

Autora

María

Anguita

García

Director

Tutor

Antonio

Jaramillo

Morilla

Utilización de NFU NEUMÁTICO FUERA DE USO en obras de geotecnia & rehabilitación



UNIVERSIDAD DE SEVILLA

DEPARTAMENTO DE ESTRUCTURAS DE LA EDIFICACIÓN E INGENIERÍA DEL TERRENO

Índice

RESUMEN	1
CONCEPTOS CLAVE	1
INTRODUCCIÓN.....	2
capítulo 1	5
EVOLUCIÓN EN EL EMPLEO DEL NFU: JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.1 PRODUCTOS Y USOS DERIVADOS DEL NFU	5
1.2 PUNTO DE PARTIDA Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	7
1.3 GRADO DE RELEVANCIA E INNOVACIÓN	8
1.4 OBJETIVOS.....	9
1.5 PLAN DE TRABAJO Y METODOLOGÍA	10
capítulo 2.....	12
MARCO TEÓRICO – REFERENCIAL.....	12
2.1 MARCO LEGISLATIVO Y NORMATIVO NACIONAL.....	12
2.1.1 Marco legislativo a nivel nacional.....	12
2.1.2 Modelo de gestión a nivel nacional	13
2.1.3 Normativa de aplicación para NFU a nivel nacional	13
2.2 MARCO LEGISLATIVO Y NORMATIVO INTERNACIONAL	14
2.2.1 Marco legislativo a nivel internacional	14
2.2.2 Normativa de aplicación para NFU a nivel internacional	14
capítulo 3.....	16
ESTADO DE LA CUESTIÓN	16
3.1 INVESTIGACIONES A NIVEL FRONTERIZO Y TRANSFRONTERIZO	16
3.2 EXPERIENCIAS DE APLICACIÓN EN BASE AL ESTUDIO DEL MATERIAL.....	17
3.3 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA	19
3.3.1 Fundamentos y legislación para combatir el cambio climático.....	19
3.3.2 Herramientas para la evaluación del ciclo de vida	21
capítulo 4.....	23
CONSIDERACIONES EN LA CARACTERIZACIÓN DEL NFU	23
4.1 MUESTRAS EMPLEADAS EN LA INVESTIGACIÓN	23
4.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CICLO DE VIDA DEL ÁRIDO CONVENCIONAL Y NFU.....	25
4.3 PROPIEDADES GEOMÉTRICAS, MECÁNICAS Y DURABILIDAD DEL NFU.....	27
4.3.1 Objetivos de la campaña de ensayos.....	27
4.3.2 Propiedades geométricas	28
4.3.2.1 <i>Granulometría</i>	28
4.3.3 Propiedades mecánicas	31
4.3.3.1 <i>Humedad inicial y absorción de agua</i>	31
4.3.3.2 <i>Peso específico y densidad aparente de las partículas</i>	32
4.3.3.3 <i>Densidad seca. Ensayo de compactación Próctor Normal y Modificado</i>	35

4.3.3.4 Permeabilidad	38
4.3.3.5 Parámetros de compresibilidad, hinchamiento y consolidación	40
4.3.3.6 Resistencia. Ensayos de corte directo.....	46
4.3.4 DURABILIDAD DEL NFU	50
4.3.4.1 Evaluación del riesgo de auto combustión	50
4.3.4.2 Lixiviados	51
capítulo 5.....	53
APLICACIONES GEOTECNICAS PROPUESTAS CON NFU	53
5.1 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS CONSIDERADOS	53
5.1.1 Análisis de sensibilidad de las muestras de NFU	55
5.2 APLICACIÓN 1: MURO DE CONTENCIÓN CON RELLENO DE NFU EN EL TRASDÓS	57
5.2.1 Consideraciones iniciales para el muro de contención	57
5.2.2 Esquema conceptual plan de etapas muro de contención.....	58
5.2.3 Características de los materiales para rellenos localizados.....	59
5.2.4 Caracterización e hipótesis de cálculo (CTE-DB-SE-C, v2019).....	60
5.2.4.1 Cálculo en muros de 2,50 m de alzado	62
5.2.4.2 Cálculo muro de 4,80 m de alzado	63
5.2.5 Caracterización e hipótesis de cálculo (Eurocódigo EC-7, 1997)	65
5.2.5.1 Cálculo muros de 2,50 m y 4,80 m de alzado según EC7-1, 1997.....	68
5.2.6 Cálculo numérico de muro de contención mediante PLAXIS 2D V8/ V20	71
5.2.6.1 Cálculo Estado Límite de Servicio en PLAXIS 2D V8 – V20	73
5.2.6.2 Cálculo Estado Límite Último en PLAXIS 2D V20.....	75
5.2.7 Comportamiento térmico muro de contención en L 4,80 m de alzado.....	76
5.2.8 Recuperación de la sección de la Muralla de Utrera, Sevilla	80
5.2.8.1 Introducción y antecedentes del recinto amurallado	80
5.2.8.2 Argumentación de las hipótesis planteadas.....	81
5.2.8.3 Condiciones de contorno y fases de cálculo	88
5.2.8.4 Resultados obtenidos para la Muralla de Utrera	90
5.2.8.5 Conclusiones actuaciones sobre la muralla de Utrera, Sevilla.	116
5.3 APLICACIÓN 2: ANÁLISIS COMPARATIVO DEL TERRAPLENADO DE UN VIAL	118
5.3.1 Consideraciones iniciales para el terraplenado de un vial.....	118
5.3.2 Esquema conceptual de etapas terraplenado de un vial.....	120
5.3.3 Características de los materiales para rellenos tipo terraplén (PG-3)	121
5.3.4 Caracterización e hipótesis de cálculo en PLAXIS 2D V8 – V20.....	123
5.3.4.1 Influencia de las fases constructivas en la ejecución del terraplén según sección R1	124
5.3.4.2 Sección R2 terraplén.....	131
5.3.4.3 Sección R3 terraplén.....	134
5.3.4.4 Sección R4 terraplén.....	137
5.3.4.5 Sección R5 terraplén.....	140

5.3.5 Comportamiento térmico del terraplén R5-S6	143
5.3.6 Análisis sección P.K. 0+040 Cerro 0, Cármenes del Mar, Almuñécar	147
5.3.6.1 Introducción y antecedentes de la urbanización	147
5.3.6.2 Aspectos geológicos locales	148
5.3.6.3 Argumentación de las hipótesis planteadas.....	148
5.3.6.4 Condiciones de contorno y fases de cálculo ladera Urbanización Cármenes del Mar	152
5.3.6.5 Presentación de resultados Urbanización Cármenes del Mar	154
5.3.6.6 Conclusiones sección PK 0+40 Cármenes del Mar, Almuñécar	158
5.4 APLICACIÓN 3: EXPLANADAS SOBRE NFU PARA EJECUCIÓN DE FIRMES	160
5.4.1 Consideraciones iniciales en la ejecución de firmes para pavimentos sobre NFU	160
5.4.2 Esquema conceptual explanadas sobre NFU para ejecución de firmes	161
5.4.3 Formación de explanadas según normativa nacional y autonómica.....	162
5.4.4 Caracterización e hipótesis de cálculo PLAXIS 2D V20 explanadas para firmes	164
5.4.4.1 Fases constructivas en la ejecución de la explanada para el firme	167
5.4.4.2 Sección R1; R2; R3; R4 y R5 sin explanada	167
5.4.4.3 Explanada E1-1.....	171
5.4.4.4 Explanada E1-2.....	173
5.4.4.5 Explanada E1-3.....	176
5.4.4.6 Explanada E2-1.....	178
5.4.4.7 Explanada E2-2.....	180
5.4.4.8 Explanada E2-3.....	183
5.4.5 Caracterización e hipótesis de cálculo en PLAXIS 2D V20 de explanadas para firmes sobre terraplenes modificados	185
5.4.5.1 Sección R3; R4 y R5 sin explanada.....	187
5.4.5.2 Explanada E1-1 terraplén con capas no horizontales.....	189
5.4.5.3 Explanada E1-2 terraplén capas no horizontales	191
5.4.5.4 Explanada E1-3 terraplén capas no horizontales	192
5.4.5.5 Explanada E2-1 terraplén capas no horizontales.....	194
5.4.5.6 Explanada E2-2 terraplén capas no horizontales	196
5.4.5.7 Explanada E2-3 terraplén capas no horizontales	197
capítulo 6.....	199
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	199
6.1 SITUACIÓN ACTUAL DEL GRANULADO DE NEUMÁTICO	199
6.2 APLICACIÓN 1: VIABILIDAD EN EL EMPLEO DE NFU EN RELLENOS LOCALIZADOS	200
6.2 APLICACIÓN 2: VIABILIDAD EN EL EMPLEO DE NFU PARA FORMACIÓN DE TERRAPLENES	204
6.3 APLICACIÓN 3: VIABILIDAD EN EL EMPLEO DE NFU COMO BASE DE EXPLANADAS PARA LA FORMACIÓN DE FIRMES PAVIMENTADOS.....	207
capítulo 7.....	216
CONCLUSIONES EN BASE A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS.....	216

7.1 CONCLUSIONES RESPECTO A LA CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL	216
7.2 CONCLUSIONES RESPECTO A LAS APLICACIONES PROPUESTAS	217
7.3 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	221

BIBLIOGRAFÍA	223
--------------------	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Consumo de áridos naturales informe ANEFA 2020	3
Figura 2. Destino final de NFU según Signus Ecovalor informe 2020.....	3
Figura 3. Aplicaciones NFU entre el 2007 y el 2020.....	6
Figura 4. Aprovechamiento del NFU en función de su dosificación.....	6
Figura 5. Muestras S1, S2, S3 y S4 de NFU aportadas por RMD y RENEAN-	24
Figura 6. CO ₂ equivalente normalizados generado en una infraestructura de áridos naturales	25
Figura 7. CO ₂ equivalente ponderado generado en una infraestructura de áridos naturales.....	26
Figura 8. Husos granulométricos de partida y consideraciones ASTM D6270-20.....	29
Figura 9. Tanto por ciento que pasa por cada tamiz y análisis Fuller ideal.	30
Figura 10. Proceso ensayo peso específico y densidad aparente de las partículas en el laboratorio, muestra S4, pesado muestra S2 y eliminación de burbujas muestra S4.....	33
Figura 11. Proceso ensayo densidad aparente del conjunto de las partículas en el laboratorio.	34
Figura 12. Ensayo de compactación Próctor normal según muestra S4.	36
Figura 13. Ensayo de compactación Próctor modificado según muestra S4.....	38
Figura 14. Ensayo de compresibilidad unidimensional según ISO 17892-5:2017	41
Figura 15. Presión de preconsolidación muestra S5 en edómetro 1.....	45
Figura 16. Proceso ensayo corte directo muestra S5.....	47
Figura 17. Carga tangencial vs. Desplazamiento horizontal en equipo de corte directo para distintos tamaños y carga vertical entre 98,1 a 294,3 kPa.....	48
Figura 18. Relación tensión-presión para la muestra S6 y humedad (w) del 25%	49
Figura 19. Relación tensión-presión para la muestra S6 y humedad (w) del 0%	49
Figura 20. Análisis de sensibilidad: Variación peso específico (kN/m ³).....	56
Figura 21. Análisis de sensibilidad: Variación cohesión (c') (kPa).....	56
Figura 22. Análisis de sensibilidad: Variación ángulo de rozamiento interno (Φ') (°)	56
Figura 23. Plan de análisis relleno localizado en trasdós de muro de contención	58
Figura 24. Hipótesis muro altura 2,80 m y base 1,70 m.....	62
Figura 25. Hipótesis muro altura 5,80 m y base 3,00 m.....	64
Figura 26. Hipótesis muro altura 2,80 m y 5,80 m y base 1,70 m y 3,00 m para EC7-1.....	68
Figura 27. Variación del F.S. al deslizamiento para los muros de contención según EC7-1 y CTE-DB-SE-C.....	70
Figura 28. Variación en el F.S. al vuelco para los muros de contención según EC7-1 y CTE-DB-SE-C	71
Figura 29. Hipótesis muro altura 5.80 m y base 3.00 m para PLAXIS 2D V8 Y V20.....	74
Figura 30. Factor de seguridad global de cada sección de muro en L según PLAXIS 2D V8 – V20	74
Figura 31. Comparativa del F.S. obtenido en PLAXIS según ELS y ELU para las secciones M3 y M6	75
Figura 32. Función de la temperatura para cálculo térmico del muro de contención en PLAXIS 2D V20	76
Figura 33. Deformación del muro debido al incremento de la temperatura exterior sección M4	77
Figura 34. Deformación del muro debido al incremento de la temperatura exterior sección M6	77
Figura 35. Deformación del muro debido al incremento de la temperatura exterior sección M7	78
Figura 36. Distribución de la temperatura en proceso de calentamiento sección M4	78
Figura 37. Distribución de la temperatura en proceso de calentamiento sección M6	79
Figura 38. Distribución de la temperatura en proceso de calentamiento sección M7	79
Figura 39. Temperaturas en punto A y B para las distintas secciones	80
Figura 40. Aproximación recinto amurallado de Utrera, Sevilla.....	81
Figura 41. Ubicación puntos A, B y C para análisis de deformación vertical en la muralla de Utrera	82
Figura 42. Tensiones verticales efectivas y tensiones horizontales efectivas iniciales según sección a 0,20 m del trasdós de la muralla de Utrera SEGÚN condiciones iniciales.....	83
Figura 43. Tensión efectiva vertical y horizontal en cálculo plástico para las condiciones iniciales.....	83

Figura 44. Hipótesis 1.1 y 1.2 con suelo adecuado como relleno localizado	84
Figura 45. Hipótesis 2.1 relleno de NFU de 0,50 m de ancho a 3,50 m y 6 m de profundidad sin explanada ...	85
Figura 46. Hipótesis 2.1 con NFU como relleno de 1 y 1,5 m de ancho a 6 m de profundidad sin explanada...	85
Figura 47. Hipótesis 2.2 relleno con NFU de 0,50 m de ancho a 3,50 y 6 m de profundidad sin explanada.....	86
Figura 48. Hipótesis 2.2 con NFU como relleno de 1 y 1,5 m de ancho a 6 m de profundidad con explanada .	86
Figura 49. Hipótesis 3.1 relleno con NFU de 0,50 m de ancho a 3,50 y 6 m de profundidad con geotextil.....	87
Figura 50. Hipótesis 3.1 relleno con NFU de 1 y 1,5 m de ancho a 6 m de profundidad con geotextil.....	87
Figura 51. Hipótesis 3.2 relleno con NFU (0,5-3,5 y 6 m) de profundidad con explanada y geotextil.....	88
Figura 52. Hipótesis 3.2 relleno con NFU de (1 y 1,5-6 m) con explanada y geotextil.....	88
Figura 53. Hipótesis 1.1 Desplazamientos muralla con relleno adecuado de 1m ancho en la fase 19	92
Figura 54. Hipótesis 1.2 Desplazamientos muralla con explanada sin NFU fase 17.....	93
Figura 55. Hipótesis 2.1 Desplazamientos muralla relleno con NFU (0,5-3m) en fase 19	95
Figura 56. Hipótesis 2.1 Desplazamientos muralla relleno con NFU (0,5-6m) en fase 19	96
Figura 57. Hipótesis 2.1 Desplazamientos muralla relleno con NFU (1-6m) en fase 19	97
Figura 58. Hipótesis 2.1 Desplazamientos muralla relleno con NFU (1,5-6 m) en fase 19	98
Figura 59. Hipótesis 2.2 Desplazamientos muralla relleno con NFU (0,5-3,5m) con explanada en fase 29.....	100
Figura 60. Hipótesis 2.2 Desplazamientos muralla relleno con NFU (0,5-6m) con explanada en fase 29.....	101
Figura 61. Hipótesis 2.2 Desplazamientos muralla relleno con NFU (1-6m) con explanada en fase 29.....	103
Figura 62. Hipótesis 2.2 Desplazamientos muralla relleno con NFU (1,5-6m) con explanada en fase 29.....	104
Figura 63. Hipótesis 3.1 con entibación (0,50-3,50 m) relleno con NFU con geotextil	105
Figura 64. Hipótesis 3.1 con entibación (1-6 m) relleno con NFU con geotextil en fase 15	106
Figura 65. Hipótesis 3.2 con entibación (1,5-6 m) relleno con NFU con geotextil y explanada en fase 27.	106
Figura 66. Hipótesis 3.1 Desplazamientos muralla relleno con NFU (0,50-3,5 m) con geotextil en fase 19	107
Figura 67. Hipótesis 3.1 Desplazamientos muralla relleno con NFU (0,5-6 m) con geotextil en fase 19	108
Figura 68. Hipótesis 3.1 Desplazamientos muralla relleno con NFU (1-6 m) con geotextil en fase 19	109
Figura 69. Hipótesis 3.1 Desplazamientos muralla relleno con NFU (1,5-6 m) con geotextil en fase 19	110
Figura 70. Hipótesis 3.2 Desplazamientos muralla relleno con NFU (0,5-3,5 m) con geotextil y explanada....	111
Figura 71. Hipótesis 3.2 Desplazamientos muralla relleno con NFU (0,5-6 m) con geotextil y explanada.....	112
Figura 72. Hipótesis 3.2 Desplazamientos muralla relleno con NFU (1-6m) con geotextil y explanada.....	114
Figura 73. Hipótesis 3.2 Desplazamientos muralla relleno con NFU (1,5-6m) con geotextil y explanada.....	115
Figura 74. Empuje horizontal a corto plazo en función del ancho del relleno de NFU en el trasdós.....	117
Figura 75. Empuje horizontal a largo plazo en función del ancho del relleno de NFU en el trasdós	117
Figura 76. Esquema conceptual de etapas para el terraplenado de un vial.....	119
Figura 77. Hipótesis de cálculo secciones terraplenado de un vial	123
Figura 78. Ubicación puntos A y B análisis del terraplenado para un vial	123
Figura 79. Diferencias en la consolidación del terraplén ejecutado en 5 capas y en 20 capas (R1).....	125
Figura 80. Diferencias en la deformación vertical en el Punto B en base a la altura del terraplén R1	127
Figura 81. Deformación vertical en el terraplén R1 en 5 y 20 capas, a distintas alturas	127
Figura 82. Deformación vertical en el terraplén R2 en 5 y 20 capas, a distintas alturas	127
Figura 83 . Consolidación del terraplén en la sección R1 según modelo en 5 y 20 capas	128
Figura 84. Desplazamiento incremental R1 (5 capas) fase 11 considerando S.C. (6,13 kN/m ²)	129
Figura 85. Desplazamiento incremental R1 (20 capas) fase 40.....	129
Figura 86 . Diferencias en la consolidación del terraplén ejecutado R2 con la muestra S5 y S6.....	131
Figura 87. Consolidación del terraplén en la sección R2 según la muestra S5 y S6	132
Figura 88. Desplazamiento incremental sección R2 según muestra S5 - Fase 41.....	133
Figura 89. Diferencias en la consolidación del terraplén ejecutado R3 con la muestra S5 y S6.....	134
Figura 90. Consolidación del terraplén en la sección R3 según la muestra S5 y S6	135
Figura 91. Desplazamiento incremental R3-S5 - Fase 41	135

Figura 92. Diferencias en la consolidación del terraplén R4 con la muestra S5 y S6.....	137
Figura 93. Consolidación del terraplén en la sección R4 según la muestra S5 y S6	138
Figura 94. Desplazamiento incremental sección R4 muestra S6 - Fase 39	138
Figura 95. Diferencias en la consolidación del terraplén R5 con la muestra S5 y S6.....	140
Figura 96. Consolidación del terraplén en la sección R5 según la muestra S5 y S6.	141
Figura 97. Desplazamiento incremental sección R5-S6 - Fase 41	142
Figura 98. Distribución de la temperatura inicial en los sustratos de apoyo	144
Figura 99. Distribución de la temperatura ambiente en el conjunto de la sección del terraplén R5	144
Figura 100. Oscilación térmica dependiente del tiempo en el conjunto de la sección del terraplén R5	145
Figura 101. Distribución de la temperatura en el punto bajo la losa y en el centro del terraplén.....	145
Figura 102. Aproximación a la Urbanización Cármenes del Mar, Almuñecar	146
Figura 103. Perfil geológico correspondiente a la sección PK 0+040	147
Figura 104. Perfil geológico simplificado a efectos de modelados de la sección PK 0+400	147
Figura 105. Desplazamientos incrementales en la fase inicial del terraplén.....	148
Figura 106. Perfil de actuaciones para las hipótesis de refuerzo en la sección PK 0+040.....	149
Figura 107. Mallado hipótesis 1 sistema de refuerzo mediante 7 filas de pilotes in situ en PK 0+040	149
Figura 108. Mallado hipótesis 2: Sistema de refuerzo mediante 5 filas de pilotes en la sección PK 0+040.....	150
Figura 109. Mallado hipótesis 3: sistema de mejora del terreno en la sección PK 0+40	150
Figura 110. Mallado hipótesis 3: sustitución material relleno en viales por NFU en la sección PK 0+400	150
Figura 111. Mallado hipótesis 4: Sistema de mejora del terreno en la sección PK 0+0400	151
Figura 112. Desplazamientos incrementales (m) en la fase 10 según hipótesis 1	154
Figura 113. Desplazamientos incrementales (m) en la fase 8 según hipótesis 2	155
Figura 114. Desplazamientos incrementales (m) en la fase 14 de la hipótesis 3	156
Figura 115. Desplazamientos incrementales (m) en la fase 9 según hipótesis 4	157
Figura 116. Desplazamientos incrementales (m) en la fase 14 según hipótesis 4	157
Figura 117. Esquema conceptual de etapas para el análisis de asientos en explanadas sobre NFU.....	160
Figura 118. Tipos de suelo de la explanación o de la obra de tierra subyacente FOM/3460/2003	162
Figura 119. Hipótesis de cálculo explanadas para la colocación de un firme estratos horizontales	164
Figura 120. Puntos de interés para el análisis de asientos de explanadas para colocación de firmes	165
Figura 121. Desplazamientos totales verticales U_y (m) en la fase 10 de la sección R2	168
Figura 122. Desplazamientos incrementales totales verticales ΔU_y (m) de la sección R2	168
Figura 123. Def. vertical y asiento diferencial en función de la sobrecarga sin explanada	169
Figura 124. E1-1 def. vertical y asiento diferencial en función de la sobrecarga	171
Figura 125. E1-2 def. vertical y asiento diferencial en función de la sobrecarga	174
Figura 126. E1-3 def. vertical y asiento diferencial en función de la sobrecarga	176
Figura 127. Desplazamientos incrementales totales (m) sección R4 explanada E2-1 S.C. 23 kN/m ²	177
Figura 128. E2-1 def. vertical y asiento diferencial en función de la sobrecarga	178
Figura 129. E2-2 def. vertical y asiento diferencial en función de la sobrecarga	180
Figura 130. E2-3 def. vertical y asiento diferencial en función de la sobrecarga	183
Figura 131. Hipótesis de cálculo explanadas para la colocación de un firme estratos no horizontales	184
Figura 132. Sección R3 sin explanada (SE) con capas del terraplén no horizontales	185
Figura 133. Sección R4 sin explanada (SE) con capas del terraplén no horizontales	185
Figura 134. Sección R5 sin explanada (SE) con capas del terraplén no horizontales	185
Figura 135. Desplazamientos totales verticales U_y aplicación sobrecarga mitad derecha (SD) sección R3.....	187
Figura 136. Desplazamientos totales verticales U_y aplicación sobrecarga completa (SC) sección R3	187
Figura 137. Def. vertical sin explanada y asiento diferencial con S.D. y S.C. sin capas horizontales	188
Figura 138. Def. vertical E1-1 y asiento diferencial con S.D. y S.C. en terraplén sin capas horizontales.....	189
Figura 139. Def. vertical E1-2 y asiento diferencial con S.D. y S.C. en terraplén sin capas horizontales.....	191

