidentes simulados. Al respecto es preciso resaltar que, en todos los casos analizados las colisiones con bordillo generan una caída que abarca mayor distancia de calzada en comparación con las caídas en las colisiones contra bolardo.

En todos los casos estudiados, los usuarios ciclistas son los que resultan invadiendo una mayor distancia en la calzada en comparación con los usuarios de patinete eléctrico. Esto se debe principalmente a la mayor masa y momento lineal y la estructura de la bicicleta que puede llevar a una caída más prolongada. En contraste, los usuarios de patinetes eléctricos, con su menor masa, y diferente

dinámica de colisión, tienden a detenerse más rápidamente y a invadir menos distancia en la calzada.

- El Head Injury Criterion - HIC es mayor para el intervalo de 36 ms en comparación con el intervalo de 15 ms en los casos simulados, porque el cálculo del HIC toma en cuenta tanto la magnitud como la duración de la aceleración en la cabeza. Un intervalo más largo permite una mayor acumulación de energía y una mayor exposición a fuerzas potencialmente dañinas, resultando en un valor de HIC más alto.
- El caso de colisión de la ciclista contra bolardo, para un ángulo de 10° a 5 km/h, es un caso particular ya que a una baja velocidad se producen los valores más desfavorables en cuanto a afectación encefálica (HIC15 – HIC36), de acuerdo con los análisis y la configuración de la caída que fue reconstruida a través del software PC-Crash, es posible inferir que la baja velocidad es un factor determinante en el impacto en la cabeza al colisionar con un obstáculo en altura, como es un bolardo, ya que a velocidades más altas al deslizarse o rodar en el pavimento, el impacto se distribuye a lo largo del cuerpo.
- Según los resultados obtenidos, para algunos casos, es particular obtener valores de HIC menores para mayores velocidades de colisión, como es el caso de las colisiones simuladas para la usuaria ciclista contra bordillo, según los análisis esto se da porque de acuerdo con la dinámica de la caída, son otras partes del cuerpo las que reciben el impacto minorando las fuerzas de contacto en la cabeza.
- De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente trabajo, en ninguno de los casos simulados se supera el umbral establecido del HIC (HIC36 ms \geq 1000 y/o HIC 15ms \geq 700) para evidenciar que los usuarios de micromovilidad objeto de estudio (según las características y datos de entrada utilizados) tendrán probabilidades de sufrir daño encefálico a causa de la colisión con los elementos separadores (bordillos y bolardos) dispuestos en los carriles bici. Sin embargo, si se encontraron diferencias en cuanto al tipo de usuario (patinete eléctrico o ciclista) que es más propenso a sufrir este tipo de lesiones. Esto permite identificar que el principal riesgo en este tipo de caídas es la invasión a la calzada a causa de la colisión, lo cual representa un riesgo potencial de atropello por parte de vehículos motorizados, y en este sentido, es de vital importancia que el diseño de la infraestructura ciclista esté dispuesto para mitigar este tipo de siniestros.
- La herramienta utilizada para determinar la gravedad de los accidentes por medio del HIC y la distancia invadida en la calzada, es una herramienta que sigue las tres leyes fundamentales de la física, la ley de inercia, relación entre la fuerza y la aceleración y la ley de acción-reacción.
En la aplicación de estos modelos teóricos en el software se hace uso de prototipos inertes, representados por dummies sin capacidad de reacción y en función de esto, se desconoce cómo se alteraría la colisión. Sin embargo, se dice que, en este sentido, es este el escenario más desfavorable en caso de un eventual accidente. Así mismo, esto permite inferir que, la naturaleza de la colisión con los parámetros conocidos (ángulo de colisión, velocidad, fricción, entre otros) pueden catalogarse como constantes y el factor que puede cambiar el desarrollo del accidente es la reacción del usuario. En este orden de ideas, es indispensable

la educación y las campañas informativas en pro de generar conciencia entorno a la conducción responsable de estos medios de transporte (bicicleta y patinete eléctrico) es imprescindible por parte de las autoridades en materia, toda vez que un gran porcentaje de estos usuarios es comprendido por personas jóvenes.

- El software tiene oportunidades de mejora con la finalidad de simular escenarios de accidentes en el marco de la micromovilidad. Como por ejemplo, la modelación del comportamiento de ciertos materiales frente a las colisiones, un caso puntual según los resultados obtenidos en el presente trabajo, es el caso de simulación con bolardo, ya que su material es plástico y su peso tuvo que modificarse con respecto al tipo de colisiones ya que a una velocidad más baja estos elementos representan mayor obstáculo y a mayores velocidades estos elementos pueden deformarse, este tipo de comportamiento el software no los representa adecuadamente y en este sentido, este aspecto se tuvo en cuenta asignando mayor peso a menores velocidades y menor peso a mayores velocidades para asemejar la realidad.