Figura 140. Def. vertical E1-3 y asiento diferencial con S.D. y S.C. en terraplén sin capas horizontales.....	192
Figura 141. Desplazamientos R4 explanada E2-1 S.C. 23 kN/m ² terraplén con capas no horizontales.....	193
Figura 142. Def. vertical E2-1 y asiento diferencial con S.D. y S.C. en terraplén sin capas horizontales.....	194
Figura 143. Def. vertical E2-2 y asiento diferencial con S.D. y S.C. en terraplén sin capas horizontales.....	195
Figura 144. Def. vertical E2-3 y asiento diferencial con S.D. y S.C. en terraplén sin capas horizontales.....	197
Figura 145. Evolución de los precios según base de datos ITEC hormigón y acero.....	201
Figura 146. Incremento en el empleo de H.A. para rellenos según rellenos localizados.....	201
Figura 147. Costes según la sección para muro de contención en L.....	202
Figura 148. kG de CO2 emitidos a la atmósfera en base a la sección del muro de contención.....	202
Figura 149. Criterio 1 para cada una de las secciones de terraplén en función de la muestra de NFU.....	203
Figura 150. Evaluación del criterio 2 para cada una de las secciones tipo terraplén.....	204
Figura 151. Evaluación del criterio 3 para cada una de las secciones tipo terraplén.....	205
Figura 152. Evolución de los precios según base de datos ITEC tierra adecuada y granulado de NFU.....	206
Figura 153. Desp. vertical según explanada y S.D. y S.C. en el terraplén de capas horizontales.....	207
Figura 154. Criterio 1 según explanada en función de la sobrecarga con capas horizontales del terraplén....	208
Figura 155. Criterio 2 según explanada en función de la sobrecarga con capas horizontales del terraplén....	209
Figura 156. Criterio 3 según explanada en función de la sobrecarga de terraplén con capas horizontales. ...	210
Figura 157. Despl. vertical según explanada y sobrecarga en el terraplén con capas no horizontales.....	211
Figura 158. Criterio 1 según explanada en función de la sobrecarga capas no horizontales del terraplén.....	211
Figura 159. Criterio 2 según explanada y la sobrecarga con capas no horizontales del terraplén.....	212
Figura 160. Criterio 3 según explanada y sobrecarga en el terraplén con capas no horizontales.	213
Figura 161. Dif. entre asientos diferenciales en función de la sobrecarga y geometría del terraplén.....	213

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 . Componentes principales de los neumáticos.....	19
Tabla 2. Material granular de NFU aportado por las plantas de tratamiento.....	23
Tabla 3. Energía empleada para el tratamiento del NFU.....	26
Tabla 4. Granulometría de las muestras analizadas por tamaño y designación.....	29
Tabla 5. Resultados de caracterización geométrica de las muestras de ensayo.....	30
Tabla 6. Estado del arte sobre humedad inicial y absorción.....	31
Tabla 7. Capacidad de absorción según norma UNE EN 1907-6 Anexo C para muestras sin mezclar.....	32
Tabla 8. Estado del arte peso específico partículas de NFU y Arlita.....	32
Tabla 9 .Resultado densidad partículas ($\rho\alpha$); secadas en estufa (prd); saturadas y secadas superficialmente (ρ_{ssd}); absorción de agua (WA24) de los granulados de NFU's.....	33
Tabla 10. Densidad aparente según UNE EN 1097-3 y UNE EN 1789-2.....	34
Tabla 11. Estado del arte densidad seca de las partículas NFU.....	35
Tabla 12. Resultados ensayos Próctor Estándar muestra S2 secado en horno a 110°.....	35
Tabla 13. Resultados ensayos Próctor Estándar muestra S3 secado en horno a 110°.....	35
Tabla 14. Resultados ensayos Próctor Estándar muestra S4 secado en horno a 110°.....	36
Tabla 15. Resultados ensayos Próctor Estándar muestra S2 secado en horno a 60°.....	36
Tabla 16. Resultados ensayos Próctor Estándar muestra S5 secado en horno a 110°.....	37
Tabla 17. Resultados ensayos Próctor Estándar muestra S6 secado en horno a 110°.....	37
Tabla 18. Resultados ensayos Próctor Modificado muestra S5 secado en horno a 110°.....	37
Tabla 19. Estado del arte permeabilidad de las partículas NFU.....	38
Tabla 20. Valores de permeabilidad para distintas granulometrías de NFU.....	39
Tabla 21. Resultados ensayo edométrico con probetas sin compactar.....	41
Tabla 22. Resultados ensayo edométrico con probetas sin compactar.....	42
Tabla 23. Incremento de la deformación unitaria en función del tiempo.....	42
Tabla 24. Coeficiente de consolidación muestra S5 según edómetro 1.....	43
Tabla 25. Coeficiente de consolidación secundaria muestra S5 según edómetro 1.....	44
Tabla 26. Ecuaciones presión de preconsolidación muestra S5.....	46
Tabla 27. Cohesión y ángulo de fricción de las muestras de granulado de NFU.....	48
Tabla 28. Repercusión por la presencia de agua en la cohesión del NFU.....	49
Tabla 29. Valores característicos Ensayo Próctor del granulado de NFU.....	53
Tabla 30. Valores característicos Ensayo de peso específico saturado del granulado de NFU.....	53
Tabla 31. Valores característicos del ensayo de corte directo: Cohesión y Ángulo de rozamiento.....	53
Tabla 32. Valores del ensayo de permeabilidad K (m/s).....	54
Tabla 33. Valores del coeficiente de poisson (ν).....	54
Tabla 34. Valores del módulo edométrico Eoed.....	54
Tabla 35. Tipo de comportamiento del suelo.....	54
Tabla 36. Propiedades térmicas según bibliografía.....	54
Tabla 37. Propiedades del granulado de NFU considerado para el análisis de sensibilidad.....	55
Tabla 38. Materiales a emplear en rellenos localizados según artículo 330 PG-3.....	59
Tabla 39. Coeficientes parciales de seguridad para la estabilidad CTE-DB-C.....	62
Tabla 40. F.S. Deslizamiento y Vuelco muro L 2,80 m y B 1,70 m cohesión ($c' = 0$ Kpa) y ($c' = 10$ kPa).....	63
Tabla 41. F.S. Deslizamiento y Vuelco muro L 5,80 m y B 3,00 m cohesión.....	64
Tabla 42. Uso de los coeficientes parciales de seguridad en los diferentes Enfoques de Proyecto.....	66
Tabla 43. Factores parciales para el Enfoque de Proyecto 1.....	67
Tabla 44. Factores parciales para el Enfoque de Proyecto 2 y 3.....	67
Tabla 45. Cálculo del F.S. al deslizamiento para una situación persistente en sección M4 y M6.....	68

Tabla 46. Comparativa del F.S. al deslizamiento EC-7 y CTE-DB-SE-C para sección M4 y M6	69
Tabla 47. Comparativa del F.S. al vuelco EC-7 y CTE-DB-SE-C para sección M4 y M6.....	69
Tabla 48. Comparativa del F.S. al deslizamiento EC-7 y CTE-DB-SE-C para sección M1 y M3	70
Tabla 49. Comparativa del factor de seguridad al vuelco EC-7 y CTE-DB-SE-C para sección M1 y M3	70
Tabla 50. F.S. Global de muro con h= 5.80 m muestras S5 y S6 PLAXIS 2D V8 – V20.....	74
Tabla 51. Diferencia entre F.S. de ELU y ELS para sección M6	75
Tabla 52. Diferencia entre F.S. de ELU y ELS para la sección M3	75
Tabla 53. Parámetros característicos considerados para el modelado de la muralla de Utrera	89
Tabla 54. Resistencia grupos de geotextiles conforme UNE EN ISO 10319 para muralla de Utrera	89
Tabla 55. Parámetros de los elementos de entibación para la muralla de Utrera	89
Tabla 56. Definición fases, desplazamiento total y factor de seguridad en hipótesis 1.1	91
Tabla 57. Definición fases, desplazamiento total y factor de seguridad en hipótesis 1.2	93
Tabla 58. Desplazamientos verticales (Uy) m puntos A, B y C para hipótesis 1 sección Muralla de Utrera	94
Tabla 59. Hipótesis 2.1 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (0,5-3,5 m) sin explanada bajo la losa	95
Tabla 60. Hipótesis 2.1 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (0,5-6 m) sin explanada bajo la losa.....	96
Tabla 61. Hipótesis 2.1 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (1-6 m) sin explanada bajo la losa.....	97
Tabla 62. Hipótesis 2.1 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (1,5-6 m) sin explanada bajo la losa.....	98
Tabla 63. Hipótesis 2.2 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (0,5-3,5 m) con explanada bajo la losa	99
Tabla 64. Hipótesis 2.2 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (0,5-6 m) con explanada bajo la losa	100
Tabla 65. Hipótesis 2.2 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (1-6 m) con explanada bajo la losa	101
Tabla 66. Hipótesis 2.2 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (1,5-6 m) con explanada bajo la losa	103
Tabla 67. Desplazamientos verticales (Uy) m puntos A, B y C para hipótesis 2 sección Muralla de Utrera	104
Tabla 68. Hipótesis 3.1 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (0,5-3,5 m) con geotextil sin explanada	106
Tabla 69. Hipótesis 3.1 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (0,5-6 m) con geotextil sin explanada	107
Tabla 70. Hipótesis 3.1 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (1-6 m) con geotextil sin explanada.....	108
Tabla 71. Hipótesis 3.1 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (1,5-6 m) con geotextil sin explanada	109
Tabla 72. Hipótesis 3.2 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (0,5-3,5 m) con geotextil y explanada.....	110
Tabla 73. Hipótesis 3.2 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (0,5-6 m) con geotextil y explanada.....	111
Tabla 74. Hipótesis 3.2 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (1-6 m) con geotextil y explanada.....	112
Tabla 75. Hipótesis 3.2 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (1,5-6 m) con geotextil y explanada.....	114
Tabla 76. Desplazamientos verticales (Uy) m puntos A, B y C para hipótesis 3 sección Muralla de Utrera	115
Tabla 77. Parámetros geotécnicos de los materiales según artículo 330 PG-3.....	120
Tabla 78. Fases de cálculo para sección R1 ejecutado en 5 capas.	124
Tabla 79. Fases de cálculo para sección R1 ejecutado en 20 capas	124
Tabla 80. Deformación de la malla en función del espesor de las capas que conforma el terraplén	126
Tabla 81. Presión intersticial en función del espesor de las capas que conforma el terraplén R1.....	128
Tabla 82. F.S. global en función del espesor de las capas que conforma el terraplén R1	129
Tabla 83. Deformación de la malla según muestra S5 o S6 en el terraplén R2	130
Tabla 84. Exceso de presión intersticial durante la construcción del terraplén según sección R2.....	132
Tabla 85. F.S. global en función del espesor de las capas que conforma el terraplén R2	133
Tabla 86. Deformación de la malla según la muestra S5 o S6 en el terraplén R3	133
Tabla 87. Exceso de presión intersticial durante la construcción del terraplén según sección R3.....	135
Tabla 88. F.S. global en función del espesor de las capas que conforma el terraplén R3	136
Tabla 89. Deformación de la malla según la muestra S5 o S6 en el terraplén R4	136
Tabla 90. Exceso de presión intersticial durante la construcción del terraplén según sección R4.....	138
Tabla 91. F.S. global en función del espesor de las capas que conforma el terraplén R4	139
Tabla 92. Deformación de la malla según la muestra S5 o S6 en el terraplén R5	139
Tabla 93. Exceso de presión intersticial durante la construcción del terraplén según sección R5.....	141

Tabla 94. F.S. global en función del espesor de las capas que conforma el terraplén R5	142
Tabla 95. Parámetros característicos considerados para el modelado de la ladera de Almuñécar	151
Tabla 96. Parámetros considerados para la definición de los pilotes	152
Tabla 97. Desplazamientos y F.S. Global suponiendo hipótesis 1 de mejora en PK 0+40	153
Tabla 98. Desplazamientos y F.S. Global suponiendo hipótesis 2 de mejora en PK 0+40	154
Tabla 99. Desplazamientos y F.S. Global suponiendo hipótesis 3 de mejora en PK 0+40	155
Tabla 100. Desplazamientos y F.S. Global suponiendo hipótesis 4 de mejora en PK 0+40	156
Tabla 101. Parámetros geotécnicos considerados para la formación de explanadas sobre capa de NFU	161
Tabla 102. Módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga según NLT-357	161
Tabla 103. Materiales para la formación de explanadas.....	162
Tabla 104. Módulo de compresibilidad según Red de Carreteras de Andalucía	162
Tabla 105. Asientos diferenciales máximos constructivos tras 3 meses de dos puntos que disten 20 m.....	163
Tabla 106. Caracterización terreno de cimentación para el análisis de asientos del terraplén	165
Tabla 107. Fases de cálculo general para sección R1; R2; R3; R4 y R5 ejecutado sin explanada	166
Tabla 108. Deformación vertical en sección R1, R2 R3, R4 y R5 sin explanada	167
Tabla 109. Criterios de análisis deformación vertical explanada	167
Tabla 110. Definición fases sección R1, R2, R4 y R5 para la explanada E1-1.....	170
Tabla 111. Deformación vertical en explanada E1-1; S.C. mitad derecha y completa	170
Tabla 112. Criterios de análisis en explanada E1-1 terraplén capas horizontales	171
Tabla 113. Definición fases sección R1, R2, R4 y R5 para la explanada E1-2.....	172
Tabla 114. Deformación vertical en explanada E1-2; S.C. mitad derecha y completa	173
Tabla 115. Criterios de análisis deformación vertical explanada E1-2	173
Tabla 116. Definición fases sección R1, R2, R4 y R5 para la explanada E1-3.....	175
Tabla 117. Deformación vertical puntos A, B, C y D explanada E1-3; S.C. mitad derecha y completa	175
Tabla 118. Criterios de análisis en explanada E1-3 con capas horizontales	176
Tabla 119. Deformación vertical en explanada E2-1; S.C. mitad derecha y completa	177
Tabla 120. Criterios de análisis en explanada E2-1 con capas horizontales	178
Tabla 121. Deformación vertical en explanada E2-2; S.C. mitad derecha y completa	179
Tabla 122. Criterios de análisis en explanada E2-2 con capas horizontales	180
Tabla 123. Definición fases sección R1, R2, R3 y R5 para la explanada E2-3.....	181
Tabla 124. Deformación vertical en explanada E2-3; S.C. mitad derecha y completa	182
Tabla 125. Criterios de análisis en explanada E2-3 con capas horizontales	182
Tabla 126. Porcentaje en base a la composición material de las secciones tipo terraplén.....	185
Tabla 127. Deformación vertical sin explanada en sección R3, R4 y R5 con capas no horizontales	186
Tabla 128. Criterios de análisis explanada con capas no horizontales en el terraplén	186
Tabla 129. Deformación vertical E1-1 en sección R3, R4 y R5 con capas no horizontales	188
Tabla 130. Criterios de análisis explanada E1-1 terraplén con capas no horizontales	189
Tabla 131. Deformación vertical E1-2 en sección R3, R4 y R5 con capas no horizontales	190
Tabla 132. Criterios de análisis explanada E1-2 terraplén con capas no horizontales	190
Tabla 133. Deformación vertical E1-3 en sección R3, R4 y R5 con capas no horizontales	191
Tabla 134. Criterios de análisis en explanada E1-3 terraplén con capas no horizontales	192
Tabla 135. Deformación vertical en explanada E2-1; S.C. mitad derecha y completa	193
Tabla 136. Criterios de análisis de explanada E2-1 terraplén con capas no horizontales	193
Tabla 137. Deformación vertical E2-2 en sección R3, R4 y R5 con capas no horizontales	194
Tabla 138. Criterios de análisis en explanada E2-2 terraplén con capas no horizontales	195
Tabla 139. Deformación vertical E2-3 en sección R3, R4 y R5 con capas no horizontales	196
Tabla 140. Criterios de análisis en explanada E2-3 con capas no horizontales	196

RESUMEN

El neumático fuera de uso, en adelante **NFU**, constituye el material de partida para esta investigación debido a las dificultades que presenta para su reutilización en el sector automovilístico. Este enfoque pretende contribuir a las iniciativas encaminadas a favorecer la incursión de materiales reciclados en el sector de la construcción como indicador de sostenibilidad. Por lo que la siguiente investigación presenta en primer lugar un protocolo basado en la caracterización de un rango detallado de partículas y en segundo lugar, la evaluación de posibles usos y prescripciones técnicas para diferentes aplicaciones geotécnicas.

Para la caracterización del material se han llevado a cabo varios ensayos para determinar las **propiedades mecánicas y físicas** de un **rango de partículas menor que 12 mm**, las cuales se han mezclado entre ellas en diferente proporción. Las pruebas evaluadas determinaron la **densidad y peso específico, energía de compactación, compresibilidad, tensión de corte y deformación de cada muestra**. Como primera conclusión se determinó que el granulado de neumático presenta un gran potencial para su empleo en obras de geotecnia al observarse un ángulo de cohesión entre 18,27 a 21,97 grados y una cohesión en un amplio rango entre 11,74 y 15,77 kPa.

En base a los parámetros resistentes del NFU obtenidos se estudian distintas hipótesis teóricas de aplicación a partir de la evaluación de las muestras S5: 90% 2,0-7,0 mm + 10% 0,6-2,0 mm y S6: 50% 2,0-7,0 mm + 50% 0,6-2,0 mm, como **rellenos localizados en el trasdós de muros de contención, rellenos en terraplenes sobre terrenos de baja capacidad portante y colocación bajo explanadas para la creación de firmes y pavimentos**. Como posibles aplicaciones de campo, se estudia la implementación en el trasdós de una sección del **recinto amurallado de Utrera** –Sevilla– con el fin de determinar el ancho mínimo de relleno de NFU necesario para disminuir los empujes sobre la muralla. Otro caso de estudio está constituido por el **perfil de la ladera** donde se encuentra la **Urbanización Cármenes del Mar** (Granada), con el objetivo de reducir los procesos de deslizamiento desde la zona superior de la misma, sustituyendo parte del relleno existente para la construcción escalonada del conjunto residencial por NFU.

La novedad que plantea esta investigación, se centra en el análisis específico de una serie de granulometrías y mezclas de las mismas, de material cohesivo, para caracterizar en laboratorio, obteniendo así parámetros geotécnicos a partir de los valores característicos, llevando a cabo correlaciones de los datos obtenidos en el laboratorio a aplicaciones en campo, de acuerdo con las especificaciones del Código Técnico Español (CTE-DB-SE-C) y del Eurocódigo (EC7-1).

Los resultados obtenidos permiten concluir la **idoneidad de uso de este material reciclado en dichas aplicaciones**, ya que se mejora la estabilidad global del conjunto siempre que se consideren ciertas premisas en la puesta en obra del material. Además, el empleo del granulado de neumático permite **reducir el consumo de materias primas** como el árido convencional, además de otros subproductos como el cemento o el hormigón, ya que se reducen las tensiones sobre los elementos de contención optimizándose las secciones y contribuyendo con todo ello al **modelo de economía circular**.

CONCEPTOS CLAVE

Valores característicos de los granulados de NFU, influencia del tamaño de partícula, correlación entre propiedades y aplicaciones geotécnicas del NFU.

INTRODUCCIÓN

Sostenibilidad, ecología y reciclaje constituyen lemas sólidos muy presentes en el S.XXI, dónde el ciclo de vida de los materiales y *la innovación en el diseño de elementos reciclados*; ha tomado un papel crucial en la sociedad. El modelo actual de economía lineal no favorece una adecuada gestión de los recursos naturales encontrados en el aire, el agua o el suelo. Este hecho, combinado con la gran cantidad de residuos generados por nuestro actual modelo de desarrollo; que se acumulan sin un aprovechamiento eficaz que permita una sustitución real de los recursos naturales; provoca un incremento del efecto invernadero que acelera el cambio climático.

El empleo de nuevas tecnologías y el uso de materiales no convencionales son vías de innovación sostenible en el ámbito de la construcción. Uno de estos materiales no convencionales son los materiales reciclados de residuos de la construcción y demoliciones; residuos urbanos e industriales. **Esta investigación se basa en el empleo de granulados de neumáticos triturados en obras de geotecnia y rehabilitación como sustitutivo de los áridos utilizados comúnmente.**

Las principales entidades encargadas del tratamiento de los neumáticos fuera de uso a nivel nacional, son SIGNUS Ecovalor y TNU (Tratamiento de neumáticos usados), constituidos el 19 de mayo de 2005 y el 13 de julio de 2006 respectivamente. Ambos se encargan de la recogida y tratamiento del residuo para garantizar tanto la valorización material como la valorización energética. A nivel internacional, la entidad European Tyre & Rubber manufacturers' association (ETRMA) analiza el mercado europeo de reposición de neumáticos y tratamiento de los mismos, con el fin de favorecer la visibilidad e inclusión de nuevos productos derivados del tratamiento de los neumáticos fuera de uso. La principal herramienta para conseguir este objetivo se basa en la cooperación con los legisladores para generar un entorno que ayude a la industria a alcanzar una mejor regulación garantizando la seguridad vial y cuidando el medio ambiente y sus recursos. El marco jurídico para el tratamiento de los residuos en la Unión Europea se materializa en la **Directiva (UE) 2018/851** (Parlamento Europeo & Consejo Unión Europea, 2018), como extracto de una serie de consideraciones sobre la economía circular. En dicha Directiva se indica a los Estados Miembros, la necesidad de **reciclar un mínimo del 55% de los residuos no peligrosos – entre los que se incluyen los neumáticos fuera de uso (NFU)- en peso para el 2025 y ascender al 60% para 2030 y al 65% para el 2035**. Además, se introduce una definición para la valorización material distinta de la valorización energética, en donde se considere el tratamiento de residuos para obtener materias primas secundarias que **permitan la construcción de obras o infraestructuras**. En este sentido, el sector de la construcción consume el 40% de los recursos y genera el 40% de los residuos en nuestro país, emitiendo el 35% de los gases de efecto invernadero, siendo uno de los hitos a reducir según la estrategia de economía circular en España para el año 2030 (Gobierno de España, 2020). El consumo nacional de áridos en el año 2019 obtenidos a partir de explotaciones naturales para la construcción; alcanzó los 136,5 millones de toneladas, frente a 2,5 millones de áridos reciclados de la construcción (RCD) y sólo un millón de toneladas de áridos artificiales, en los que se englobarían los neumáticos fuera de uso - lo que supone el 0,7% del total (Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos (ANEFA, 2019). En la Figura 1 se observa cómo el principal consumo de áridos naturales en España, va destinado al sector de la construcción, muy en concreto a la fabricación de hormigón, morteros y prefabricados.

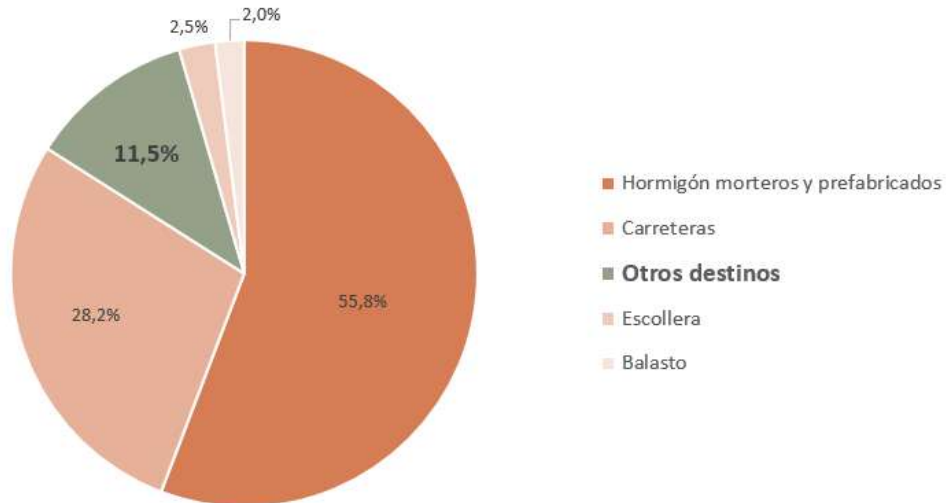


Figura 1. Consumo de áridos naturales informe ANEFA 2020

Nota Fuente: Adaptado de ANEFA, 2020.

El reparto del consumo de áridos naturales en función de las aplicaciones en obra indica para las tres primeras posiciones hormigones, mortero y prefabricados; carreteras y **otros destinos**, en los que podrían englobarse las obras de geotecnia y dónde el NFU podría encontrar un mayor nicho de mercado, teniendo en cuenta que el total de NFU gestionado en España en 2020 fue de 150.228 toneladas (SIGNUS Ecovalor, 2020).

A nivel nacional Andalucía se posiciona en el primer puesto en cuanto en la generación de este residuo con un total de 32.448 toneladas en 2020, seguido de Cataluña con 23.978 toneladas y en tercer lugar la Comunidad de Madrid con 16.630 toneladas. Se observa como la tendencia en la generación de este elemento se mantiene constante en los últimos años, según informes elaborados por SIGNUS para el año 2019 y 2018.

Actualmente el mayor uso al que se destina el NFU es a la granulación (caucho, acero y textil por separado); frente al casi inexistente uso que encontramos en obra civil, donde el volumen de NFU revalorizado es mayor según la Figura 2.

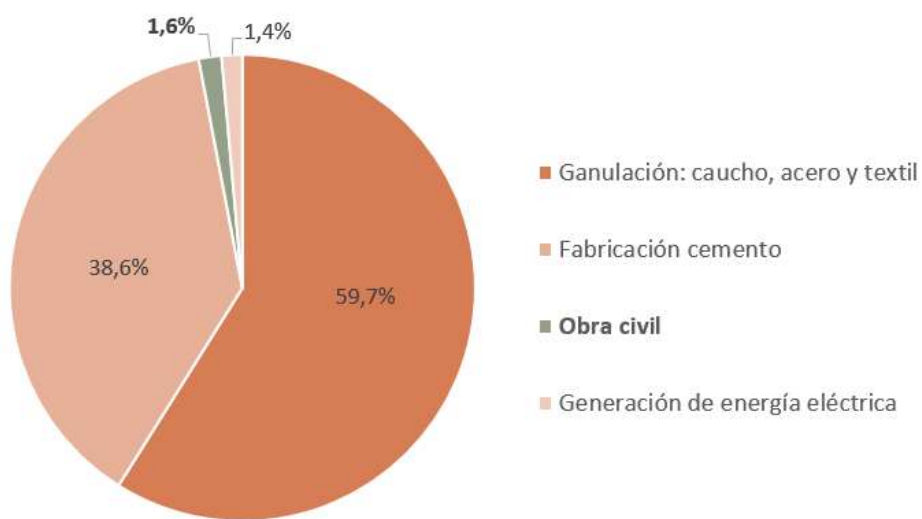


Figura 2. Destino final de NFU según Signus Ecovalor informe 2020

Nota Fuente: Adaptado de Signus Ecovalor.

Uno de los posibles motivos podría ser las exigencias en las condiciones de puesta en obra en relación con el tamaño de las partículas del NFU. Las investigaciones y obras de geotecnia relacionadas con el empleo de NFU, han acotado su huso granulométrico a tamaños de partícula que suelen oscilar entre 12 mm y 305 mm, conocidos como “tire derived aggregate” (TDA). En este tamaño de partícula, las condiciones de puesta en obra son mucho más exigentes, ya que se debe controlar el acero expuesto, lo que dificulta mucho los trabajos de procesado. En este sentido, **esta investigación busca implementar en aplicaciones geotécnicas el granulado de neumático con un tamaño de partícula inferior a 12 mm**, denominadas según la norma americana como “rubber fines”, cuya ventaja principal es la ausencia de acero expuesto.

Para ello, se llevó a cabo una campaña de ensayos en el laboratorio que permitieron definir los parámetros característicos más relevantes a contemplar en las hipótesis de implementación del material propuestas.

Las conclusiones del análisis inicial sobre la caracterización del material, indican que la permeabilidad de las virutas de neumático varía en función del tamaño de la partícula y que los **valores de densidad compactada**, son aproximadamente un **tercio menor que los típicos para suelos compactados**, pudiéndose obtener este valor con un bajo esfuerzo de compactación. La compresibilidad y la resistencia de los NFU troceados constituyen las propiedades mecánicas más relevantes para su uso en obras de geotecnia, por lo que se calculó la carga de pre-consolidación para evitar deformaciones en la muestra, motivadas por el bajo módulo edométrico del material. Respecto a la resistencia del material se determinó un ángulo de rozamiento similar al de materiales arenosos, pero con cierta cohesión.

Finalmente, se propusieron una serie de **aplicaciones** donde se verificó la viabilidad del material para su uso **en rellenos de muros de contención** con sección en L, donde el peso del relleno en el trasdós se considera la principal acción estabilizadora, de forma que el bajo peso específico del NFU pasa a un segundo plano frente a otras propiedades del material que permitieron obtener secciones estructurales más optimizadas al poder reducirse el empleo del hormigón armado. Como caso práctico de puesta en obra del material se estudió una sección del recinto amurallado de Utrera (Sevilla), con el objetivo de mejorar la estabilidad debido a una serie de modificaciones para la revalorización de esta. Otra de las aplicaciones fue como relleno para la **formación de terraplenes sobre terrenos con baja capacidad portante**, donde se observó una reducción significativa de las presiones intersticiales durante el proceso constructivo y por ende un aumento del factor de seguridad. Como caso práctico, se estudió la mejora que suponía la colocación de NFU en ciertas zonas de una sección de ladera en la Urbanización Cármenes del Mar (Almuñécar), acusada de grandes deslizamientos a lo largo de la misma. Por último, se estudiaron los **asientos en la coronación y la deformación unitaria de todas las secciones del terraplén**, frente a sobrecargas distribuidas de diferente extensión incluyendo además distintos tipos de explanada para posteriormente la colocación de firmes o pavimentos. Los resultados obtenidos indicaron la necesidad de implementar algún tipo de explanada para contrarrestar las deformaciones instantáneas que sufre el NFU frente a diferentes sobrecargas.

Simultáneamente se realizó una aproximación al comportamiento del material frente a **cargas dinámicas**, como pueden darse en el hincado de pilotes; y sobre las **propiedades térmicas del NFU** ante diferentes condiciones climáticas, para poder evaluar las propiedades aislantes del material frente al incremento de la temperatura exterior.

Los resultados obtenidos se evaluaron frente a **criterios normativos, constructivos, medioambientales y económicos** comparándolos con soluciones ejecutadas con material convencional, de forma que se verificaran la viabilidad de la puesta en obra del material desde una evaluación global.

capítulo 1

EVOLUCIÓN EN EL EMPLEO DEL NFU: JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 PRODUCTOS Y USOS DERIVADOS DEL NFU

Dentro de la valorización energética, la combustión de NFU en plantas cementeras es el principal uso al que se destina este producto que puede contener hasta un 30% de biomasa en su interior frente al carbón que contiene un 0%. No obstante, la sustitución de este combustible en los hornos es parcial y oscila entre un 10 y el 20% del total del carburante, de forma que finalmente las emisiones medidas de la combustión se reducen sólo en ciertos parámetros, manteniéndose el resto constantes (OFICEMEN, 2019). El principal incentivo para el uso en esta aplicación, es que el precio de salida del material para valorización energética es de 0,04-0,05 €/litro, mientras el precio considerado para la valorización material que podría emplearse en obras de infraestructuras y geotecnia es de 0,08-0,1 €/litro.

Con la recogida en el año 2014 de 54.774 toneladas se ahorraron 77 millones de litros de petróleo (SIGNUS Ecovalor, 2014). Teniendo en cuenta que el contenido de un barril de crudo es de 159 litros y que para ese mismo año el precio del mismo era de 72,11 € aproximadamente, se ahorraron aproximadamente 35 millones de euros. La cantidad de combustible líquido de uso cotidiano que contienen los barriles de crudo, es aproximadamente de un 31% entre gasolina y diesel. Por lo tanto, un total de 23 millones de litros de estos combustibles se obtuvieron mediante la valorización energética del residuo en el año 2014. Si se considera el litro de combustible a 1,31 €/L para ese periodo, se consiguieron 30 millones de euros en la valorización del material como combustible.

Respecto a la valorización material, el empleo del NFU para obras civiles no alcanza el 12%, seguido de los pavimentos de seguridad y el recauchutado, siendo esta última la opción más ecológica. Desde el 2012 la valorización material ha descendido al quedar cubierta la demanda de las principales aplicaciones que se llevaban a cabo con el granulado de neumático.

En los datos expuestos en la Figura 3 se resume de diversos informes los resultados de investigaciones y proyectos de colaboración entre las empresas de gestión TNU y SIGNUS Ecovalor (SIGNUS Ecovalor, 2007); (SIGNUS Ecovalor, 2011); (Tratamiento de Neumáticos Usados - TNU, 2014); (SIGNUS Ecovalor, 2017); (SIGNUS Ecovalor, 2020) ; dónde se indican los principales usos de este material para una granulometría que oscila entre 0,4 y 5 milímetros.

APLICACIONES NFU 2007-2020

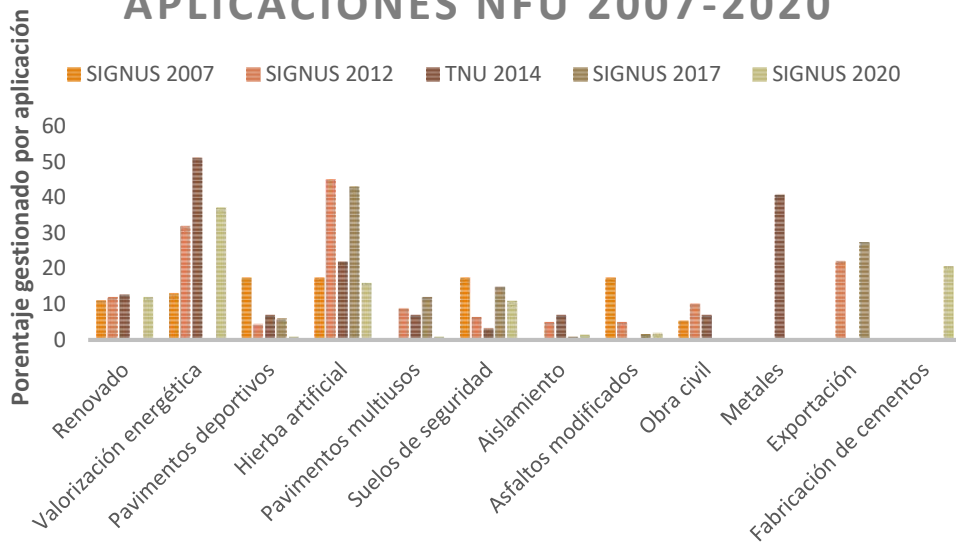


Figura 3. Aplicaciones NFU entre el 2007 y el 2020

Nota Fuente: Adaptado del informe anual de Signus Ecovalor y TNU entre 2008 y 2020

A partir del informe de TNU del año 2014, se realiza una estimación de la cantidad de NFU empleado por metro cuadrado en las distintas aplicaciones indicadas en dicho informe, según se muestra en la Figura 4.

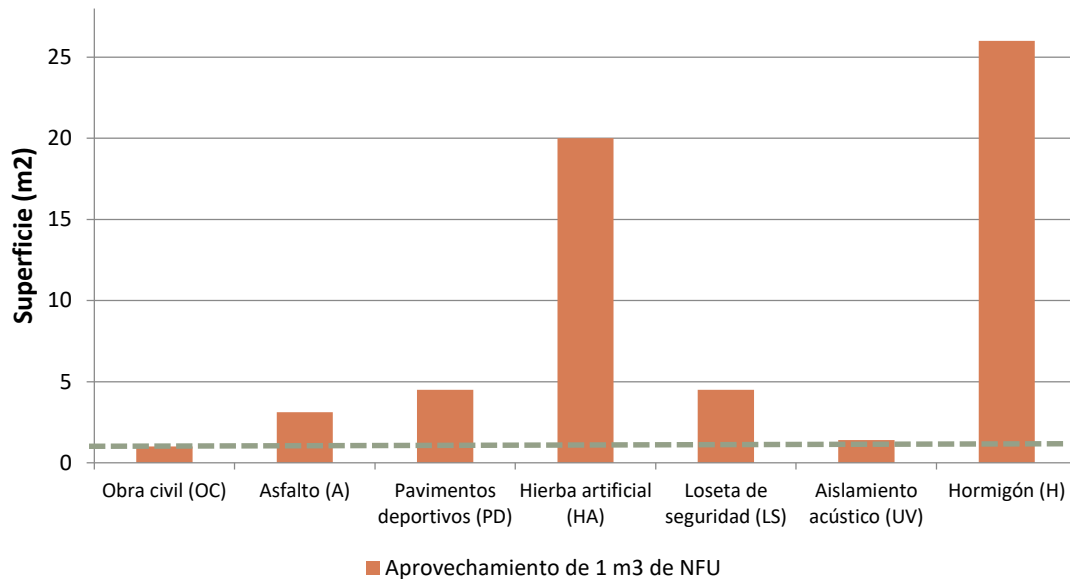


Figura 4. Aprovechamiento del NFU en función de su dosificación.

Nota Fuente: *Elaboración propia*

En la Figura 4 se observa como en la obra civil y en aplicaciones de aislamiento acústico, es necesario disponer de menor superficie para aprovechar la mayor cantidad de material reciclado.

Como se puede observar, para mezclas de hormigón (H) se precisa disponer de una superficie de 26 m² aproximadamente, para reciclar un metro cúbico de NFU. Sin embargo, para un metro cúbico de relleno tipo terraplén se precisa el 100% del material, presentando esta aplicación el mayor ratio de aprovechamiento por

metro cuadrado. Sin embargo, este hecho contrasta fuertemente con el porcentaje de aplicación que se lleva a cabo en la actualidad, que oscila entre el 6,68 y el 10,32% según los informes realizados por TNU y SIGNUS.

Para las aplicaciones a estudiar, el reciclaje del material viene incentivado por las propiedades generales que lo definen:

- El neumático fuera de uso es 100% reciclable.
- Versatilidad en el tamaño granulométrico.
- Peso específico del orden de 1/3 menor que los áridos convencionales.
- Resistencia al envejecimiento y durabilidad.
- Resistencia a la humedad- no absorbe agua.
- Resistencia mecánica.
- Capacidad de absorción de vibraciones.
- Alta resistencia frente a agentes meteorológicos.
- Aislante térmico.

1.2 PUNTO DE PARTIDA Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

Este documento se enmarca en el convenio de colaboración con SIGNUS Ecovalor (Sistemas Integrados de Gestión de Neumáticos) y el grupo de investigación GRENECO –Granulado de Neumático en Construcción- de la Universidad de Sevilla (US).

En los siguientes capítulos se ampliaron algunos puntos de la tesis de investigación desarrollada por la Doctora Elizabeth Contreras Marín, con título “CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES RECICLADOS: PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL GRANULADO DE NEUMÁTICO FUERA DE USO (NFU’s)”, como parte del trabajo conjunto de caracterización del granulado de NFU en el laboratorio que se desarrolló durante los tres primeros cursos (2017-2020) de esta tesis doctoral. La principal contribución de la presente investigación se fundamenta en el desarrollo y evaluación de posibles aplicaciones teóricas y prácticas en obras de geotecnia, en base a los parámetros característicos analizados.

Se parte de las siguientes cuestiones:

- ¿Se pueden sustituir áridos naturales por granulado de neumático en obras de geotecnia?
- ¿Cuál es la influencia de los parámetros geotécnicos de cada una de las muestras analizadas en la puesta en obra?
- ¿En qué aplicaciones se podría implementar?
- ¿Qué limitaciones presenta?
- ¿Qué beneficios medioambientales implica el uso del granulado de NFU?
- ¿Cuál es el reto económico?

Para responder estas incógnitas, se analizan y comparan diversas soluciones constructivas convencionales en el campo de la geotecnia frente a soluciones en las que se consideró el uso del granulado de neumático, con un tamaño de partícula inferior a 12 milímetros.

La falta de normativa y propuestas de utilización del NFU, ha conllevado un descenso importante en el año 2020, del empleo de estos materiales en obras de geotecnia. Se identificaron como los principales motivos que ralentizan la puesta en obra del material:

El tamaño de NFU más común usado en construcciones de geotecnia se encuentra entre los 50 a 100 mm de largo, conocidos como TDA. Para este huso granulométrico, las astillas son de forma irregular, y presentan un porcentaje elevado de filamentos metálicos. Las fábricas de tratamiento encuentran grandes dificultades para cumplir con la prescripción indicada en la norma americana (ASTM D 6270, 2017), que especifica el porcentaje máximo de filamentos metálicos expuestos en función del tamaño del granulado, para evitar problemas de oxidación y la consiguiente auto combustión bajo ciertas condiciones del entorno.

- La existencia de filamentos metálicos implica emplear capas de separación con mayor resistencia como los geotextiles, de forma que estos no se perforen, lo que encarece la puesta en obra de estos materiales.
- Desconfianza por parte del usuario, al ser un material que no se encuentra completamente caracterizado en base a la normativa vigente. Siendo la auto combustión del material y la propagación de plagas y microorganismos los principales campos sin estudiar.
- Falta de un manual de prescripciones técnicas, que orienten en la buena ejecución de las obras con este material reciclado.
- Su difusión como material en el campo de la geotecnia y la rehabilitación de estructuras de contención se encuentra limitada al emplearse como rellenos marginales en núcleos de terraplenes. Además de contar con un gran competidor como es el árido convencional.

1.3 GRADO DE RELEVANCIA E INNOVACIÓN

Es indispensable promover el empleo de estos residuos debido a las dificultades de reutilización dentro del sector automovilístico y a la limitación en el volumen de almacenamiento en las plantas de tratamiento, que no podrá superar el plazo de seis meses ni una cantidad de 30 toneladas si su destino es la eliminación, o de un año si el destino final es la valorización siendo la cantidad almacenada máxima la mitad de la capacidad anual autorizada de tratamiento (Industria, 2005). Para ello, debe implantarse una metodología y normas de ensayo que asienten las bases para futuras aplicaciones, dónde la repercusión de aprovechamiento por metro cuadrado del material sea mayor y se evite el problema de su acumulación.

La principal novedad reside en ampliar el campo de aplicación de estos materiales reciclados que en origen han sido clasificados para ciertos usos acotados. De esta forma el producto existente podría introducirse en nuevos mercados. **En esta investigación se propone el empleo del granulado de neumático en un rango granulométrico que hasta el momento ha sido descartado para su empleo en obras de geotecnia (tamaño de partículas menor 12 mm).**

A partir de los parámetros geotécnicos obtenidos en la fase previa de caracterización de las muestras, como aportación novedosa de esta investigación, se pretende desarrollar **distintos casos prácticos que sirva de guía o manual**, y que fomenten el empleo del material en obras de geotecnia para este tamaño de partícula, que hasta el momento no ha sido implementado.

Para evaluar el grado de innovación de este documento en el futuro, en el que se fomenta el empleo del granulado de neumático, deben valorarse distintos factores como la sostenibilidad económica, medioambiental y social.

A **nivel económico** la mayor novedad consiste en la **reducción** de los costes directos en la construcción, que para el año 2021 cerraron con un incremento interanual del 23,5%. Los gastos derivados del tratamiento

de los NFU están incluidos en el importe de adquisición de estos, a través de una tasa en concepto del procesamiento al final de su vida útil según la Disposición adicional cuarta del RD 1619/2005 (Industria, 2005), que especifica la obligación de incluir en la factura de venta al consumidor el porcentaje que tenga en el precio final el coste económico de la gestión del residuo cuando este se convierta en un NFU. Por lo tanto, como sustituto de los áridos convencionales en obras de geotecnia, se podría llegar a alcanzar un ahorro del 70%, que dependerán de la distancia de transporte desde la planta de tratamiento a la puesta en obra.

A **nivel medio ambiental** se reducirían las emisiones de CO₂ generadas a la atmósfera por el consumo de materias primas y el aprovechamiento de este material reciclado, que genera problemas de acumulación. En la actualidad más de 1.000 toneladas de NFU se encuentran en dos vertederos acumulados ilegalmente, en Campos del Río (Murcia) y Hontoria (Segovia), generando riesgos para la salud de las poblaciones cercanas y el medio ambiente.

La existencia de nuevos nichos de mercado implicaría a nivel social, la creación de empleo relacionado con la valoración de materiales al final de su vida útil, que además favorecerían la visualización y concienciación social sobre la utilización y uso de materiales reciclados.

Este documento surge como una de las muchas herramientas existentes que buscan fomentar un crecimiento sostenible en colaboración entre el sector público, privado y cada uno de los individuos que desempeñan un papel activo mediante las acciones y decisiones que repercuten en nuestro futuro. Siempre considerando que con este tipo de acciones puede alcanzarse el mismo objetivo de crecimiento que se sigue actualmente con un modelo basado en el consumo desmesurado de materias primas.

1.4 OBJETIVOS

El **objetivo general** de esta investigación se fundamenta en demostrar la viabilidad del empleo de los granulados de neumático (NFU) con un tamaño de partícula inferior a 12 mm, en el ámbito de la geotecnia y rehabilitación de estructuras de contención.

El objetivo general se plantea en base a los siguientes objetivos específicos:

1. Elección del marco de aplicación: Investigar y exponer por orden cronológico la aparición de los **sistemas constructivos y elementos prefabricados** que emplean **NFU** con un mayor volumen del material.
2. Estudiar los **parámetros geotécnicos** más característicos para aplicaciones con NFU: Ampliar el conocimiento de las características **geométricas, físicas y mecánicas** de los NFU, de forma que se extienda su uso en aplicaciones sin contemplar.
3. Poner en valor la capacidad de los granulados de neumático, como material viable en **terraplenes**, rellenos para la **formación de explanadas** y **rellenos localizados** en el trasdós de estructuras de contención según las indicaciones del Pliego General del Ministerio de Fomento y Eurocódigo 7.
4. Analizar la validez de los resultados numéricos obtenidos mediante **modelos numéricos** empleando NFU y soluciones convencionales y compararlos con el **cálculo analítico**.
5. Comparar la **rentabilidad económica** del uso de NFU frente a soluciones convencionales, aportando el valor de la **sostenibilidad**, a través de distintos indicadores.
6. **Experimentación en campo**, a través del análisis previo de la implementación en obra del granulado de NFU como relleno en trasdós de una muralla y en la formación de terraplenes.

1.5 PLAN DE TRABAJO Y METODOLOGÍA

La metodología de trabajo se divide principalmente en dos secciones: caracterización del material y experimentación en laboratorio de las muestras de NFU y análisis analítico y numérico.

La organización del plan de trabajo y metodología se apoyó en una estructura secuencial de objetivos propuesto junto a la Doctora Elizabeth Contreras Marín, en donde se marcaron los siguientes hitos para la primera fase de la investigación realizada de forma conjunta:

- Conocimiento del estado del arte sobre la caracterización del NFU.
- Análisis de normativa en vigor para la caracterización de suelos y realización de ensayos en equipos de laboratorio disponibles.
- Comparativa de los parámetros obtenidos con la bibliografía existente.

La obtención de los valores característicos y principales conclusiones fueron incluidos en la tesis doctoral "CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES RECICLADOS: PARÁMETROS GEOTÉCNICOS DEL GRANULADO DE NEUMÁTICO FUERA DE USO (NFU's)" formalizada por la Doctora Elizabeth Contreras Marín.

A partir de las conclusiones obtenidas sobre la caracterización del material, se identificaron las siguientes competencias específicas que se formalizan en el presente documento, como continuación de la investigación conjunta:

- Identificar las aplicaciones para el material.
- Modelación del comportamiento geotécnico mediante cálculo analítico y de elementos finitos de diferentes hipótesis.
- Comparación con los resultados obtenidos en otras investigaciones en las que emplean otro huso granulométrico.