- Solo una red de infraestructura ciclista que sea percibida como segura permitirá un aumento en el número de personas que elijan medios de transporte sostenibles, independientemente de su edad, género o capacidad física. (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2023)

10 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ambrosio, J. A. C. (2001). *Crashworthiness*. Springer-Verlag Wien GmbH.
- Anna Niska, & Wenäll, J. (2019). Simulated single-bicycle crashes in the VTI crash safety laboratory. *Traffic Injury Prevention*, 20, 68-73.
<https://doi.org/10.1080/15389588.2019.1685090>
- Benito Urban. (s. f.). *Benito Urban* [Comercial]. Benito Urban. Recuperado 27 de abril de 2024, de <https://www.benito.com/es/mobiliario-urbano/movilidad-sostenible/gota--VBA21.html>
- Dirección General de Tráfico - DGT. (2022a). *Las principales cifras de la siniestralidad vial España 2022*. Dirección General de Tráfico - DGT.
- Dirección General de Tráfico - DGT. (2022b, noviembre 30). *En bicicleta*. DGT.
<https://www.dgt.es/muevete-con-seguridad/viaja-seguro/en-bicicleta>
- Dirección General de Tráfico - DGT. (2024, enero 21). *VMP: nuevas reglas, nueva formación*. Dirección General de Tráfico - DGT.
<https://www.dgt.es/comunicacion/noticias/vmp-nuevas-reglas-nueva-formacion/>
- Eppinger, R., Sun, Bandak, F., Haffner, M., Khaewpong, N., Maltese, M., Kuppa, S., Nguyen, T., Takhounts, E., Tannous, R., Zhang, A., & Saul, R. (1999, noviembre). *Development of Improved Injury Criteria for the Assessment of Advanced Automotive Restraint Systems—II*. NHTSA.
https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.gov/files/rev_criteria.pdf
- EU Cycle - Interreg Europe. (2023). *Integrated Cycling Planning Guide*.
- Fundación MAPFRE/CESVIMAP. (2023). *Análisis de la siniestralidad de vehículos de movilidad personal 2023*.
- International Transport Forum. (2020). *Safe Micromobility*.
- Jasti Co., LTD. (s. f.). *Jasti Co., LTD*. [Comercial]. Jasti Co., LTD. Recuperado 6 de abril de 2024, de <https://www.jasti.co.jp/en/product/dummy.html>

-
- Kültür, Y. (2023). Using e-scooters: An easy way to get home or a nightmare? An orthopedic perspective on e-scooter accidents. *Turkish Journal of Trauma and Emergency Surgery*, 1158-1166. <https://doi.org/10.14744/tjtes.2023.35848>
- Mackay, M. (2007). *The increasing importance of the biomechanics of impact trauma*.
- Marrodán, M. D., Martínez, J. R., Villarino, A., Alférez, I., González, M., López, N., Sánchez, M., & Cabañas, M. D. (2013). *Utilidad de los datos antropométricos auto-declarados para la evaluación de la obesidad en la población española*. 7. <https://dx.doi.org/10.3305/nh.2013.28.3.6197>
- Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (2023). *Guía de recomendaciones para el diseño de infraestructura ciclista*.
- Naciones Unidas. (s. f.). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Objetivos de Desarrollo Sostenible. Recuperado 18 de diciembre de 2024, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- Ohlin, M., Algurén, B., & Lie, A. (2019). Analysis of bicycle crashes in Sweden involving injuries with high risk of health loss. *Traffic Injury Prevention*, 20(6), 613-618. <https://doi.org/10.1080/15389588.2019.1614567>
- Olesen, A. V., Madsen, T. K. O., Hels, T., Hosseinpour, M., & Lahrman, H. S. (2021). Single-bicycle crashes: An in-depth analysis of self-reported crashes and estimation of attributable hospital cost. *Accident Analysis & Prevention*, 161, 106353. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106353>
- Ordenanza tipo de movilidad para los municipios integrantes del área metropolitana de Valencia.
- PC Crash Software. (2024). *PC Crash—Operating and Technical Manual*.
- Pérez-Zuriaga, A. M., Dols, J., Nespereira, M., & García, A. (2023). *Evaluating safety risks for micromobility users in protected bike lanes based on vertical element selection*.
- Portland State University. (2014). *Lessons from the green lanes: Evaluating protected bike lanes in the U.S.* (p. 179).
-

Rablau, G. (2016). *Calculus in Crash Safety Tests: The Head Injury*

Criterion(HIC)Number.

Schmitt, K.-U., Niederer, P., & Walz, F. (2004). *Trauma Biomechanics*. Springer-Verlag.

Serway, R., & Jewett, J. (s. f.). *Physics for Scientists and Engineers* (9.^a ed.). Books/Cole.

Society of Automotive Engineers - SAE International. (s. f.). *Taxonomy & Classification of Powered Micromobility Vehicles*. SAE International. Recuperado 21 de diciembre de 2023, de

<https://www.sae.org/binaries/content/assets/cm/content/topics/micromobility/sae-j3194-summary---2019-11.pdf>

Universidad de Monterrey. (2019, diciembre 12). *Conoce la pirámide de la movilidad y su importancia*. <https://www.udem.edu.mx/es/institucional/noticia/conoce-la-piramide-de-la-movilidad-y-su-importancia>

U.S Department of Transportation - Federal Highway Administration. (2015). *Separated bike lane. Planning and design guide*.

Xiaomi. (s. f.). *Xiaomi Electric Scooter 3 Lite* [Comercial]. Xiaomi. Recuperado 2 de febrero de 2024, de <https://www.mi.com/es/product/xiaomi-electric-scooter-3-lite/specs>