El plan de trabajo y la metodología llevada a cabo han quedado plasmados en la presente tesis doctoral organizada en los siguientes capítulos:

En la introducción, se especifica la temática elegida sobre el uso de granulado de NFU en obras de geotecnia y construcción; así como la justificación de la investigación y relevancia del tema, ante la necesidad de la valorización material de dicho residuo para favorecer un modelo de economía circular.

En el Capítulo 1 se contextualiza la situación actual del NFU. Para ello, se han considerado los informes de los principales gestores de tratamiento autorizados, TNU y Signus, los cuales deben recopilar la información de su gestión según indica el artículo 41 de la Ley 22/2011, de 28 de julio, de Residuos y Suelos Contaminados. Concluyéndose el bajo porcentaje de empleo del material en obras de geotecnia, dónde la repercusión de aprovechamiento del material es mayor que en otras aplicaciones con mayor demanda.

En el Capítulo 2 se buscaron referencias normativas que hicieran alusión al tratamiento del NFU, tanto a nivel nacional como internacional. Este estudio permitió conocer el nivel de concienciación y compromiso con el reciclaje del material en base al volumen legislativo de la materia.

En el Capítulo 3 se ha desarrollado el estudio bibliográfico centrado en analizar el estado del arte mediante una revisión de la bibliografía respecto a la caracterización del material en una primera fase y en segundo lugar respecto a las principales aplicaciones que emplean NFU. Complementariamente se ampliaron los conocimientos sobre el análisis del ciclo de vida de los materiales con el fin de esquematizar las ventajas en el empleo del NFU.

En el Capítulo 4, se desarrolló el enfoque de la investigación, basado en incluir y ampliar algunos de los resultados sobre la campaña de ensayos de las muestras suministradas por RMD y Renean, que permitieron obtener los parámetros geotécnicos necesarios como punto de partida en las aplicaciones propuestas.

En el Capítulo 5, se presentaron los resultados obtenidos para las distintas hipótesis de cada una de las aplicaciones de ingeniería civil propuestas como son: rellenos localizados en el trasdós de muro de contención; construcción de terraplenes; análisis de asientos en coronación y asientos en cimentaciones, trabajando con NFU puro y material convencional. Los valores obtenidos se compararán con los valores estipulados en las normas de referencia para la ejecución de obras de geotecnia, como son la norma UNE-EN 1997-1:2010, Eurocódigo 7, Código Técnico de la Edificación Documento Básico Cimientos, y Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3- Parte 3). Además del método analítico, se desarrolló el método numérico empleando los programas informáticos PLAXIS 2D V 8.6 y V20.

En el Capítulo 6 se explican los resultados obtenidos y se contrastan tanto con la teoría como con otras investigaciones anteriores. Para ello, se argumenta la viabilidad del empleo de NFU en cada una de las aplicaciones propuestas en base a nivel normativo, económico, constructivo y medioambiental, de forma que se justifica la importancia de la investigación para el área de estudio y cómo contribuye a mejorar el problema seleccionado.

En el Capítulo 7 se exponen las principales conclusiones fundamentadas en los objetivos planteados y se indica el grado de avance del conocimiento en la materia, junto con la difusión de resultados, estableciéndose las futuras líneas de investigación.

capítulo 2

MARCO TEÓRICO – REFERENCIAL

2.1 MARCO LEGISLATIVO Y NORMATIVO NACIONAL

2.1.1 Marco legislativo a nivel nacional

La regulación legislativa, en base a la que se rigen las principales empresas que se dedican en España a la gestión de residuos, se rige por el Real Decreto 1619/2005 (PER2011), teniendo como base la Ley 10/1998. Este decreto establece la obligación de incluir en las facturas de venta de los neumáticos, los costes proporcionales de la gestión de los neumáticos al final de su vida útil y la identificación de los procedimientos para alargar la vida útil a través de la reutilización, reciclado y otras formas de valorización. Este Real Decreto ha sido modificado en alguno de sus artículos por el Real Decreto 731/2020, de 4 de agosto, sobre la gestión de neumáticos fuera de uso. Los comentarios se centran principalmente en la recogida del material y en las operaciones de recauchutado, ya que son las de mayor sostenibilidad al incorporar el neumático de nuevo al mercado con actuaciones de poca envergadura.

Los NFU tienen el código europeo (CER) 160113 y están clasificados como residuos no peligrosos, lo que no exime de su vertido en neumáticos enteros a partir de julio de 2003 (Real Decreto 1481/2001), y de neumáticos troceados a partir de julio de 2006 (Real Decreto 1619/2005). En dicho Real Decreto se indica que el almacenamiento de estos productos en las instalaciones de tratamiento no podrá superar un periodo de tiempo de seis meses si su uso final es la valorización del mismo, ni cantidades que excedan de 30 toneladas cuando su destino final sea la eliminación.

En julio de 2011 se aprueba la Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados, que incorpora la “Directiva Marco de Residuos” (Directiva 2008/08/CE) al ordenamiento jurídico español y que actualiza y mejora la ley anterior de residuos (Ley 10/1998). La Directiva 2008/98/CE, cambia la denominación del código LER 16 01 03, utilizando el término neumáticos al final de su vida útil en lugar de neumáticos fuera de uso.

En diciembre de 2012 se aprobó la Ley 11/2012 con medidas urgentes en materia de medio ambiente, que modifica la Ley 22/2011.

En el Plan Nacional de Residuos, se introducen los conceptos para que un residuo pase a ser un “subproducto”, de forma que se alcance el “Fin de la condición de residuo” (art.5), para el que debe existir una demanda para dicho subproducto, que se cumplan las exigencias técnicas para aplicaciones específicas, y que el uso de la sustancia u objeto no genere impactos negativos en el medio ambiente.

El Consejo de Ministros de 5 de Octubre de 2001 aprobó el Plan Nacional de Neumáticos Fuera de uso (PNNFU) (Medio Ambiente, 2001). En dicho Plan se reconocen las claras posibilidades de aumentar el porcentaje de reciclaje de los NFUs, y en caso de no ser posible estudiar la valorización energética como la última opción, según el principio de jerarquía de la Ley 10/1998. Dicha jerarquía se fundamenta principalmente en la limitación de emisiones de gases contaminantes a la atmósfera provocadas por la incineración del material. En el año 2007 se realiza una revisión del I PNNFU, a través del II PNNFU (2007-2015) y se analiza entre otros temas, el descenso a depósito en vertedero que pasa del 81,5% en 1998 al 50% en el año 2005, valor por debajo de los objetivos del plan anterior.

En paralelo el Plan Nacional Integrado de Residuos para el periodo 2008 – 2015 (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2009), indicaba como objetivos cuantitativos que para el año 2015 la valorización del material fuera del 98%, mientras que la valorización energética alcanzara el 20%. Es decir, se prioriza la valorización material del NFU ante la emisión de gases debido a la combustión del mismo. La evolución de dicho documento se materializa en el Programa Estatal de Prevención de Residuos 2014-2020 (Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente, 2013), donde no se establecen objetivos cuantitativos sobre el reciclado de este material, entendiéndose como vigentes los establecidos en el Plan Nacional Integrado de Residuos. En el Programa Estatal Marco de Residuos PEMAR (2016-2022) (PEMAR, 2015) se establecen como orientaciones estratégicas el impulso del recauchutado para alargar el ciclo de vida de estos ya que se estima que el aporte de energía y materiales en comparación con un neumático nuevo puede reducirse entre un 69,6% para un vehículo tipo comercial y un 44,5% para un neumático tipo turismo (Miguel Sánchez, Marta Guzmán, 2013); promover el empleo de los subproductos derivados del NFU como mezclas bituminosas; puesta en obra pública y privada para la construcción de terraplenes, relleno en trasdós de estructuras ; y analizar y valorar la contribución al reciclado de alguno de los materiales contenidos en los NFU cuando se someten a incineración.

El desarrollo de estándares de calidad para los subproductos derivados del neumático reciclado, junto con la mejora del rendimiento de los equipos de procesado, constituyen las premisas fundamentales para favorecer la implementación de este material. Por todo ello, se deduce la importancia de establecer un marco de actuación que permita ampliar las posibilidades de valorización del material y que conlleve un aumento significativo de nuevos mercados para la mejora en el conocimiento, innovación y protección del medio ambiente.

2.1.2 Modelo de gestión a nivel nacional

A nivel nacional el modelo de gestión para los neumáticos usados se rige por la responsabilidad extendida del productor (EPR), dónde el fabricante tiene la obligación de garantizar que los desechos generados por los neumáticos fuera de uso se eliminen de manera responsable y respetuosa con el medio ambiente. En España la Directiva 99/31/CE ha constituido dos Sistemas Integrados de Gestión (SIG) sin ánimo de lucro, que se encarga de gestionar la recogida de NFU y su clasificación posterior:

- SIGNUS (Sistema Integrado de Gestión de Neumáticos Usados), creado el 19 de mayo de 2005 y que agrupa la mayor parte de los fabricantes de neumáticos a nivel nacional.
- Tratamiento de Neumáticos Usados (TNU), constituido el 13 de julio de 2006.

2.1.3 Normativa de aplicación para NFU a nivel nacional

A nivel nacional no se ha encontrado ninguna normativa de referencia, salvo experiencias relacionadas con la puesta en obra de material desarrolladas por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) en algunas de las aplicaciones que se plantean en esta investigación (Ministerio de Fomento, Ambiente, & Públicas, 2013) (“Obras de tierra y terraplenes | CEDEX,” n.d.).

Con la finalidad de regularizar el empleo del material, CEDEX desarrolla en el 2002 un “Catálogo de residuos utilizables en construcción”, donde se incluyen los NFUs, lo que permite reconocerlo como material de construcción; siendo un material por descubrir, sobre todo en obras de rehabilitación dónde se necesita una cierta resistencia y bajo peso específico. Otro de los materiales incluidos en este catálogo es la arcilla expandida, conocida como arlita, la cual se utiliza nivel nacional e internacional en obras de geotecnia desde los años ochenta y desde los cincuenta en países nórdicos como Finlandia. Se observa en este caso la existencia de una normativa específica para la arlita (UNE EN 15732:2014), lo que supone la posibilidad de equiparar este documento, con un futuro igualitario para el NFU (“Guía Técnica Arlita,” 2018).

2.2 MARCO LEGISLATIVO Y NORMATIVO INTERNACIONAL

2.2.1 Marco legislativo a nivel internacional

A nivel europeo European Tyre & Rubber Manufacturers Association, en adelante ETRMA, constituye una organización fundada desde 1959 que ha acompañado a la industria de este sector en su evolución hacia una mayor sostenibilidad.

La Directiva sobre vertederos (Directiva CE 1999/31) fue una herramienta importante que los Estados miembros de la UE implantaron para regular la gestión de residuos de los vertederos y generar las bases para los sistemas de gestión de NFU en la Unión Europea.

En la Directiva de Residuos de la UR 2008/98/EC se incluye la definición de residuo para productos derivados del neumático al final de su vida útil.

ETRMA impulsó en 2012 el Reglamento de etiquetado de neumáticos, el cual proporciona a los consumidores de toda Europa información sobre el consumo de combustible, la seguridad y el ruido; al definir la resistencia a la rodadura de los neumáticos, la adherencia en superficie mojada y el ruido de rodadura exterior. En 2019 las instituciones europeas alcanzaron un acuerdo provisional sobre la revisión del Reglamento Europeo de Etiquetado de Neumáticos y el Reglamento final (UE 2020/740) el cual se publicó en 2020.

La responsabilidad en la gestión de neumáticos al final de su vida útil es una actividad principal al nivel de todas las demás fases de diseño o de producción. El sistema de gestión más extendido en la UE, lo constituye la responsabilidad extendida del productor, donde el fabricante original debe velar por los desechos de forma que estos se eliminen de forma adecuada para el medio ambiente. Esto ha llevado a la creación de empresas sin ánimo de lucro financiadas por productores de neumáticos con el objetivo de gestionar la recogida y recuperación del NFU.

2.2.2 Normativa de aplicación para NFU a nivel internacional

Desde los años setenta, se realizan en EE.UU. obras de relleno con NFU, siendo fundamental la experiencia desarrollada en la aparición de una norma específica (*ASTM D 6270*, 2008) que define la metodología necesaria para evaluar las propiedades de los NFU en laboratorio y recomendaciones prácticas para su puesta en obra, como reemplazo de materiales convencionales. En el año 2017 y 2020 fue actualizada (*ASTM D 6270*, 2017); (*ASTM D 6270*, 2020).

La norma cuenta con nueve apartados además de un apéndice en donde se especifican las principales propiedades del material desde la perspectiva geotécnica para un rango de partículas que oscila entre los 2 mm a 50,8 mm.

En el apartado seis, se especifican las indicaciones para el uso del neumático en distintas aplicaciones, así como las ventajas del material, las cuales se resumen a continuación:

- El granulado de neumático permite reducir la transferencia de calor en muros de contención, reduciéndose por lo tanto los costes de aislamiento.
- Se recomienda un coeficiente de empuje en reposo (K_0) de 0,30 para el diseño de muros de contención con una altura superior a 3 m.
- Se emplean normalmente dos rangos de partículas en las principales aplicaciones una tiene un tamaño máximo de 200 mm, lo que se define como TDA Tipo A, y la otra de 300 mm, denominado como TDA tipo B.

- Ambos rangos granulométricos pueden compactarse en capas de 3 m de espesor con un equipo con un rango de operación de 90 kN, para la mayor parte de las aplicaciones debe darse al menos 6 pasadas por capa.
- La capa de neumático debe cubrirse con material convencional en un espesor suficiente que impida deflexiones en el pavimento causada por la carga de tráfico. Capas de 0,8 m suelen ser suficientes para pavimentos con tráfico ligero, mientras que para cargas de tráfico superiores pueden requerirse 1 o 2 m de material convencional entre el NFU y el pavimento.
- Para minimizar las posibles reacciones exotérmicas en el rango granulométrico indicado se recomienda no emplear grandes cantidad de material con un tamaño inferior al indicado.
- El TDA tipo A se considera como relleno Clase I, donde las capas deben tener un espesor máximo de 1 m, mientras que el TDA tipo B se recomienda para rellenos Clase II, donde las capas pueden tener un espesor máximo de 1 a 3 m. No recomendándose capas de espesor superior a 4 m.
- Con el objetivo de evitar la infiltración de agua o aire se especifica la necesidad de incluir capas impermeables como geotextiles.

En el apartado 8 se muestran ensayos en los que no se observaron efectos negativos sobre las aguas subterráneas. No obstante, se recomienda colocar el granulado de neumático por encima del nivel freático.

A partir de esta normativa son muchas las puestas en obra que se han llevado a cabo en EE.UU., precursor de la aplicación de NFU troceado, y que han fomentado la creación de documentos en base a ella y que sirven como guías o manuales de aplicación en diferentes estados (GeoSyntec Consultants, 2008); (PennDOT Chief Engineer's Office, 2008); (Cheng, 2016).

capítulo 3

ESTADO DE LA CUESTIÓN

3.1 INVESTIGACIONES A NIVEL FRONTERIZO Y TRANSFRONTERIZO

El uso de materiales reciclados en el sector de la ingeniería y la construcción constituye un esfuerzo innovador para reducir el impacto medio ambiental y permitir un uso sostenible de los recursos naturales. El NFU constituye el material de partida para esta investigación debido a las dificultades que presenta para su reutilización en el sector automovilístico. La pirolisis en base a la desvulcanización del material genera un limitado interés en las últimas décadas. De ahí la necesidad de fomentar la valorización del material en otras aplicaciones dónde la repercusión de aprovechamiento por metro cuadrado sea superior, como es el caso de las obras de geotecnia y rehabilitación en estructuras de contención.

A nivel académico se distinguen distintas ramas de investigación para este material reciclado, cuyo guion metodológico se basa en líneas generales, en analizar las propiedades geométricas, mecánicas y químicas; profundizar en la normativa existente de aplicación al reciclado de neumático e implementar el material en distintas prácticas, dónde puedan darse en ocasiones dificultades para el uso de materiales convencionales. De igual interés resultan otras aplicaciones en las que se priorizan las propiedades aislantes o se investiga la sustitución de parte de material convencional en compuestos ligados. Ejemplo de ello es el proyecto conjunto entre TNU y el Instituto de Tecnología de Materiales en el campus de Alcoy de la Universidad Politécnica de Valencia, se centra en desarrollar un nuevo subproducto de aislamiento térmico y acústico de paredes, suelos y techos con NFU, especialmente dirigido a obras de edificación (TNU, 2013); generando igualmente interés a nivel transfronterizo (Nascimento, Ismail, Lino, & Nóbrega, 2021). Dentro de esta línea de estudio, otras investigaciones se han centrado en las propiedades térmicas del NFU como aislamiento de tuberías de conducción de fluidos soterradas (Meguid & Youssef, 2018); (Rezaei B., Kolahdouz, Dargush, & Weber, 2012), considerando una conductividad térmica de $0,0029 \text{ W/cm}^\circ\text{C}$ para un rango variado de tamaños de partículas que van desde los 2,54 cm hasta los 12,7 cm. Para un tamaño de partícula de 0,1016 cm a 2,54 cm la conductiva térmica obtenida fue de $0,00097 \text{ W/cm}^\circ\text{C}$ y para partículas de 5,08 cm de $0,00208 \text{ W/cm}^\circ\text{C}$ (GeoSyntec Consultants, 2008). Shao et al (1995) midió la conductividad térmica para partículas de 25,4mm obteniendo un valor de $9.68 \cdot 10^{-5} \text{ kW/m/K}$, mientras que para las partículas más pequeñas de 1 mm los valores alcanzaron $1.69 \cdot 10^{-4} \text{ kW/m/K}$. En comparación, la conductividad térmica de suelos típicos es sobre $1.72 \cdot 10^{-3} \text{ kW/m/K}$ (GeoSyntec Consultants, 2008).

Otra línea de estudio se relaciona con la estabilización de suelos arcillosos o turbas con baja capacidad portante (Rahgozar & Saberian, 2016); (S. Li & Li, 2018); (Akbarimehr, Eslami, Aflaki, & Hajitaheriha, 2021). Los resultados indicaron que las partículas de neumático mejoraban propiedades geotécnicas como la resistencia a la compresión no confinada o el ángulo de rozamiento añadiendo entre un 10 y un 25% de NFU a las muestras de suelo.

Las propiedades de amortiguación del material han motivado investigaciones basados en el aislamiento sísmico que el NFU podría proporcionar para tuberías enterradas en zonas de alta sismicidad (Ni, Qin, & Yi, 2018), pudiendo además reducir las presiones inducidas dinámicas en el trasdós del muro de contención entre un 70% y un 80% sólo con la adicción de un 30% de NFU (S. Bali Reddy & A. Murali Krishna, 2021). Debido a la propiedad

de amortiguación, se ha analizado su comportamiento como relleno junto con material de balasto para vías ferroviarias (Gong et al., 2019); (Esmaeili, Aela, & Hosseini, 2017). La incorporación de NFU al balasto reduce la degradación y rigidez de este, pero a su vez aumenta los asentos en la base del mismo debido a la deformabilidad del material, lo que puede provocar superar algún estado límite de servicio (ELS), deteriorando la estructura.

Otro de los campos de investigación, es como porcentaje de un compuesto en mezclas de granulado de neumático con distintos componentes que dan lugar a hormigón o cementos reciclados o adobe (M. Sc. Thesis by Behzat Alp ATAPEK, 2008); (Thomas & Chandra Gupta, 2016); (Khorasani & Kabir, 2022); (Intaboot & Kanbua, 2022). También aparecen nuevos compuestos como el TDM (Tire Derived material) que es un compuesto que surge de forjar en frío una mezcla de fibras de caucho y granos, obtenido al moler llantas de desecho y aglutinante de poliuretano (Montella, Govindjee, & Neff, 2016).

Por último, las investigaciones que han resultado de mayor interés para conocer el estado de la cuestión en la presente tesis, son aquellas centradas en el empleo de los trozos de neumáticos exclusivamente como material de relleno en obras de geotecnia.

Una de las principales aplicaciones es como relleno ligero en forma de granulado en muros de contención (Cecich, Gonzales, Hoisaeter, Williams, & Reddy, 1996); (Tweedie, Humphrey, & Sandford, 1998); (Youwai & Bergado, 2004); (H. Djadouni, H. Trouzine, A. Gomes & T. Filipe da Silva, 2021); (Duda & Siwowski, 2021a); (Arefnia, Dehghanbanadaki, & Kassim, 2021); (Dram, Balunaini, Benmebarek, & Madhav, 2022) o en forma de balas de neumáticos (Duda & Siwowski, 2021a), siendo un material adecuado como relleno ligero de trasdós de muros, al ocasionar empujes más bajos y tensiones más bajas generando menores asentos en la cimentación al contar con un peso específico del orden de 1/3 respecto a los materiales de relleno convencional. También se ha evaluado como suelo reforzado al incorporar barras metálicas en el relleno de NFU y arena (Khan et al., 2022).

Otra de las aplicaciones es como relleno para la construcción de terraplenes (Eldin, 1990), donde la baja densidad y suficiente resistencia al corte permite su empleo para la formación de taludes (L., 1993); (Anvari & Shooshpasha, 2014); (L. Li, Xiao, Ferreira, & Cui, 2016a); (Meguid & Youssef, 2018); (Reddy, Krishna, & Reddy, 2018); (L. Li et al., 2022). Además, este material ligero limita los asentos en terrenos con baja capacidad portante o la necesidad de implementar costosos refuerzos para reducir el incremento de las presiones intersticiales (Mills & McGinn, 2010); (Duda & Siwowski, 2021b). En relación a ellos, distintos autores (Anvari & Shooshpasha, 2014); (L. Li, Xiao, Ferreira, & Cui, 2016b) han centrado sus investigaciones en determinar cuál es la geometría óptima y disposición de las distintas capas de NFU y material convencional que provoca menores asentos en los rellenos tipo terraplén.

Respecto a la deformación vertical de explanadas sobre estratos de NFU, se concluye la idoneidad de empleo del material como base bajo una capa de material granular convencional, cuyo espesor deberá estudiarse según el caso (L. Li, Cui, Ferreira, Xiao, & Jie, 2019), ya que dependiendo de las condiciones del modelo los asentos pueden variar (Asefzadeh, Hashemian, & Bayat, 2018); (Raeesi, Soltani, King, & Disfani, 2020). Los resultados indican que el NFU bajo cimentaciones permite la redistribución de tensiones cuando se somete a una presión concreta, resultando en menores tensiones bajo la cimentación (Mahgoub & El Naggar, 2020); (Gill, Mittal, & Rawat, 2021); (Li-Hua et al., 2022) y (Mahgoub & El Naggar, 2022).

3.2 EXPERIENCIAS DE APLICACIÓN EN BASE AL ESTUDIO DEL MATERIAL

En la actualidad, el uso principal, por lo que los **NFU** son conocidos es en espacios públicos de urbanización; a partir de elementos prefabricados obtenidos mediante la adición de virutas de neumático triturado y otros

componentes, que dan como resultado: losetas de seguridad, pavimentos continuos en zonas deportivas, barreras acústicas para carreteras... además de otros usos en auge.

Otras aplicaciones que se han puesto en funcionamiento en obras civiles son las mezclas bituminosas usadas en las carreteras, donde se identifican dos procedimientos a la hora de incorporar **NFU**, como son la vía húmeda y la vía seca. En esta aplicación se ha estimado que se produce un aprovechamiento de 1.300 neumáticos por km, lo que se traduce en un ahorro de 6.681 euros, y además se asocia a una reducción de ruido del 40%. Así mismo el proyecto "New Jersey", en el que colabora SIGNUS, ha desarrollado distintos prototipos para su puesta en carretera. El diseño de guarda raíl de neumático reciclado es adaptable a los guarda raíles ya instalados a través de anclajes a un alma interior de acero, la cual se recubre con una funda elaborada a partir de NFU. Respecto a las consideraciones medioambientales, un guarda raíl emplea 2.287 neumáticos, lo que se traduce en 57.000 L de petróleo, que implican 169.238 kilogramos de CO² no emitidos a la atmósfera.

Otro de los destinos con interés, son las balas de neumáticos, formados por elementos prismáticos de una tonelada de peso, que compactan entre 100 y 125 neumáticos. Las dimensiones habituales son de 75 x 150 x 135 cm, lo que recuerda a los gaviones metálicos y a los muros de escolleras (Ministerio de Fomento, 2006); de cuya normativa se podría partir para llevar a cabo un análisis estructural de los mismos. El inconveniente principal del empleo de estos elementos como componentes estructurales en contacto con la atmósfera, es que son potencialmente inflamables y deben cubrirse con otros materiales.

En otras aplicaciones se fomenta el empleo del NFU como balsas de almacenamiento e infiltración, donde se emplean los NFU triturados como capas drenantes en los sistemas de recolección de lixiviados en vertederos. El primer proyecto de este tipo se ha ejecutado en la localidad de L'Aldea, Bajo Ebro, en el que colaboró SIGNUS. El proyecto consistió en la construcción de una capa drenante con la finalidad de convertirlo en un parque ambiental, para lo que se emplearon 5.300 Tn de NFU. De esta forma, se consiguió llevar a cabo una buena gestión ambiental del residuo y además, se evitó la extracción y transporte de 9.000 m³ de gravas (SIGNUS Ecovalor, 2009). El interés en analizar la interacción entre la capa filtrante de NFU y el geotextil ubicado bajo esta capa, ha dado lugar a investigaciones más recientes en este tipo de aplicación (Marcotte & Fleming, 2020).

Relacionado con el campo de aplicación anterior, distintos autores (Kim, Park, & Edil, 1997); (Park et al., 2003) se han centrado en la capacidad de absorción de los NFU respecto a compuestos volátiles orgánicos (VOC) además de sus propiedades drenantes.

A nivel nacional, el organismo de la Unión Europea FEDER, redacta una serie de experiencias del uso en España de diferentes materiales marginales, donde se incluye al NFU (Invertimos, 2013).

Las obras incluidas en dicha publicación son "Duplicación de la carretera M-111 y Variante Fuente el Saz" en el año 2007, donde se alternaron capas de NFU con capas de suelo. La longitud del tramo construido con el material alcanzó los 100 metros y un espesor total de capaz de 3,20 metros de altura. Para la ejecución del relleno se emplearon unos 270.000 NFU, lo que equivale según la publicación a 2.200 toneladas del residuo. Otra obra ejecutada, es el talud en un ramal de la Autovía de las Pedrizas, Málaga (SIGNUS Ecovalor, 2011). En este proyecto se emplearon unas 4.000 toneladas de material. Por último, mencionar la modificación de enlace San Isidoro-aeropuerto Sur, en la isla de Tenerife, el cual se comenzó en 1999. Para este caso, se diseñaron dos secciones tipo en función de la geometría del terraplén, el cual contaba con una altura aproximada de 20 metros, con una anchura de coronación de 11,5 metros y una longitud de 65 metros.

El tratamiento al que se han sometido los NFU para estas obras, es mucho más sencillo y requiere de un menor consumo energético, ya que el huso granulométrico máximo es de 100 mm por lo que los procedimientos de triturado son menores. La gran dificultad reside en llevar a cabo las prescripciones de la normativa específica en base al correcto empleo de los NFU en obras de ingeniería civil (ASTM D6270-20); la cual define los

principales subproductos resultados del tratamiento y las distintas aplicaciones y recomendaciones prácticas que pueden llevarse a cabo.

3.3 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

3.3.1 Fundamentos y legislación para combatir el cambio climático

El sector de la construcción supone consume un 40% de los recursos a nivel nacional, lo que supone la generación de un 40% de residuos y la emisión de un 35% de los gases de efecto invernadero. El dióxido de carbono es el gas que más se asocia a actividades humanas y el principal responsable del efecto invernadero. La concentración en la atmósfera de este gas, se debe principalmente al empleo de combustibles fósiles para proceso industriales y medios de transporte.

La concentración de algunos gases de efecto invernadero disminuye de forma inmediata si se reducen las emisiones, mientras que otros pueden continuar durante siglos incluso con dicha reducción significativa de las emisiones que los generaron. En el caso del CO₂, más de la mitad tarda un siglo en eliminarse de la atmósfera; mientras que un 20% se mantiene en la atmósfera durante milenios. Como conclusión, el lento proceso de eliminación de CO₂ emitido a la atmósfera continúa aumentando a largo plazo, aun cuando su emisión se haya reducido sustancialmente (IPCC2013, 2013).

Para poder reducir el impacto que genera el ciclo de vida de las construcciones en el medio ambiente, en primer lugar se debe cuantificar dicho impacto, traduciendo las emisiones a cantidades equivalentes de CO₂; evaluando los agentes que intervienen en el proceso y finalmente determinando las posibles mejoras para la optimización del mismo, que en esta investigación se fundamentan en el empleo de NFU.

Los principales materiales empleados en la fabricación de neumáticos tanto de turismo como de camión según la norma UNE-CEN/TS 17045:2020, se indican en la Tabla 1.

Tabla 1 . Componentes principales de los neumáticos.

MATERIAL	NEUMÁTICO TURISMO	NEUMÁTICO CAMIÓN
<i>Caucho</i>	48%	45%
<i>Negro de carbón y sílice</i>	22%	22%
<i>Metal</i>	15%	25%
<i>Textil</i>	5%	-
<i>Óxido de zinc</i>	1%	2%
<i>Azufre</i>	1%	1%
<i>Aditivos</i>	8%	5%

Nota Fuente: Adaptado de norma UNE-CEN/TS 17045:2020.

Si analizamos la gestión de residuos en España en 2018, según fuentes estadísticas, se trataron 297 millones de toneladas de residuos (no peligrosos) , Del total generado, 119 millones de toneladas fueron gestionados; 45 millones de toneladas fueron destinados al reciclado; 12 millones de toneladas a operaciones de relleno; 3 millones a recuperación energética y 90 mil toneladas a incineración. Esto supone únicamente el reciclaje y empleo en como rellenos del 19,42%, lo que implica que estos materiales no han desarrollado un ciclo de vida circular, si no lineal que finalmente genera residuos a largo plazo (Eurostat, 2022).

Los documentos marco para la realización de un análisis del ciclo de vida (ACV) son las normas internacionales:

- ISO 14040 Principios y marco de referencia para el ACV.
- ISO 14044 Requisitos y directrices para el ACV.

En base a estas normas internacionales, el análisis del ciclo de vida se realiza en cuatro fases, las cuales se describen a continuación:

1. Definición del objetivo y alcance, donde se identifica el producto, proceso o actividades principales; identificación del estudio y las suposiciones clave.
2. Inventario del ciclo de vida, donde se recopilan y cuantifican los flujos de entrada de materias primas, energía, salidas del proceso y emisiones a la atmósfera y resultados como residuos y posteriormente subproductos durante su ciclo de vida.
3. Evaluación del impacto del ciclo de vida, que cuantifica o cualifica el potencial de los impactos basados en el inventario del ciclo de vida (ICV) a ecosistemas, salud humana y recursos naturales. Como elementos indispensables se considera la selección de las categorías de impacto, los indicadores de categoría y los modelos de caracterización; la clasificación, donde se asignan los resultados del ICV a las categorías de impacto seleccionadas; y la medición del impacto en base al cálculo de los resultados de indicadores de categoría. Además de los elementos adicionales, es posible incluir algunos adicionales como la normalización; agrupación; ponderación y análisis de calidad de los datos.
4. Por último, la interpretación del ciclo de vida es una técnica sistemática para identificar, cuantificar, comprobar y evaluar la información de los resultados del ICV.

Como incentivo de cambio se introduce el concepto de “economía circular”, la cual ha sido concebida a partir de un ciclo de desarrollo y transformación, que avanza optimizando el uso de los recursos de forma que estos no pasen a considerarse como residuos y permanezcan activos el mayor tiempo posible. Para ello, es indispensable la valorización de los residuos mediante sistemas de tratamiento adecuados que emitan la menor cantidad de contaminantes, y la optimización de los productos, siendo el caso de los neumáticos un hito por desarrollar, ya que actualmente una vez finalizan su vida útil, deben someterse a complejos procesos químicos que no hacen rentable su incorporación en la cadena de producción de cualquier actividad industrial, incluida la de fabricación de neumáticos nuevos (termólisis). **Todo ello, debe ir acompañado de un cambio en la normativa vigente y la creación de nuevos modelos de negocio que permitan el empleo de estos residuos transformados.**

Los neumáticos son igualmente responsables en la contaminación ambiental, desde su fabricación hasta el final de su vida útil. El ciclo de vida de estos elementos se podría agrupar en: materias primas necesarias para su fabricación, que implican en torno al 10% del impacto ambiental; producción estimada en un 3% en aquellos fabricantes eficientes y responsables con el medio ambiente; su uso constituye un 84% de impacto, por lo que su buen mantenimiento contribuye considerablemente en el ahorro de combustible y menores emisiones de gases contaminantes. Por último, una vez que se da por finalizado la vida útil del neumático se cuantifica en un 3% el impacto ambiental que conllevan las operaciones de tratamiento del residuo según los principales fabricantes de este elemento

A nivel nacional se formaliza en 2021 la Ley de Cambio Climático (Ministerio de la Presidencia de España, 2021) para reducir el calentamiento global y las emisiones de CO₂ y otros gases contaminantes. Con este documento España se compromete a reducir un 39% las emisiones de los sectores como movilidad, usos térmicos en edificio, residuos o agricultura. Respecto a la gestión de residuos, uno de sus principales ejes consiste en impulsar la economía circular con una serie de medidas a 2030, cuyos objetivos principales son:

- Reducir en un 30% el consumo nacional de materiales en relación con el PIB, respecto del 2010.
- Reducir la generación de residuos un 15% respecto de lo generado en 2010.
- Incrementar la reutilización y preparación para la reutilización hasta llegar al 10% de los residuos municipales generados.

- Reducir la emisión de gases de efecto invernadero por debajo de los 10 millones de toneladas de CO₂ equivalente.

En el año 2021 se formalizó el Pacto de Glasgow para el clima, cuyos objetivos principales van encaminados a aumentar la resistencia frente al cambio climático. Para ello, los países acordaron proporcionar 100.000 millones de dólares anuales a los países en desarrollo. Además de reducir las emisiones, de forma que la temperatura media mundial pueda limitarse a 1,5 grados. Se hace especial énfasis a los países miembros para que reduzcan progresivamente la energía del carbón y las subvenciones ineficientes a los combustibles fósiles.

Por ello, se plantean varios hitos en esta investigación, siendo uno de ellos el cuantificar los impactos que genera una solución constructiva convencional en su fase de diseño mediante el empleo de materiales convencionales, y otro comparar el resultado final de las mismas soluciones planteadas con el empleo de materiales reciclados.

3.3.2 Herramientas para la evaluación del ciclo de vida

Para el análisis del ciclo de vida se empleó el software Simapro 6.0, en el que se pueden llevar a cabo los siguientes estudios:

1. Analizar la fase de producción.
2. Analizar el ciclo de vida de los materiales.
3. Comparar varios productos, y organizar un análisis concreto.

En el programa Simapro, basándose en la norma ISO 14042, se especifica una serie de procedimientos para la evaluación de impacto que se pueden utilizar para comprender mejor los resultados del inventario. De manera predefinida, el programa utiliza el método “ReCiPe Endpoint (H)” para la caracterización del ciclo de vida. No obstante, pueden elegirse otros métodos de cálculo como “Cumulative Energy Demand V1.11”, donde se evalúan las entradas de energía, o lo que se conoce como energía incorporada (MJ); otro método de interés es el “IPCC 2013 GWP”, que evalúa las emisiones que contribuyen al cambio climático, utilizando los factores del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) con una perspectiva de 20 o 100 años. Las sustancias con una vida útil relativamente corta, como el metano, se muestran más altas en la perspectiva de corto plazo, mientras que las sustancias con una vida útil prolongada como el N₂O, aparecen más altas en la visión de largo plazo.

El IPCC 2013 es el sucesor del método IPCC 2007, que fue desarrollado igualmente por el Grupo Intergubernamental sobre Cambio Climático. Contiene los factores de cambio climático del IPCC con un plazo de 20 años.

Los factores de caracterización del IPCC para el potencial de calentamiento global directo (excepto CH₄) de las emisiones atmosféricas son:

- No se incluye la formación indirecta de monóxido de dinitrógeno a partir de emisiones de nitrógeno.
- No se tiene en cuenta la radiación debida a las emisiones de NO_x, agua, sulfato, etc. En la estratosfera inferior y troposfera superior.
- No se considera la gama de efectos indirectos dados por el IPCC.
- No se consideran los efectos indirectos de las emisiones de CO.

El inventario de Simapro, en el apartado de procesos permite obtener para el capítulo “Tratamiento de residuos” dentro del capítulo “Reciclaje” una estimación sobre el impacto generado por estos procesos de revalorización. Empleando el método de cálculo “IPCC 2013 GWP 20 años” y excluyendo las emisiones a largo plazo se obtienen 0 kg CO₂ equivalente para el proceso de reciclaje, ya que se asignan el beneficio y los costos del reciclaje al subproducto obtenido en el proceso de valorización.

De la misma forma, se puede obtener para el capítulo “Minerales” una estimación sobre el impacto generado en base a una imagen aérea de una mina y bocetos del proceso de extracción de los minerales (grava/arena). El volumen de producción anual promedio por unidad es de aproximadamente 400.000 a 500.000 t/año y se supone una vida útil de 50 años. Empleando el método de cálculo por defecto “ReCiPe 2016 Endpoint (H) V1.05 / World (2010) H/A”.

En último lugar, la base de datos de información medioambiental BEDEC PR/PCT, ha sido generada por miembros del Instituto de Tecnología de la Construcción (ITeC) y presenta una biblioteca de materiales empleados en la construcción, de los cuales se han obtenido las emisiones de CO₂ que generan en el proceso de fabricación de 1 kg de material, no incluyendo ni los transportes ni la puesta en obra.

capítulo 4

CONSIDERACIONES EN LA CARACTERIZACIÓN DEL NFU

4.1 MUESTRAS EMPLEADAS EN LA INVESTIGACIÓN

Las muestras con las que se realizan los ensayos de laboratorio han sido suministradas por dos de las empresas de tratamiento de NFU inscritas en SIGNUS Ecovalor. A partir de esta investigación se firmó un convenio de colaboración entre SIGNUS Ecovalor y la Universidad de Sevilla, “CONVENIO COLABORACIÓN ENTRE LA UNIVERSIDAD DE SEVILLA Y SIGNUS ECOVALOR, S.L., PARA LA COLABORACIÓN CIENTÍFICA ENTRE EL INSTITUTO UNIVERSITARIO DE ARQUITECTURA Y CIENCIAS DE LA CONSTRUCCIÓN DE LA UNIVERSIDAD DE SEVILLA Y SIGNUS”.

A través de este convenio la planta de tratamiento RMD (Industria de Reciclaje de Ámbito Internacional), en Aznalcóllar, Sevilla y Renean (Reciclado de Neumáticos de Andalucía) en Espelúy, Jaén, se encargaron de suministrar el material para hacer posible la investigación que ocupa este documento.

- RMD en Aznalcóllar tiene una capacidad de tratamiento de NFU de 20.000 tn/año, lo que equivale a una producción de caucho de 12.000 tn/año. Lo que supone el 13% del total de NFU tratados en 2020.
- RENEAN en Espeluy tiene una capacidad de tratamiento de NFU de 15.000 tn/año, es decir, una producción de caucho de 9.000 tn/año. Lo que supone el 10% del total de NFU tratados en 2020.

En base a la norma para la identificación del suelo ISO 14688-1, *Ingeniería geotécnica. Identificación y clasificación de suelos. Parte 1: Identificación y descripción*, se procede a clasificar las muestras de trabajo para la presente investigación. La granulometría suministrada por ambas plantas para el periodo 2017-2018 se describe en la Tabla 2.

Tabla 2. Material granular de NFU aportado por las plantas de tratamiento.

PLANTA DE TRATAMIENTO	MATERIAL	LOCALIDAD
RENEAN	Material granular de 0,00 – 0,60 mm Material granular de 0,60 - 2,00 mm Material granular de 2,00 – 4,00 mm	JAÉN
RMD	Material granular de 0,00 – 0,80 mm Material granular de 0,60 - 2,00 mm Material granular de 2,00 - 7,00 mm	SEVILLA

La realización de los ensayos de laboratorio se fundamentó en considerar la caracterización del material en base a la normativa de caracterización geotécnica existente y en base a la normativa de caracterización de áridos ligeros.

En primer lugar, se realizó un estudio comparativo entre las granulometrías aportadas para analizar las propiedades geométricas, mecánicas y físicas.

En el proceso general que siguen los neumáticos en la planta de reciclado suministradoras se distinguen varias etapas o fases por las que pasa el material, en función de la granulometría final que se desee obtener.

Mediante la excavadora se ubican los neumáticos enteros almacenados en el exterior en la tolva de descarga que conduce a la primera etapa, conocida como triturado múltiple. Una primera máquina trituradora, situada en el exterior de la nave, trocea los neumáticos mediante un sistema de cuchillas dejando trozos de 300 x 300 mm aproximadamente. El proceso se acompaña con agua para eliminar los posibles restos de residuos que acompañan al neumático entero.

A través de cintas transportadoras, los trozos entran al interior de la nave cubierta para continuar con el proceso de triturado, hasta llegar a una segunda máquina trituradora encargada de reducir los trozos de neumático en un tamaño aproximado de 50 x 50 mm.

Una vez más, mediante cinta transportadora se conduce hasta la última máquina de trituración, esta vez equipada con un sistema de criba. Se reduce de nuevo el tamaño de los neumáticos a 25 x 25 mm aproximadamente. El cribado se encarga de evitar el paso al siguiente punto del proceso a aquellos tamaños superiores a los concretados; de forma que estos vuelven a recircular.

Una vez llegados a esta etapa del tratamiento, se produce la separación de los filamentos metálicos mediante potentes imanes, que se ubican en un contenedor especial para su posterior reciclado. Igualmente, se produce la separación de fibras textiles de forma que se eliminan los restos que forman parte del producto.

La última etapa conocida se realiza en el granulador, la cual emplea una serie de discos rotatorios en sentido inverso, que reduce el grano hasta las dimensiones deseadas empleadas en esta investigación, según Figura 5.



Figura 5. Muestras S1, S2, S3 y S4 de NFU aportadas por RMD y RENEAN

4.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CICLO DE VIDA DEL ÁRIDO CONVENCIONAL Y NFU

A partir del programa de cálculo Simapro se analizaron las emisiones de CO₂ de una infraestructura de extracción de áridos naturales empleando el método de cálculo "IPCC 2013 GWP 20a" donde se obtuvieron 2,96·10⁶ kg CO₂ equivalente - excluyendo las emisiones a largo plazo.

En la Figura 6 se representa los impactos derivados de diferentes subconjuntos en la etapa de producción en el proceso de extracción de áridos naturales.

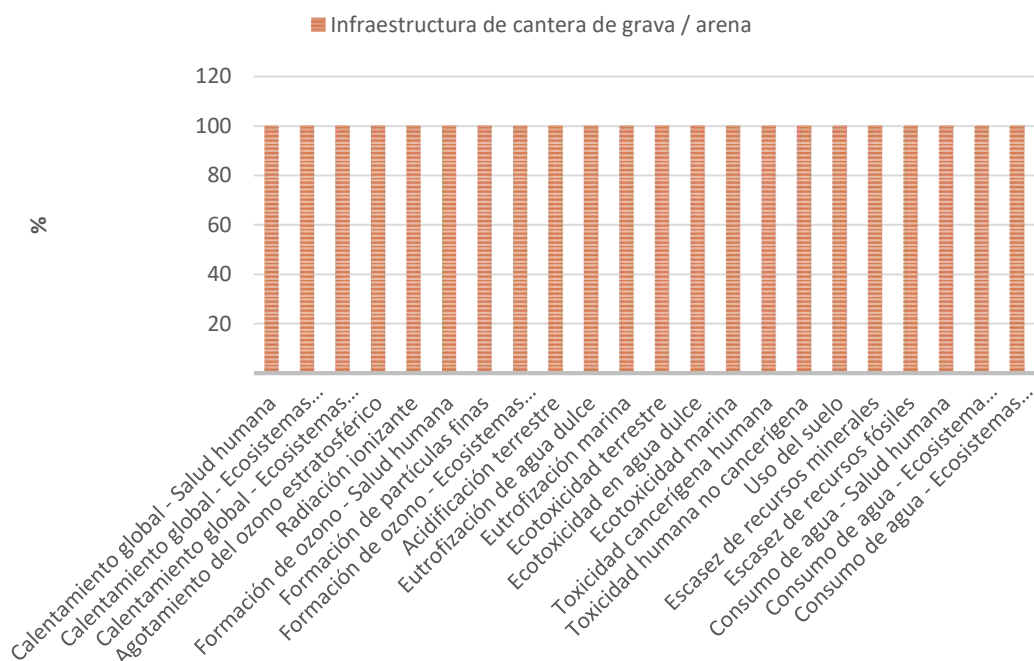


Figura 6. CO₂ equivalente normalizados generado en una infraestructura de áridos naturales

Nota Fuente: Adaptado de software SimaPro.

Con cada categoría de impacto escalada al 100% (ya que cada categoría se basa en unidades diferentes de medida), no resulta intuitivo saber qué partes del proceso tienen un mayor impacto ambiental. Para obtener una escala de medición más útil se emplea el procedimiento de normalización, que se constituye como un paso opcional en la evaluación de impacto y puede considerarse como una evaluación comparativa en base a los efectos ambientales causados por una persona europea promedio en un año.

La normalización sólo revela qué efectos son grandes o pequeños en términos relativos. No profundiza sobre la importancia relativa de estos. En la Figura 7 se muestra la ponderación, como resultado de aplicar un factor de ponderación a cada uno de los resultados de normalización. No obstante, la ponderación se constituye como análisis subjetivo, por lo que no se puede comparar con otros productos.

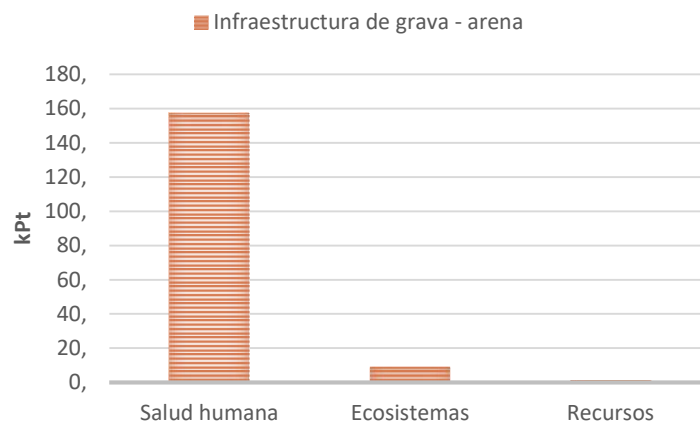


Figura 7. CO₂ equivalente ponderado generado en una infraestructura de áridos naturales

Nota Fuente: Adaptado de software SimaPro.

Los principales impactos que generan la extracción de minerales naturales suponen la alteración del hábitat y la generación de polvo en las operaciones de obtención y transporte de los materiales. El uso de maquinaria pesada se traduce en un consumo de combustible importante que incrementa las emisiones de CO₂ a la atmósfera. **Estas emisiones tienen un valor de 2,15 kg CO₂ por cada tonelada de árido extraído para canteras graníticas del norte de España** (Mel Fraga, 2017).

La presión social y legislativa ha duplicado el aumento de la distancia entre las canteras y los puntos de suministro, lo que ha supuesto un incremento de las emisiones de CO₂ por el transporte del material en los últimos años (Escavy, Herrero, Lopez-Acevedo, & Trigos, 2022). Si se considera que un vehículo articulado con una capacidad de carga útil de 25 toneladas consume 35 litros cada 100 km, se puede estimar una capacidad aproximada de 12,5 m³. Teniendo en cuenta que el peso del NFU puede ser un 70% más ligero que un árido convencional, podría reducirse el consumo de combustible en un 60%, lo que supondría la emisión de 58,24 Kg de CO₂ menos a la atmósfera por cada 100 km.

Respecto al NFU, en el informe anual de SIGNUS (2017) se cuantificaron 13.037,29 t/año de CO₂ equivalente al transporte de los NFU desde los puntos de generación a las plantas de clasificación y transformación; otros transportes, como viajes de empleados, etc., y el consumo energético en las instalaciones de transformación (SIGNUS Ecovalor, 2009). Si para ese mismo año, el informe anual de SIGNUS (2017) (Salud et al., n.d.), indicó un total de 186.526 t de subproducto procesado, esto implicaría que aproximadamente **69,44 kg de CO₂ se emitieron a la atmósfera por cada tonelada de NFU gestionado**.

Con el fin de argumentar los datos disponibles se procede a determinar las emisiones de CO₂ que se producen a partir de los consumos que requiere cada una de las fases de triturado de los NFU, según se indica en la Tabla 3 .

Tabla 3. Energía empleada para el tratamiento del NFU.

Proceso	Energía (kW/h)	Capacidad tn/hora
<i>Triturador</i>	160	5 a 15
<i>Separador magnético</i>	90	5 a 15
<i>Pre-granulador</i>	160	3 a 10
<i>Separador ciclónico</i>	90	3 a 10
<i>Separador magnético</i>	90	5 a 15
<i>Granulador</i>	110	0,6

<i>Separador magnético</i>	90	5 a 15
<i>Tamizadora</i>	90	5 a 15
<i>Tolva almacenamiento</i>	90	5 a 15

Nota Fuente: Adaptado de Plan de negocio planta de reciclado de neumáticos fuera de uso (Carballo, Maya, Domínguez, & Píriz, 2007) .

Para el tratamiento de 1 tn de NFU, se emplean como media estimada 17,50 kWh, lo que supone una emisión de 5,19 Kg de CO₂ emitidos a la atmósfera. Por lo tanto, sólo el 3% de las emisiones totales generadas por el sistema de gestión, estarían vinculadas al tratamiento del material.

Se hace imprescindible mejorar por parte del sistema de gestión la eficiencia del proceso, implementando algunas medidas de mejora para compensar estas emisiones de CO₂ a nivel interno, además de contribuir a la mejora de la eficiencia de la maquinaria disponible para el procesamiento de los neumáticos y pasar a un modelo de autoconsumo eléctrico mediante la instalación de módulos fotovoltaicos o por consumo de energía verde certificada.

Por lo tanto, comparar las emisiones de CO₂ emitidas a la atmósfera en los procesos de obtención del árido convencional y el NFU no resulta cuantitativo al no existir estudios fiables que consideren los mismos parámetros necesarios para la gestión de ambos materiales.

4.3 PROPIEDADES GEOMÉTRICAS, MECÁNICAS Y DURABILIDAD DEL NFU

4.3.1 Objetivos de la campaña de ensayos

Los datos preliminares desarrollados en la primera etapa de estudio se centran en las siguientes propiedades fundamentales que se emplean en el diseño de aplicaciones con NFU: peso específico de las partículas (γ_d , γ_{sat}), densidad seca (p_d), módulo edométrico (E_m), permeabilidad de las partículas (K) y los parámetros efectivos de corte como la cohesión (c') y el ángulo de rozamiento interno (Φ'). En estos parámetros se considera la importancia de las partículas a partir de un estudio granulométrico y la interpretación de los resultados en función de los procedimientos llevados a cabo.

La caracterización del material, se llevó a cabo mediante una campaña de ensayos en el laboratorio de Mecánica del Suelo, en la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Sevilla (US). Los equipos empleados en la US, se habían empleado originalmente para suelos convencionales, y no se llevaron a cabo adaptaciones en los mismos para los ensayos con granulado de neumático, considerándose en la medida de lo posible el tamaño de la partícula máximo para cada equipo y en caso contrario comparando los resultados obtenidos entre las distintas muestras.

Recientemente se han actualizado una serie de Normas ISO 17892 bajo el título general *Investigación y ensayos geotécnicos*. Ensayos de laboratorio de suelos, cuyos documentos principales se enumeran a continuación:

- Parte 1: Determinación de la humedad
- Parte 2: Determinación de la densidad aparente
- Parte 3: Determinación de la densidad de las partículas
- Parte 4: Determinación de la granulometría
- Parte 5: Ensayo con edómetro de carga incremental
- Parte 6: Ensayo por caída de cono

- Parte 7: Ensayo a compresión no confinada de suelos de grano fino
- Parte 8: Ensayo triaxial no drenado no confinado
- Parte 9: Ensayo de compresión triaxial consolidado en suelos saturados de agua
- Parte 10: Ensayos de corte directo
- Parte 11: Determinación de la permeabilidad mediante caída constante del nivel piezométrico
- Parte 12: Determinación de los límites de Atterberg

La densidad seca se obtuvo a partir del ensayo de compactación Próctor, empleando las principales energías de compactación (Próctor estándar y Próctor modificado). Los parámetros de corte se obtuvieron de ensayos de corte directo, analizando los resultados para condiciones consolidado-drenado y no consolidado no drenado. Como el NFU es un material deformable (debido principalmente al número de poros entre sus partículas) se consideró la máxima resistencia de la muestra cuando se alcanzó un desplazamiento correspondiente al 15% del máximo de la dimensión de la caja de corte (10 mm), al no observarse un pico claro para ensayos de corte directo. Los datos obtenidos para el módulo edométrico (Em) se obtuvieron por la restricción en la dirección radial de la muestra. Este parámetro sirve para caracterizar la compresibilidad de los NFU en muestras de poco espesor, como podrían ser estratos de material de limpieza en cimientos.

La caracterización del granulado de NFU en un tamaño de partícula menor a 12 mm ha sido poco analizada para las aplicaciones geotécnicas propuestas en esta investigación, donde el tamaño máximo de partícula es de 7 mm. Normalmente el rango de partícula oscila entre 12 y 300 mm en la bibliografía encontrada para este tipo de aplicaciones, hecho que denota el grado de innovación.

Dentro de este subcapítulo, se han incluido en algunos de los apartados una tabla resumen con las principales referencias bibliográficas sobre los parámetros geotécnicos analizados, de forma que se permita verificar la validez de los resultados obtenidos.

4.3.2 Propiedades geométricas

4.3.2.1 Granulometría

Según la terminología descrita en la norma ASTM D6279-20, el huso granulométrico de partida se correspondería con “rubber fines”, que son aquellas partículas por debajo de los “tire chips” con una dimensión entre 12 y 50 mm de tamaño, y por debajo del “tire derived aggregate” (TDA), piezas con una forma geométrica entre los 12 y 305 mm.

En la normativa americana se dan las especificaciones del material en función de dos granulometrías acotadas. El TDA tipo A debe tener una dimensión máxima en cualquier dirección de 200 mm, mientras el TDA tipo B puede tener una máxima dimensión de 450 mm. El uso de este último tamaño se centra en las obras de terraplenes, mientras que el primero como material de relleno en distintas construcciones.

Sobre el estudio de la influencia del huso granulométrico del NFU en los resultados de laboratorio para su aplicación en obras de ingeniería, se ha considerado la validez de emplear valores característicos derivados de un TDA más pequeño para representar el comportamiento del TDA de mayor tamaño (Wartman, Asce, Natale, Strenk, & Asce, 2007).

Las muestras aportadas por las empresas de gestión se indican en la siguiente Tabla 4. Con el fin de mejorar la granulometría de las muestras de mayor tamaño se aportó un porcentaje de granulometría menor.

Tabla 4. Granulometría de las muestras analizadas por tamaño y designación

Designación	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S8
<i>Tamaño (mm)</i>	0,0-0,8	0,6-2,0	2,0-4,0	2,0-7,0	90% S4 + 10% S2	50% S4 + 50% S2	33% S4 + 33% S2 + 33% S1
<i>Proveedor</i>	RMD-RE	RMD-RE	RE	RMD	RMD	RMD	RMD

De las muestras facilitadas por RMD y RENEAN sólo **se caracterizaron aquellas con un tamaño de partícula igual o inferior a 7 mm**, ya que los equipos de ensayo disponible no están adaptados para un tamaño de partícula superior.

En la Figura 8, se incluyen las curvas granulométricas para los tipos TDA tipo A y B definidos en la norma ASTM D6270-20, así como el huso granulométrico de partida con el que trabaja esta investigación.

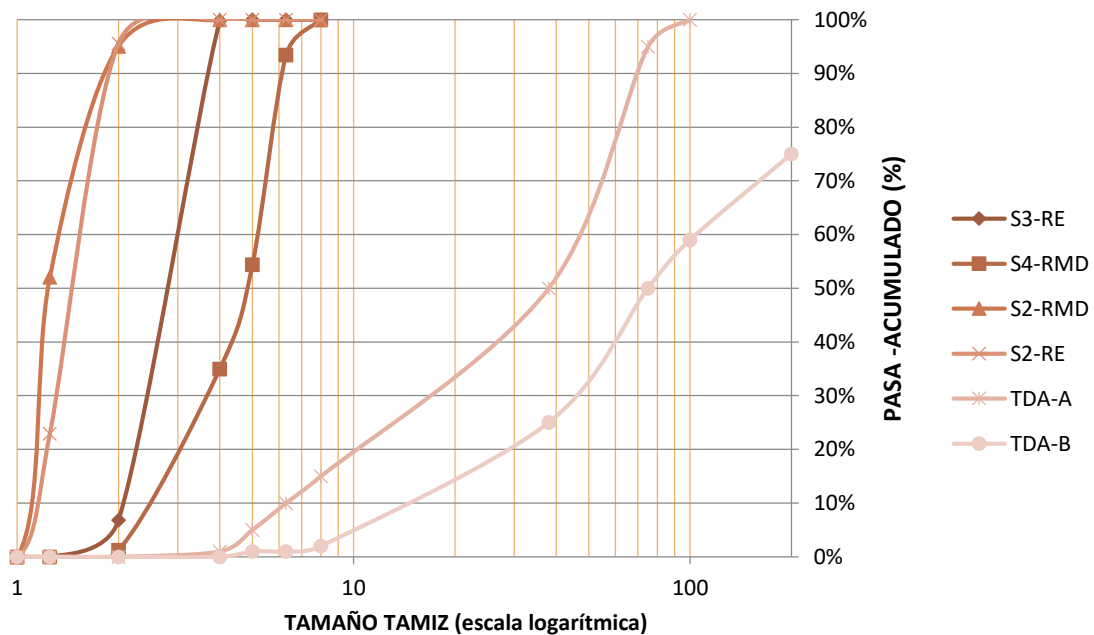


Figura 8. Husos granulométricos de partida y consideraciones ASTM D6270-20

Nota Fuente: Ensayos realizados grupo investigación GRENECO. Elaboración propia

La curva granulométrica de cada una de las muestras presenta un aspecto uniforme al estar muy acotado el tamaño de partícula suministrado. La granulometría disponible en esta etapa es el resultado de un proceso de trituración mayor que facilita la separación de los compuestos del NFU en caucho, acero y una parte importante de textil.

El análisis granulométrico de Fuller permite mezclar áridos (gruesos y finos) para confeccionar la curva ideal granulométrica. En este caso de estudio, el **tamaño máximo es de 7 mm**. Se considera la mezcla de muestra S2 y S4 al presentar las mayores diferencias de tamaño entre ellas.

Para resolver la mezcla de árido por este método el proceso es el siguiente:

- Calcular los módulos granulométricos de todos los husos intervinientes.
- Calcular los módulos granulométricos de las parábolas de Fuller.

El módulo granulométrico para la muestra "S2" es de 4,81, mientras que el módulo granulométrico "S4" es de 7,10. Por último, el módulo granulométrico de la parábola de Fuller para tamaño máximo D8 es de 5,71.

Una vez se resuelve el sistema de las dos ecuaciones con las dos incógnitas, correspondientes al porcentaje que debemos mezclar, se obtiene que para la muestra "S2" es necesario mezclar el 60,26% y para la muestra "S4" el 39,73%.

El resultado gráfico se expone a continuación en la Figura 9, donde se incluyen el % que pasa para los dos husos granulométricos disponibles (M1 y M4), para la curva ideal de Fuller y el resultado de la mezcla (% que pasa).

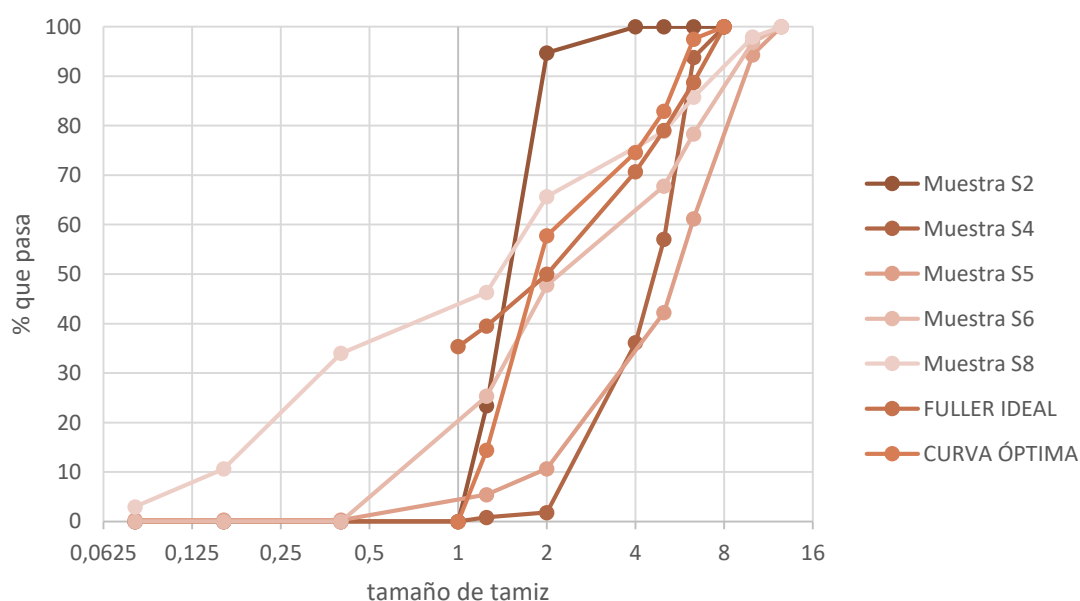


Figura 9. Tanto por ciento que pasa por cada tamiz y análisis Fuller ideal.

La Tabla 5 expone los valores obtenidos para los ensayos realizados en base a las muestras enumeradas anteriormente.

La relación de tamaño de muestra se define como el diámetro medio de la muestra dividido por el tamaño máximo de partícula. A medida que la relación de tamaño de la muestra se acerca a seis, los efectos del tamaño de la muestra se vuelven insignificantes.

Tabla 5. Resultados de caracterización geométrica de las muestras de ensayo

M	Tamaño (mm)	D₁₀	D₃₀	D₆₀	C_u	C_c	CLASIFICACIÓN SUCS
S1	≥ 0,8	0,18	0,40	0,60	3,33	1,48	Arena mal graduada (SP), pasa el 7% de finos del tamiz nº 200 (0,08 mm)
S2	0,6 – 2,0	1,10	1,20	1,60	1,45	0,82	Arena mal graduada (SP).
S3	2,0 – 4,0	2,00	2,40	3,00	1,50	0,96	Arena mal graduada (SP).
S4	2,0 – 7,0	2,40	3,70	5,00	2,08	1,14	Grava mal graduada (GP).
S5	90% S4+ 10% S2	2,00	3,00	5,00	2,50	0,90	Grava mal graduada (GP).
S6	50% S4 + 50% S2	1,10	1,50	3,00	2,73	0,68	Arena mal graduada (SP).
S7	33% S4 + 33% ≥ 0,8	0,38	0,85	1,80	4,74	1,06	Arena bien graduada (SW) (C _u >4; C _c entre 1-3)

Nota Fuente: Ensayos realizados grupo investigación GRENECO. **Fuente:** (Elizabeth Contreras Marín, 2021).

La muestra S7 se clasifica como bien graduada, este hecho confirma que la combinación de granulometrías de menor tamaño mejora el comportamiento de ordenación de las partículas, en sintonía para los valores obtenidos a partir de la curva de Fuller.

4.3.3 Propiedades mecánicas

4.3.3.1 Humedad inicial y absorción de agua

La Tabla 6 resume las fuentes principales que se han encontrado hasta el momento sobre las propiedades del NFU respecto a la humedad inicial y su capacidad de absorción de agua. El porcentaje incluido se refiere al peso total de la muestra.

Tabla 6. Estado del arte sobre humedad inicial y absorción

Fuente bibliográfica	Tamaño partícula (mm)	Norma de cálculo	Humedad inicial (%)	Absorción (%)
(ASTM D 6270, 2017)	12 – 305 (TDA)	ASTM C 127	--	--
(Yi Dong, John S. McCartney, 2016)	20 – 1	ASTM C 128	--	3,85
(Toledo & Lloret, 2009)	100 – 70	--	0,5 – 1,5	3,0 – 7,0
(I., 1993)	50,8 – 101,6	--	--	1,0 – 2,5
(Tweedie et al., 1998)	76,2	AASHTO 85-85	--	2,0 – 4,3

Seguendo el criterio de muestras de suelo, la determinación de la humedad inicial de la muestra se llevó a cabo a partir de la norma UNE-EN ISO 17892-1 “Determinación de la humedad”. Según esta norma la temperatura de la estufa de desecación debe estar comprendida entre 105 y 110°C, pesando las muestras una hora después de sacarlas de la estufa. La Ecuación 1 determina la humedad inicial según se indica:

$$w (\%) = \frac{P-P_{\text{seco}}}{P_{\text{seco}}} \times 100 \quad ; \text{Ecuación 1}$$

Suponiendo el NFU como áridos ligeros según la norma UNE-EN 13055-2 “Áridos ligeros. Parte 2: Áridos ligeros para mezclas bituminosas, tratamientos superficiales y aplicaciones en capas tratadas y no tratadas”, nos remite a la norma UNE EN 1097-5 *Determinación del contenido de agua por secado en estufa*. En el Anexo A de esta norma se indica que la temperatura de la estufa podrá variar en función de las recomendaciones dadas por el fabricante, de forma que no se produzca una variación en la masa por una causa distinta a la pérdida de agua.

La diferencia principal con la norma para suelos es el volumen de la muestra de ensayo, ya que para los áridos ligeros con un tamaño de partícula menor de 8 mm, el volumen de la muestra de ensayo debe ser un litro. Mientras que, para el caso de la norma de suelo, la masa mínima de la muestra de ensayo varía en función del tamaño máximo del grano. En base a ello, para un tamaño máximo de 10 mm (en este artículo 7 mm), necesitamos una masa mínima de 500 gr para realizar el ensayo.

El pesado de la muestra tras sacarlo de la estufa debe ser inmediato, a diferencia de los suelos, que se deben pesar una hora después. La ecuación para determinar el porcentaje de humedad es la misma en ambas normas, según la cual se obtiene el porcentaje de humedad dividiendo la masa de agua entre la masa de la muestra.

Para determinar la capacidad de absorción de las partículas se recurrió a la norma UNE EN 1097-6 *Densidad de las partículas y absorción de agua*. Anexo C, en base a las recomendaciones de la norma UNE

13055-2, de la misma forma que lo han hecho otros autores para trabajar con áridos ligeros de tamaño de partícula superior a 4 mm (Concepción & Menor, 2015); (“Guía Técnica Arlita,” 2018).

Debido a la restricción del tamaño de la partícula, se analizó la absorción del mayor tamaño de partícula, sometiendo a la muestra de ensayo a distintos tiempos de secado en estufa a una temperatura de 80°, según se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Capacidad de absorción según norma UNE EN 1907-6 Anexo C para muestras sin mezclar

Nº ensayo	Calentamiento en estufa (horas)	M	24 horas	55 min	5 min
1	0	S4	0.7219	0.7194	0.7187
2	24	S4	0.7354	0.7352	0.7342
3	48	S4	0.7390	0.7378	0.7357

Nota Fuente: Ensayos realizados grupo investigación GRENECO. Elaboración propia.

Los resultados indican que el incremento de absorción en la muestra es del 2,49% respecto al total, por lo que se considera que el tiempo de calentamiento no altera las propiedades de absorción del granulado, ya que el sulfuro, uno de los componentes de los granulados de NFU se utiliza para reticular las cadenas de polímero dentro del caucho y para endurecer y prevenir la deformación excesiva a temperaturas elevadas.

No se observaron cambios en el peso específico del material tras someterlo a distintos periodos de tiempo de secado a una temperatura de 110°, de forma que no se modificaron sus propiedades geométricas ni físicas (Okur & Umu, 2018).

La principal conclusión que se obtuvo fue la capacidad de retención de agua en la superficie de las partículas al estar sumergidas un periodo de tiempo, lo que puede alterar los resultados de las pruebas llevadas a cabo. De ello se deduce que la capacidad de absorción de agua se debe a la influencia del tamaño de las partículas y por ende de la superficie en contacto con el agua.

4.3.3.2 Peso específico y densidad aparente de las partículas

En la Tabla 8 se exponen los principales valores obtenidos de la bibliografía analizada, según el cual se deduce que el peso específico del granulado de neumático es del orden de 1/3 inferior si se compara con árido convencional. La similitud con otro árido ligero como la arlita, indica un valor del orden del 1/5 inferior si se compara de nuevo con árido convencional.

Tabla 8. Estado del arte peso específico partículas de NFU y Arlita

Fuente bibliográfica	Norma de cálculo	Peso específico (g/cm³)	Tamaño partícula (mm)
ASTM D6270 – 2017	ASTM C 127	--	12 – 305 (TDA)
(Wartman et al., 2007)	ASTM C 217	1,31	30,0
(Feng & Sutter, 2000)	ASTM D 854	1,11	10 – 4
(Chenari & Poursalimi, 2017)	ASTM D 854	0,91	40 – 10 – 1
(Yi Dong, John S. McCartney, 2016)	ASTM D 854	1,14	20 – 1
(Okur & Umu, 2018)	ASTM D 854	1,11	4 – 100

(Mohamad, Latifi, Marto, Moradim, & Abad, 2013)	ASTM D 854 – 83	1,16	1 – 4
(Anvari & Shooshpasha, 2014)	ASTM D 854	1,34	4 – 9
(Ministerio de Fomento et al., 2013)	--	1,15	0, 8
(I., 1993)	--	0,88 – 1,13	12,7 – 50,8
(S. Li & Li, 2018)	ASTM C 127 – 07	1,15	0,5 – 4,5
("Guía Técnica Arlita," 2018)	UNE EN 1097-6	0,65	10,0 – 20,0

Humphrey (1992) descubrió que las partículas de NFU con filamentos de acero, tenían un peso específico mayor que aquellos granulados en los que el acero era casi inexistente. La experiencia de las fábricas de reciclaje sugiere que la trituración repetida de las partículas, así como las condiciones de la maquinaria, pueden contribuir a la cantidad y longitud de los filamentos de acero expuestos.

El peso específico del granulado de neumático es ligeramente superior al del agua y depende del contenido de tiras de acero. En este caso, al trabajar con un tamaño inferior, se eliminan las trazas de acero, observándose sólo restos de textil en la muestra S4. La Figura 10 muestra algunas etapas del proceso llevado a cabo para la obtención de la densidad aparente y el peso específico de las partículas de NFU.



Figura 10. Proceso ensayo peso específico y densidad aparente de las partículas en el laboratorio, muestra S4, pesado muestra S2 y eliminación de burbujas muestra S4.

Los ensayos llevados a cabo por el polvo de neumático no permitieron arrojar resultados fiables, al no poder estimar la pérdida del material que se producía durante la ejecución del ensayo, debido a la flotabilidad del material por su baja densidad. Los resultados del resto de muestras se indican en la Tabla 9.

Tabla 9 .Resultado densidad partículas (p_α); secadas en estufa (p_{rd}); saturadas y secadas superficialmente (p_{ssd}); absorción de agua (WA24) de los granulados de NFU's.

M	M4(g)	M3(g)	M2(g)	M1(g)	p_α (g/cm³)	p_{rd} (g/cm³)	p_{ssd} (g/cm³)	WA24 (%)
S2	22,51	146,86	148,51	23,61	1,08	1,02	1,07	4,89
	22,51	144,88	146,55	23,05	1,08	1,05	1,08	2,40
S3	22,51	146,73	149,77	25,12	1,15	1,02	1,14	11,59
	22,51	145,65	148,39	25,54	1,14	0,99	1,12	13,46
S4	50,26	425,30	425,48	52,98	1,00	0,95	1,00	5,41
	50,26	405,28	405,49	53,70	1,00	0,94	1,00	6,84

S5	50	419,85	424,20	54,15	1,09	1,00	1,09	8,30
S6	50	399,15	402,91	53,16	1,08	1,01	1,07	6,32
	40	419,76	422,25	42,70	1,06	0,99	1,06	6,75
	50	399,30	403,29	52,98	1,08	1,02	1,08	5,96
S7	49,83	399,30	400,56	55,77	1,02	0,91	1,02	11,92
	49,96	419,76	422,18	54,58	1,05	0,96	1,04	9,25
	49,86	399,30	401,90	53,66	1,05	0,97	1,05	7,62

Nota: Ensayos realizados grupo investigación. **Fuente:** Elizabeth Contreras Marín, 2021.

La densidad de las partículas de NFU se encuentra en el rango de 1,00 a 1,15 g/cm³, encontrándose poca dispersión en los datos.

En suelos interesa conocer la densidad aparente del conjunto, que puede obtenerse por procedimientos similares según la norma UNE EN 1097-3 y la norma UNE EN 1789-2. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Densidad aparente según UNE EN 1097-3 y UNE EN 1789-2

M	Densidad aparente del conjunto		UNE-EN 1097-3
	UNE-EN 1097-3	UNE-EN 17982-2 (Kg/m³)	
S2		454,00	0,55
S3		450,73	0,53
S4		433,38	0,53

Nota: Ensayos realizados grupo investigación GRENECO. **Fuente:** elaboración propia

Al contar con muestras con una granulometría similar y con una cantidad de acero nula, los valores de densidad aparente del conjunto no son elevados. El tamaño de granulado con el que se trabaja influye en la distribución y colocación de los trozos y por lo tanto, en el volumen de la muestra, directamente relacionado con esta propiedad.

La norma UNE EN 1097-3 permite obtener además el porcentaje volumétrico, según la Ecuación 2:

$$v = \frac{pp - pb}{pp} ; \text{Ecuación 2}$$

Siendo; “pp” la densidad de las partículas tras secado en estufa (UNE EN 1097-6) y “pb”, la densidad aparente del conjunto. De ello, se deduce que por esta expresión obtenemos la porosidad del material “n”, que es igual al volumen de huecos entre el volumen total de la muestra.



Figura 11. Proceso ensayo densidad aparente del conjunto de las partículas en el laboratorio.

Según el procedimiento mostrado en la Figura 11, Se estimó que la porosidad del NFU con un tamaño nominal de 50,80 mm era de aproximadamente 0,60; mientras que la porosidad de roca triturada para un tamaño entre 19,05 y 38,10 mm era de aproximadamente 0,40. **Esto indica que el NFU ofrece una porosidad comparable o mayor que la piedra triturada** (GeoSyntec Consultants, 2008).

4.3.3.3 Densidad seca. Ensayo de compactación Próctor Normal y Modificado.

La densidad seca compactada de los fragmentos de neumáticos es aproximadamente 1/3 respecto a la densidad seca compactada del suelo típico, lo que hace que los fragmentos de NFU se presenten como una alternativa atractiva para rellenos de terraplenes obre suelos compresibles débiles, como muestra la bibliografía analizada en la Tabla 11.

Tabla 11. Estado del arte densidad seca de las partículas NFU

Fuente bibliográfica	Norma de cálculo	Energía de compactación	Peso compactado seco (kN/m³)	Tamaño partícula medio (mm)
(ASTM D 6270, 2017)	D 698 (60%) D1557 (100%)	0,036 kg-cm/cm³ 0,27 kg-cm/cm³	--	51 – 75
(Wartman et al., 2007)	ASTM D1557	0,27 kg-cm/cm³	5,8 – 6,2	30
(Chenari & Poursalimi, 2017)	ASTM D4253	--	16,1	4 – 400
(McCartney et al., 2017)	ASTM D1557	0,27 kg-cm/cm³	6,01 – 8,04	150 – 300
(Invertimos, 2013)	UNE EN 103-500	6,1 Kg-cm/cm³	6,3 – 8,4	75 – 350
(Kowalska, 2016)	UNE EN 103-500	6,1 Kg-cm/cm³	6,1 – 5,9	0,1 - 40

De forma general, se concluyó que el proceso de compactación del granulado de neumático se lograba mejor mediante la aplicación de presión en lugar de vibraciones (Park et al., 2003).

Se llevaron a cabo dos series de ensayos, la primera con cada una de las granulometrías por separado, es decir, muestras S1; S2; S3 y S4, a las que se añadió distintos porcentajes de agua para observar el efecto en el peso específico en base al contenido de humedad, y la segunda batería de ensayos se realizó con las muestras que mezclaban distinta granulometría, concretamente S5 y S6 igualmente para varios contenidos de humedad, según se indica en la Tabla 12; Tabla 13 y Tabla 14 .

Tabla 12. Resultados ensayos Próctor Estándar muestra S2 secado en horno a 110°

S2 – TEMPERATURA DE SECADO 110°

<i>% agua añadida</i>	5%	15%	25%	35%	45%	50%	60%
<i>Densidad aparente (kN/m³)</i>	6,707	6,323	6,671	6,872	7,411	7,652	9,201
<i>Peso esp. seco (kN/m³)</i>	6,580	5,790	5,770	5,650	5,460	5,380	6,110
<i>Humedad final</i>	1,987	9,187	15,545	21,550	35,650	42,234	53,110

Nota: Resultados obtenidos grupo investigación GRENECO. **Fuente:** Elaboración propia.

Tabla 13. Resultados ensayos Próctor Estándar muestra S3 secado en horno a 110°

S3 – TEMPERATURA DE SECADO 110°

<i>% agua añadida</i>	5%	15%	25%	35%	45%	50%	60%
<i>Densidad aparente (kN/m³)</i>	6,255	6,513	6,803	7,844	8,183	8,837	8,872
<i>Peso esp. seco (kN/m³)</i>	5,98	5,74	5,80	6,44	5,87	6,29	5,600
<i>Humedad final</i>	4,54	13,37	17,23	21,75	39,38	40,46	58,39

Nota: Resultados obtenidos grupo investigación GRENECO. **Fuente:** Elaboración propia.

Tabla 14. Resultados ensayos Próctor Estándar muestra S4 secado en horno a 110°

S4 – TEMPERATURA DE SECADO 110°

<i>% agua añadida</i>	5%	15%	25%	35%	45%	50%	60%
<i>Densidad aparente (kN/m³)</i>	6,377	6,635	7,349	7,911	7,913	8,711	8,920
<i>Peso esp. seco (kN/m³)</i>	5,94	5,78	6,48	4,82	4,85	5,552	7,240
<i>Humedad final</i>	7,38	14,83	13,40	22,12	20,56	27,01	23,31

Nota: Resultados obtenidos grupo investigación GRENECO. **Fuente:** Elaboración propia.

De los resultados obtenidos en las tablas anteriores se concluye que, a partir de una cierta cantidad de humedad, las partículas de mayor tamaño comprendidas por la muestra S4, presentaban mayor permeabilidad al permitir la circulación y evacuación del agua hasta la base del molde empleado en el ensayo Próctor, manteniéndose este parámetro constante como se aprecia para un 50 y 60 % de humedad respecto a las muestras de menor tamaño, como se aprecia en la Figura 12.



Figura 12. Ensayo de compactación Próctor normal según muestra S4.

Con el fin de determinar los efectos de la temperatura de secado en los resultados finales se realizó siguiendo el mismo procedimiento para la muestra S2, pero con un secado en horno a 60° según se indica en la Tabla 15.

Tabla 15. Resultados ensayos Próctor Estándar muestra S2 secado en horno a 60°

S2 – TEMPERATURA DE SECADO 60°

<i>% agua añadida</i>	5%	20%	30%	35%	45%	50%
<i>Densidad aparente (kN/m³)</i>	6,387	6,858	7,725	6,872	7,411	7,652
<i>Peso esp. seco (kN/m³)</i>	6,11	5,50	6,16	5,37	5,46	5,38
<i>Humedad final</i>	4,60	24,66	25,48	21,55	35,65	42,23

Nota: Resultados obtenidos grupo investigación GRENECO. **Fuente:** Elaboración propia.

Los resultados obtenidos en función de la temperatura de secado en el horno varían aproximadamente para la densidad seca y humedad en un valor no superior a 1,25%. Por lo que **se concluye que la temperatura de secado no es un factor relevante en este ensayo**. Al igual que ocurría en la obtención del peso específico.

Para determinar la influencia en la densidad seca que resulta de la combinación de dos de las granulometrías, siguiendo el procedimiento descrito para el ensayo Próctor Normal se calcularon las siguientes probetas, según indica la Tabla 16 y Tabla 17.

Tabla 16. Resultados ensayos Próctor Estándar muestra S5 secado en horno a 110°

S5 – TEMPERATURA DE SECADO 110°

% agua añadida	10%	10%	10%	25%	25%	25%
Densidad aparente (kN/m ³)	6,457	6,401	6,379	7,311	7,230	7,148
Peso esp. seco (kN/m ³)	6,100	6,000	5,990	6,640	6,550	5,830
Humedad final	5,780	6,680	6,470	10,09	10,430	22,530

Nota: Resultados obtenidos grupo investigación GRENECO. **Fuente:** Elaboración propia.

Tabla 17. Resultados ensayos Próctor Estándar muestra S6 secado en horno a 110°

S6 – TEMPERATURA DE SECADO 110°

% agua añadida	10%	10%	10%	25%	25%	25%
Densidad aparente (kN/m ³)	6,980	6,854	7,262	6,680	6,700	7,380
Peso esp. seco (kN/m ³)	6,450	6,380	6,570	6,210	6,180	5,860
Humedad final	8,240	7,430	10,480	7,440	8,400	25,911

Nota: Resultados obtenidos grupo investigación GRENECO. **Fuente:** Elaboración propia.

Por último, se determinó la influencia de la energía de compactación en el ensayo de compactación aplicando la energía del ensayo Próctor Modificado. La Tabla 18 incluye los resultados obtenidos para la muestra S5.

Tabla 18. Resultados ensayos Próctor Modificado muestra S5 secado en horno a 110°

S5 – TEMPERATURA DE SECADO 110°

% agua añadida	10%	10%	10%	25%	25%	25%
Densidad aparente (kN/m ³)	6,628	6,25	6,812	7,855	7,865	7,132
Peso esp. seco (kN/m ³)	6,030	6,250	6,240	6,750	6,850	6,080
Humedad final	9,830	9,200	9,190	16,330	14,850	17,210

Nota: Resultados obtenidos grupo investigación GRENECO. **Fuente:** Elaboración propia.

El incremento en la energía de compactación en un 76,95% respecto el Próctor Estándar al Próctor modificado, supuso un incremento de la densidad seca de menos del 4%, lo que indica el **pequeño efecto que supone incrementar la energía de compactación** al trabajar con granulado de NFU, como indican las pruebas realizadas conforme a la Figura 13.



Figura 13. Ensayo de compactación Próctor modificado según muestra S4.

La densificación asociada con la compresión inmediata elevará el peso unitario de TDA en aproximadamente un 10% sobre los valores compactados derivados del laboratorio y esto debe tenerse en cuenta en el diseño al calcular la consolidación de los suelos de cimentación subyacentes en una estructura de granulado de neumático (Joseph Wartman, 2007).

4.3.3.4 Permeabilidad

La capacidad de drenaje del NFU influye significativamente en la estabilidad de los terraplenes o estructuras de contención bajo condiciones saturadas, ya que contribuye en la generación de una excesiva presión de poro. Esta propiedad está directamente relacionada con el huso granulométrico con el que se trabaje, como se puede observar en la Tabla 19 que indica los resultados obtenidos de distintos autores que han analizado esta propiedad.

Tabla 19. Estado del arte permeabilidad de las partículas NFU

Referencia bibliográfica	Norma de cálculo	Permeabilidad (cm/s)	Composición (cm)
(Aderinlewo & Okine, 2009)	--	>23,5	NFU (--)
(I., 1993)	--	2,0 – 0,75	1,27– 5,08
(ASTM D 6270, 2017)	D 2434	4,9 – 59,3	0,5 – 5,10
(Kyser & Ravichandran, 2016)	--	2,48	3,00 – 2,10
(M. Sc. Thesis by Behzat Alp ATAPEK, 2008)	--	5,6 x 10 ⁻² 4,3 x 10 ⁻²	NFU (tire shreds) NFU (tire granulates)
(Park et al., 2003)	--	> 1	2,50 x 5,0 – 10 x 45
(Europea Feder, 2013)	UNE EN 103403	5 x 10 ⁻²	7,5 – 35
(Toledo & Lloret, 2009)	Ley de Darcy	4,33 x 10 ⁻¹	0,7
(“Guía Técnica Arlita,” 2018)	--	1- 10	1,00 – 2,00

Comparar las propiedades hidráulicas encontradas en la bibliografía es complejo debido a la gran cantidad de variables asociadas con las pruebas de conductividad hidráulica y las diferentes configuraciones y procedimientos seguidos por los diversos investigadores.

De acuerdo con la Tabla 20 se obtiene una alta permeabilidad para cada muestra, dependiendo este parámetro del nivel de compactación al que somete el NFU y por ende de la porosidad del material. Las probetas de NFU con grandes huecos, indican la tendencia del fluido a ser turbulento, lo que se traduce en una alta permeabilidad. Se calculan los coeficientes de permeabilidad para distintos gradientes hidráulicos y para la misma porosidad, ya que no se realizó compactación durante el ensayo en la probeta.

Tabla 20. Valores de permeabilidad para distintas granulometrías de NFU

Muestra	Caudal medio (ml/s)	Gradiente hidráulico (i)	Permeabilidad k (m/s)
S4	9,89	3	6,85 (10 ⁻⁴)
S5	9,81	3	6,85 (10 ⁻⁴)
S6	14,41	3	10 (10 ⁻⁴)
S7	31,81	6	11 (10 ⁻⁴)

Nota: Resultados obtenidos grupo investigación GRENECO. **Fuente:** Elaboración propia

De acuerdo con el CTE-DB-SE-C (v2019) el coeficiente de permeabilidad de las arenas limpias y mezcla de grava y arenas limpias es de 10⁻² - 10⁻⁵ m/s, por lo que observando los valores de permeabilidad obtenidos; se podrían considerar los NFU como suelos con drenaje adecuado para la implementación en obras de ingeniería.

Otro estudio realizó el cálculo de la permeabilidad bajo condiciones de carga de 40 kPa para una granulometría de 7,00 mm, donde se obtuvo una permeabilidad de 1·10⁻² m/s (Arroyo, San Martín, Olivella, & Saaltink, 2011), similar a los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio de la presente investigación. Otro aspecto relevante relacionado con esta propiedad es la carga de trabajo a la que está sometida la capa drenante durante su vida útil, relacionada directamente con la compresibilidad del material, ya que se reduce el porcentaje de huecos y por ende la conductividad hidráulica. Por lo tanto, debe prestarse especial atención al empleo del NFU como material de drenaje en zonas críticas sujetas a una sobrecarga elevada, ya que puede originarse una presión intersticial superior a la esperada.

(GeoSyntec Consultants, 2008) propuso las siguientes recomendaciones para su puesta en obra como capa drenante, por los valores de permeabilidad que presenta el material:

- En capas de drenaje del material el NFU puede colocarse directamente sobre una geomembrana gruesa de 1,5 mm de espesor, siempre que todos los filamentos de acero se hayan eliminado, o bien disponer de una capa de áridos convencionales de 15 cm de espesor aproximadamente.
- El NFU que presente acero expuesto puede colocarse directamente sobre una geomembrana de 1,5 mm de espesor en zonas de relleno sanitario solamente donde no se prevean cargas.
- O bien, se debe usar un geotextil no tejido (con una densidad de 0,406 kg/m², o una capa de árido convencional de 15 cm de espesor para reducir el potencial daño de las membranas.

Estas indicaciones implicarían un sobre coste de 5 €/m², que encarece la puesta en obra del material como capa drenante. No obstante, en caso de que el NFU se encuentre libre de filamentos de acero puede colocarse directamente sobre la geomembrana. Esto implica un ahorro importante en la puesta en obra directamente relacionado con el tamaño máximo de la partícula.

4.3.3.5 Parámetros de compresibilidad, hinchamiento y consolidación

Para la definición de las propiedades mecánicas más importantes de este material como son la compresibilidad y resistencia, se llevó a cabo una amplia campaña de ensayos de laboratorio conforme a la norma UNE-EN ISO 17892-5:2019 mediante ensayos edométricos para las muestras más representativas del conjunto de datos S5 y S6, las cuales consideran una proporción superior de granulado de mayor tamaño en la mezcla de distintas muestras.

La propiedad elástica que presenta este tipo de residuo se debe al componente principal del granulado, el caucho. Los ensayos edométricos realizados se llevaron a cabo con cargas escalonadas de 5; 10; 20; 50; 100; 200; 500 y 1000 kPa, empleando ciclos de carga-descarga completos y ciclos intermedios de descarga-recarga. En los ensayos desarrollados se aplicó una tensión normal máxima de 1000 KPa con probetas compactadas, con una energía de compactación del ensayo Próctor Normal.

De los parámetros de compresibilidad indicados en la norma ISO 17892-5:2017 se obtienen el módulo edométrico (E_m) y el índice de compresión (C_c). De los parámetros de hinchamiento indicados en la misma norma se calcula el índice de hinchamiento (C_s) igualmente para distintas probetas.

La realización de este tipo de ensayos permite obtener el Módulo Edométrico (E_m) que simula las condiciones a las que se encuentra sometido un material en capas profundas del terreno o capas finas como “material de limpieza”, según la Ecuación 3 .

$$E_m = \frac{\Delta \sigma_v}{\Delta \epsilon_v} \quad ; \text{Ecuación 3}$$

Donde, $\Delta \sigma_v$ es el incremento de tensión vertical considerado entre 100 y 200 Kpa y $\Delta \epsilon_v$ es el incremento de deformación volumétrica e igual al cambio en la deformación axial que ocurre entre estas tensiones. Otros autores (Park et al., 2003), aplicaron una tensión normal máxima a las probetas de 120 kPa, que corresponde a una tensión de sobrecarga ejercida por un relleno de viruta del neumático del suelo de aproximadamente 7 m de altura. Mientras otros investigadores han estudiado pruebas en tensiones superiores a los 700 kPa en equipos adaptados para piezas de NFU de mayor tamaño mezclados con arena (Jamshidi Chenari, Alaie, & Fatahi, 2019).

A medida que se incrementa la carga, las probetas de NFU se vuelven menos compresibles de forma progresiva y el módulo edométrico aumenta, lo que **implica que el suelo cada vez es más rígido**. Por lo tanto, aunque la deformación sea elevada, el módulo edométrico aumenta al producirse un aumento en la presión.

Su bajo módulo elástico, difiere de los suelos convencionales, cuya fase sólida es prácticamente incompresible. Dicha teoría se debe a la reducción del volumen de poros y a la deformación de las partículas de NFU. La inclusión de un 30% de arena en la matriz de los neumáticos granulados devuelve el módulo edométrico a un valor comparable a la arena pura (Edil, 2002).

El estudio de la consolidación primaria asume que la consolidación ocurre en una sola dimensión donde se produce un proceso en el que el índice de poros de una probeta disminuye como consecuencia de un aumento de la presión efectiva debido a un descenso en el exceso de presión intersticial bajo una carga total aplicada constante. Los datos obtenidos en los ensayos edométricos permiten definir una interpolación entre la deformación o el índice de vacíos y la tensión efectiva en una escala logarítmica. La pendiente de la interpolación es el índice de compresión (C_c), que se define como la pendiente entre la deformación vertical y la tensión vertical aplicada, mientras que el coeficiente de hinchamiento (C_s) constituye la media de la pendiente de la deformación vertical y la tensión vertical aplicada para ciclos de descarga-recarga. En la Tabla 21 se indican

los resultados obtenidos para estos parámetros para los tres equipos disponibles en el laboratorio denominado como “Edo 1”; “Edo 2” y “Edo 3”.

Tabla 21. Resultados ensayo edométrico con probetas sin compactar

MUESTRA	Índice de compresión (Cc)	Índice de hinchamiento (Cs)	Coef. De Poisson ν	Módulo Edométrico Em (kPa)	Módulo de Elasticidad E' (kPa)
Edo 1 S5 ciclo 1	0,37	0,14	0,38	1048,77	569,88
Edo 1 S5 ciclo 2	0,26	0,23	0,38	1536,10	834,69
Edo 1 S5 ciclo 3	0,26	0,24	0,38	1536,10	834,69
Edo 2 S5 ciclo 1	0,44	0,18	0,38	513,48	279,02
Edo 2 S5 ciclo 2	0,27	0,18	0,38	1934,24	1051,03
Edo 3 S5 ciclo 1	0,34	0,23	0,38	1610,31	875,02
Edo 3 S5 ciclo 2	0,32	0,32	0,38	2020,20	1097,75
Edo 3 S5 ciclo 3	0,21	0,21	0,38	1951,22	1060,26
Edo 1 S6 ciclo 1	0,36	0,26	0,38	1554,00	853,24
Edo 1 S6 ciclo 1	0,33	0,25	0,38	1557,63	855,23

Nota: Ensayos realizados grupo investigación GRENECO. **Fuente:** (Elizabeth Contreras Marín, 2021).

El coeficiente de Poisson cercano a 0,50 obtenido en los ensayos de (GeoSyntec Consultants, 2008), indica que el granulado se deforma a volumen constante. Como comparación el coeficiente de Poisson de áridos convencionales varía entre 0,15 y 0,45.

El índice de compresión noval es similar al de las arcillas de compresibilidad alta ($C_c \geq 0,25$), ya que el de las arenas oscila entre 0,02 a 0,03 para un estado denso. Esto indica que la rama de compresión noval es menos pronunciada y por tanto, se producen mayores deformaciones que en el caso de las arenas.

En la aplicación del NFU **el material debe haber sido sometido a una carga de preconsolidación**, con el objetivo de trabajar con el valor de **índice de hinchamiento (C_s) en la rama de descarga**, de forma que los **asientos se reduzcan del orden de cuatro veces**, en el caso de aplicar **el material en obra** sin ningún tipo de precarga debería emplearse **el índice de compresión (C_c)**, según resultados obtenidos de los ensayos realizados como muestra la Figura 14.



Figura 14. Ensayo de compresibilidad unidimensional según ISO 17892-5:2017

La compresibilidad instantánea es una propiedad importante de los NFU ya que puede afectar al diseño y mantenimiento de los sistemas pavimentados. La deformación ($\epsilon\%$) en los ensayos realizados para la muestra S5 en el edómetro 1 es del orden del 30% al 50% al final del primer ciclo de carga y segundo ciclo recarga respectivamente, para el incremento de 100 a 200 kPa, mientras que en el edómetro 2 la deformación se

mantiene constante en un 45% para los ciclos de carga y recarga de las presiones indicadas anteriormente, según la Tabla 22.

A partir del índice de compresión (C_c) se concluye que durante de la colocación del material, la deformación de una capa de NFU puede alcanzar un 35%, mientras que al considerar la recarga de la capa aplicando un sobrecarga en un rango de 100 a 200 kPa, la deformación del NFU se reduce a un 14% considerando el asiento obtenido en base al índice de hinchamiento (C_s).

Tabla 22. Resultados ensayo edométrico con probetas sin compactar

M	Escalón	Presión (kPa)	Asiento probeta (cm)	e	Def. unit. ϵ (%)
Edo 1 - S5	1 CICLO DE CARGA	200	0,609	-0,059	30,49
		1.000	0,995	-0,235	49,75
	1 CICLO DE DESCARGA	5	0,650	0,028	32,53
	2 CICLO RECARGA	200	1,035	-0,266	51,80
		1.000	1,289	-0,459	64,48
2 CICLO DESCARGA	10	0,710	-0,018	35,53	
Edo 2 - S5	1 CICLO DE CARGA	200	0,906	-0,142	45,31
		1.000	1,172	-0,351	58,64
	1 CICLO DE DESCARGA	5	0,594	0,102	29,74
	2 CICLO RECARGA	200	0,898	-0,136	44,90
		1.000	1,198	-0,371	59,90
2 CICLO DESCARGA	5	0,588	0,107	29,44	
Edo 3 - S5	1 CICLO DE CARGA	200	0,420	0,529	21,00
		1.000	0,649	0,307	32,45
	1 CICLO DE DESCARGA	5	0,159	0,781	7,98
	2 CICLO RECARGA	200	0,462	0,488	23,13
		1.000	0,775	0,186	38,75
2 CICLO DESCARGA	20	0,716	0,694	12,50	

Nota: Ensayos realizados grupo investigación GRENECO. **Fuente:** Elaboración propia.

Según indica la Tabla 23, para una tensión vertical de 5 kPa se anotó una deformación unitaria de 3,85 % a la hora de aplicarse la carga, mientras que a las 24 horas se había deformado 4,25 %, lo que supone un incremento del 10,38 %. A medida que se incrementa la carga, el incremento de la deformación unitaria decrece, como se muestra para una carga de 1000 kPa.

Tabla 23. Incremento de la deformación unitaria en función del tiempo.

M	Escalón	Presión	Def. unitaria % (1h)	Def. unitaria % (24h)	Incremento Def. unit. (%)
Edo 2 - S5	1º CICLO DE CARGA	5	3,85	4,25	10,38
		100	24,79	25,84	4,23
		1000	58,35	58,65	0,49

Nota: Ensayos realizados grupo investigación GRENECO. **Fuente:** Elaboración propia

Por lo tanto, la **compresión de las partículas no contribuye a la deformación inmediata de TDA en esfuerzos de bajos a intermedios**. Esto implica que, al menos durante los periodos de tiempo iniciales, la compresión del TDA se debe principalmente a la reducción de volumen de los poros y, en segundo lugar, a la compresión de las partículas de neumático (Wartman et al., 2007). La compresión inmediata resultante de cargas transitorias, como el tráfico, generalmente se puede abordar mediante el diseño de una capa de suelo

de sub-base de material suficiente que actúe como carga permanente, de forma que el granulado no se descargue completamente.

El espesor de dicha capa dependerá del nivel de rigidez que se quiera asegurar el firme, de forma que los asientos no superen los valores admisibles. La ecuación para el asiento de consolidación de un suelo sobreconsolidado, donde la presión efectiva final es menor que la presión de preconsolidación y por tanto los asientos será menores, puede determinarse por la Ecuación 4.

$$\delta_s = \frac{C_s}{1+e_0} H \log \left(\frac{\sigma'_{zf}}{\sigma'_{z0}} \right) ; \text{Ecuación 4}$$

Donde, δ_c asiento debido a la consolidación;

C_s índice de hinchamiento;

e_0 índice de vacíos inicial;

H altura de suelo consolidable;

σ_{zf} tensión vertical final y σ_{z0} es la tensión vertical inicial.

Para evaluar el factor del tiempo dentro de la consolidación es necesario evaluar el coeficiente de consolidación (C_v) para cada escalón de carga y descarga según la Ecuación 5.

$$T_v = \frac{C_v \cdot t}{H_s^2} ; \text{Ecuación 5}$$

Donde, T_v factor de tiempo en base a la consolidación alcanzada,

t tiempo en el que se produce la consolidación;

C_v coeficiente de consolidación según el escalón de carga/descarga considerado;

H_s es el máximo camino de drenaje en el 50% de la consolidación primaria, es decir, la mitad de la altura de la probeta en el instante t_{50} .

En esta investigación se empleará el método de ajuste de la curva con el logaritmo del tiempo o método de Casagrande. Los datos del ensayo de consolidación pueden ser utilizados para desarrollar una estimación de la velocidad y asientos totales y diferenciales de un terraplén. De forma que estos valores son fundamentales para la elección de la cimentación y también para evaluar la respuesta de la misma.

Tabla 24. Coeficiente de consolidación muestra S5 según edómetro 1

M	Escalón de carga/descarga	Logaritmo del tiempo C_v (mm^2/sg)	σ'_o (Kpa)	σ'_f (Kpa)
Edo 1 - S5	Carga 4 (1º ciclo)	0,031	50	100
	Carga 5 (1º ciclo)	0,031	100	200
	Descarga 1 (C_s)	0,0001	1.000	200
	Descarga 2 (C_s)	0,0012	200	50
	Descarga 3 (C_s)	0,003	50	10
	Carga 4 (2º ciclo)	0,015	50	100
	Carga 5 (2º ciclo)	0,106	100	200

Nota Fuente: Ensayos realizados grupo investigación GRENECO. Elaboración propia

Los valores obtenidos para la muestra S5 según la Tabla 24, en el segundo ciclo de carga para el material sobreconsolidado, muestran valores inferiores al de una arcilla sobreconsolidada para ese rango de sobrecargas

que normalmente se acerca en 0,2 mm²/sg. Lo que indica que el NFU prolongará el tiempo de consolidación en torno al doble de tiempo que necesita una arcilla sobreconsolidada para concluir el proceso de consolidación.

Dentro de los parámetros de consolidación, el coeficiente de compresión secundaria o consolidación secundaria, según la Ecuación 6, tiene lugar después de la primaria a consecuencia de procesos más complejos que el simple flujo de agua como pueden ser la viscosidad, materia orgánica, la fluencia o el agua unida mediante enlace químico. Por ello, el proceso en el que la compresión se produce, es independiente de la disipación del exceso de presión intersticial. En arenas el asiento secundario es imperceptible, pero puede llegar a ser muy importante para otros materiales como la turba o el material que nos ocupa al tratarse de un material altamente deformable.

$$C_{\alpha} = \frac{\delta H}{H_i} \cdot \frac{1}{\delta \log t}; \text{Ecuación 6}$$

Donde:

δH el cambio de la altura de la probeta en el tramo recto elegido de la curva de compresión-tiempo;

$\delta \log t$ el cambio del logaritmo del tiempo en el tramo recto elegido de la curva compresión-tiempo.

La deformación dependiente del tiempo es un parámetro común usado para definir la compresión secundaria en suelos granulares finos. Este índice de compresión varía desde 0,0010 (mezcla de 50% TDA y 50% arena por volumen) a 0,0074 (100% TDA) (GeoSyntec Consultants, 2008). El valor de C_{α} parece ser independiente del tamaño de partícula y el nivel de carga. Después de obtener C_{α} , el asiento dependiente del tiempo en un momento dado después de la colocación del relleno (ΔH_t) puede estimarse según la Ecuación 7.

$$\Delta H_t = H_0 \cdot C_{\alpha} \cdot \log \frac{t_2}{t_1}; \text{Ecuación 7}$$

Donde:

H_0 es el espesor inicial de la capa de TDA;

t_1 es el momento en el que empieza la compresión dependiente del tiempo;

t_2 es el tiempo en donde la magnitud de compresión dependiente del tiempo es estimada.

Tabla 25. Coeficiente de consolidación secundaria muestra S5 según edómetro 1

M	Escalón de recarga	Coef. compresión secundaria (C_α)	σ'_o (Kpa)	σ'_f (Kpa)
S5 EDO 1 (2º CICLO DE CARGA)	2	0,002 (NC)	20	50
	3	0,001 (SC)	50	100
	4	0,0007 (SC)	100	200
	5	0,001 (SC)	200	500

Nota: Ensayos realizados grupo investigación GRENECO. **Fuente:** Elaboración propia

Los valores típicos del índice de compresión secundaria, C_{α} son:

$C_{\alpha} < 0,001$ – suelo sobreconsolidado

$C_{\alpha} \geq 0,03$ – suelo muy blando o tipo orgánico

$0,02 < C_{\alpha} < 0,003$ – suelo normalmente consolidado

Para Terzaghi la consolidación termina al disiparse al completo la presión de poros; pero en realidad, los asientos continúan a una velocidad que es función del logaritmo del tiempo (el flujo de suelo es viscoso) e independiente del espesor de la capa de suelo.

El asiento producido por la consolidación secundaria se puede obtener mediante la Ecuación 8:

$$S_s = \frac{H_0}{1+e_0} C_\alpha \log\left(\frac{t}{t_{90}}\right); \text{Ecuación 8}$$

Donde: H_0 es la altura de consolidación media

e_0 es el índice inicial de vacíos

C_α es el índice secundario de compresión

Determinar la **presión de preconsolidación** es muy interesante para aquellos materiales con un comportamiento similar a las arcillas, de forma que las deformaciones que se producen en el suelo, se consideran inelásticas y sólo parcialmente reversibles. Además, marca el punto de partida de una alta compresibilidad, por lo que se determina la presión de sobrecarga más elevada que se puede ejercer en un suelo sin cambio de volumen.

De esta forma, si se aplica dicha presión de preconsolidación a los granulados de neumático antes de la ejecución del firme final en el proceso de compactación, obtendremos un estrato con las características de un suelo sobreconsolidado, de forma que esta será la máxima presión efectiva a la que se verá sometido el suelo, o en este caso el NFU en su historia geológica, evitándose asientos inesperados.

La metodología para obtener la presión de preconsolidación se basa en el Método de Casagrande, a partir de un gráfico semilogarítmico donde se indica el índice de poros final en el eje de ordenadas en escala lineal y en el eje de abscisas las presiones máximas (kPa) en escala logarítmica. La deformación plástica al descargar disminuye significativamente después del primer ciclo de carga según indica la Figura 10.

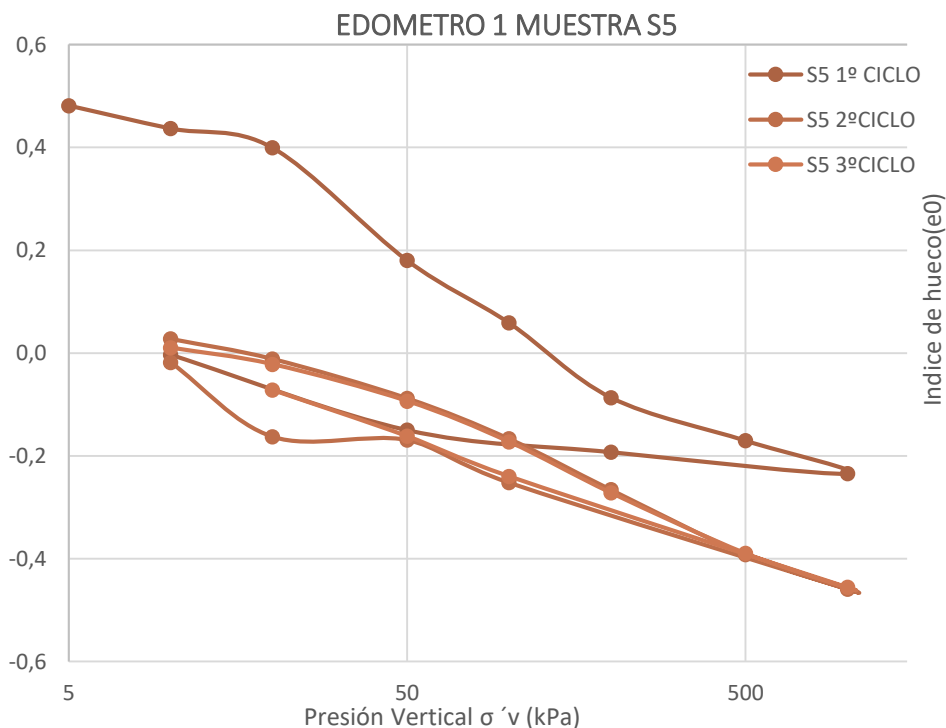


Figura 15. Presión de preconsolidación muestra S5 en edómetro 1

Según se observa la **deformación** de la Figura 15, la escala semilogarítmica **no aumenta proporcionalmente a medida que la presión aumenta**. Normalmente en los suelos convencionales, a medida que aumenta la tensión vertical efectiva los incrementos de deformación experimentados por la muestra son cada vez menores, es decir, la muestra cada vez es más rígida. La tensión de confinamiento aumenta con la tensión vertical efectiva y por tanto su comportamiento es más rígido. En el caso del NFU la probeta no se deforma proporcionalmente bajo el mismo incremento de carga, lo que muestra el carácter elástico del granulado de caucho (esto lo diferencia de los suelos convencionales).

Aunque una parte significativa de la tensión estática no es recuperable, se produce cierto rebote durante la descarga. Además, los ciclos de carga posteriores no producen mucha deformación permanente adicional.

La Tabla 26 muestra - para tres de los edómetros realizados con la muestra S5 - una aproximación de la presión de preconsolidación en base a la ecuación polinómica considerada para el desarrollo del método de Casagrande. Se concluye que los valores para la presión de preconsolidación en el NFU oscilan entre 113 a 164 kPa.

Tabla 26. Ecuaciones presión de preconsolidación muestra S5

M	Escalón de carga	Ec. Polinómica	R²	σ' PRECON. (kPa)
Edo 1 S5	S5 1º CICLO	$y = -1 \cdot 10^{-5}x^3 + 0,0007x^2 - 0,0174x + 0,5528$	1	163,14
Edo 2 S5	S5 1º CICLO	$y = -2 \cdot 10^{-7}x^3 + 0,00005x^2 - 0,0072x + 0,5282$	1	113,80
Edo 3 S5	S5 1º CICLO	$y = 1 \cdot 10^{-6}x^3 + 0,0002x^2 - 0,0002x + 0,9355$	1	63,89

Nota Fuente: Ensayos realizados grupo investigación GRENECO. Elaboración propia

La compresión de la primera parte de la curva se debe a la compresión del espacio entre las partículas, y la pronunciación de la segunda parte de la curva se debe a la deformación de las partículas (Meles, 2014) (Tweedie et al., 1998).

Por lo tanto, cuando las tensiones finales que actúen sobre un determinado punto del estrato de NFU considerado sean menores a las tensiones de preconsolidación indicadas, se considerará que el suelo se encuentra sobreconsolidado y que por tanto, se deberán considerar los parámetros de la rama de descarga/recarga (C_s).

Distintos casos han demostrado claramente que cuando se usan en aplicaciones geotécnicas los compuestos NFU, continúan deformándose durante períodos de tiempo que se extienden mucho más allá de la aplicación inicial de carga (Wartman et al., 2007).

4.3.3.6 Resistencia. Ensayos de corte directo

Se empleó un equipo de corte directo para el estudio del ángulo de rozamiento y cohesión de los NFU troceados. El equipo de corte directo cuenta con unas dimensiones de probeta cilíndrica de 30 mm de altura y diámetro de 50 mm, situándose el plano de corte a mitad de la altura de la probeta. La carga de compactación se aplicó manualmente por pesas, las cuales se apoyan en un marco de acero que contacta con la muestra a través de un marco superior. El esfuerzo tangencial es aplicado por medio de un motor eléctrico a través de un pistón, y dispone de un sistema de engranajes que permite variar la velocidad de corte. Las lecturas de desplazamiento vertical, en la etapa de consolidación, y horizontal en la etapa de corte, son tomadas por un micrómetro y se transcriben a una hoja de datos de forma manual, algunas partes del proceso se ilustran en la Figura 16.



Figura 16. Proceso ensayo corte directo muestra S5.

Se elaboraron seis probetas para cada una de las muestras evaluadas, se ensayaron siete distribuciones de tamaño de partícula, con diferentes tensiones normales: 100, 200 y 300 kPa, de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 17892-10:2018.

Las muestras se compactaron con la energía del ensayo Próctor Normal, ya que la compactación aumenta la resistencia del terreno. Se fijó la velocidad del ensayo de corte directo en 0,6 mm/min y se decidió establecer el corte cuando se alcanzara una deformación horizontal igual al 15% del diámetro de la probeta (10 mm), ya que no se observó un punto claro de corte. Para el caso del NFU sólo se considera la estabilidad a largo plazo, al producirse un drenaje instantáneo del agua debido a la alta permeabilidad del material.

Es probable que las resistencias obtenidas en condiciones de velocidad lenta (0,028 mm/min) sean mayores debido a la densificación de la mezcla de virutas del neumático del suelo. De ahí que en los ensayos realizados a esta velocidad no se aprecie un pico claro de corte de la probeta, y se considere como resistencia máxima la deformación alcanzada en el 10% del desplazamiento (Toledo & Lloret, 2009), o del desplazamiento máximo de la caja de corte (Tatliso, Edil, & Benson, 1998).

Existen diversidad de investigaciones enfocadas al estudio de la resistencia del corte del NFU para tamaños de partícula superiores a 50 mm (Tweedie et al., 1998); (McCartney et al., 2017). Para una granulometría mayor como la de los "tire chips", se obtuvieron valores de ángulo de rozamiento entre 45° y 60°. Estos resultados son respaldados por las observaciones de campo (Wu, Benda, & Cauley, 1997). En otras

investigaciones se indicó que el ángulo de fricción entre el NFU y la interfaz de hormigón es aproximadamente 22,6° (Ghaaowd, McCartney, Thielmann, Sanders, & Fox, 2017).

En la Tabla 27 se resumen como la media de los valores obtenidos para la cohesión y ángulo de rozamiento en las distintas pruebas de laboratorio en base al procedimiento indicado anteriormente para las distintas muestras.

Tabla 27. Cohesión y ángulo de fricción de las muestras de granulado de NFU.

M	PROBETA	COHESIÓN (kPa)	ÁNGULO DE ROZAMIENTO (°)
S1	MEDIA	14,51	24,55
S2	MEDIA	17,41	24,16
S3	MEDIA	20,27	23,00
S4	MEDIA	19,94	22,97
S5	MEDIA	13,75	24,64
S6	MEDIA	20,71	24,85

Nota: Ensayos realizados grupo investigación GRENECO. **Fuente:** Elaboración propia.

La Figura 17 permite comprender **hasta qué punto afecta la carga vertical a los rellenos con granulado de neumático en el ensayo de corte**. Solamente cuando se aplica tensiones verticales superiores a 196 kPa, se observa un incremento claro en el ángulo de rozamiento y se mantiene la cohesión para el huso granulométrico con el que se trabaja en esta investigación, al igual que concluyeron otros autores (Wartman et al., 2007).

La similitud en las curvas resistentes para los distintos tamaños del granulado de NFU, hace suponer que el tamaño en la granulometría analizada en esta investigación no influye de manera relevante en los resultados del ensayo de corte, por lo que el rango estudiado presenta una resistencia similar.

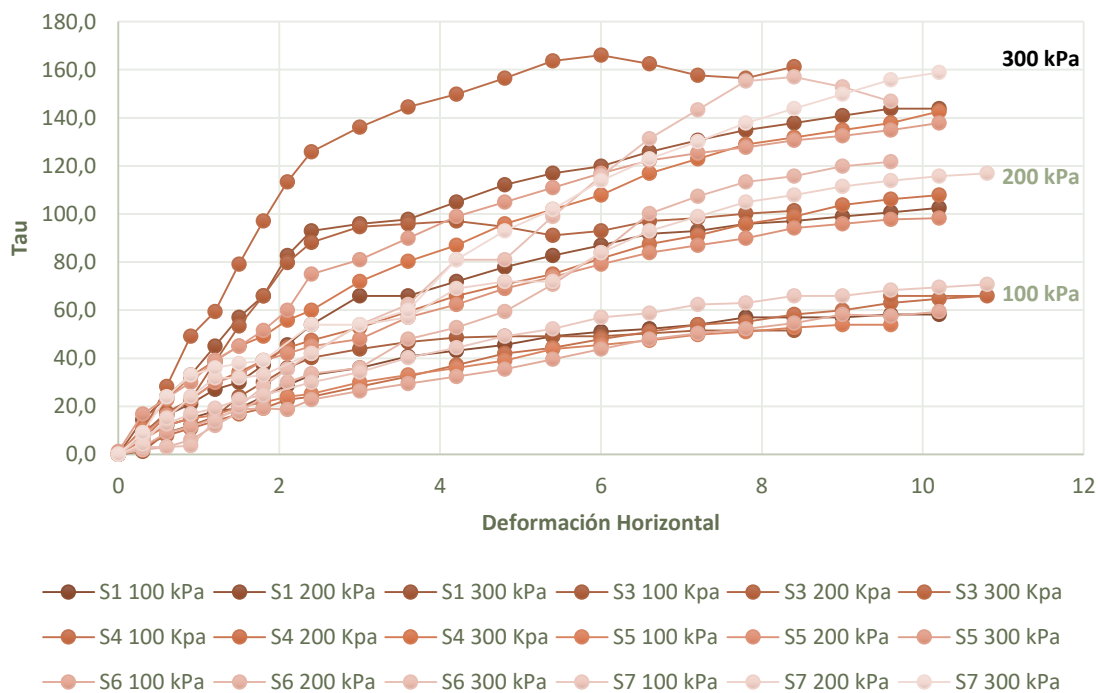


Figura 17. Carga tangencial vs. Desplazamiento horizontal en equipo de corte directo para distintos tamaños y carga vertical entre 98,1 a 294,3 kPa.

Nota: Ensayos realizados grupo investigación GRENECO. **Fuente:** (Elizabeth Contreras Marín, 2021).

Al igual que se consideró en apartados anteriores la influencia de distintos factores en cada una de las muestras analizadas, a continuación se analiza la repercusión que implica la presencia de agua en las muestras en los parámetros de resistencia, según se indica en la Figura 18 y la Figura 19, para un 25% y un 0% de humedad.

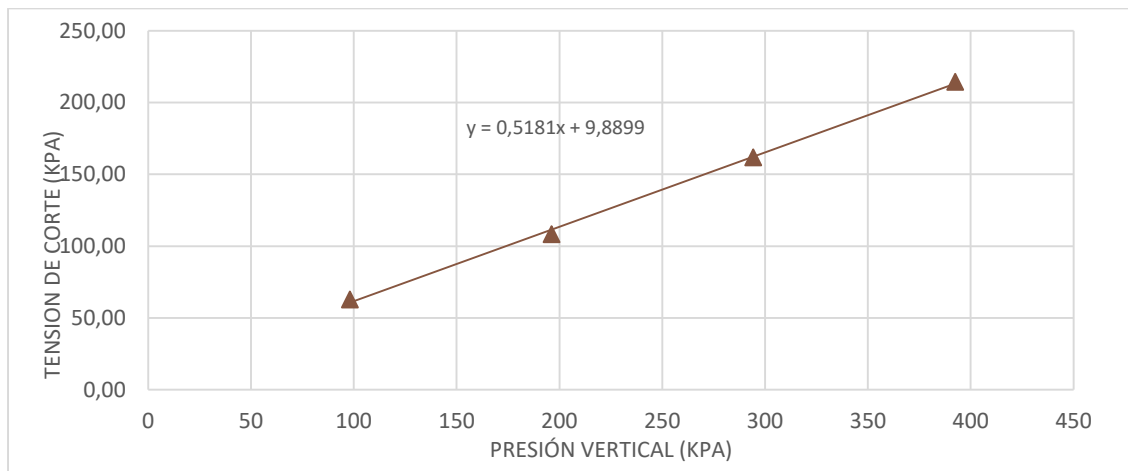


Figura 18. Relación tensión-presión para la muestra S6 y humedad (w) del 25%

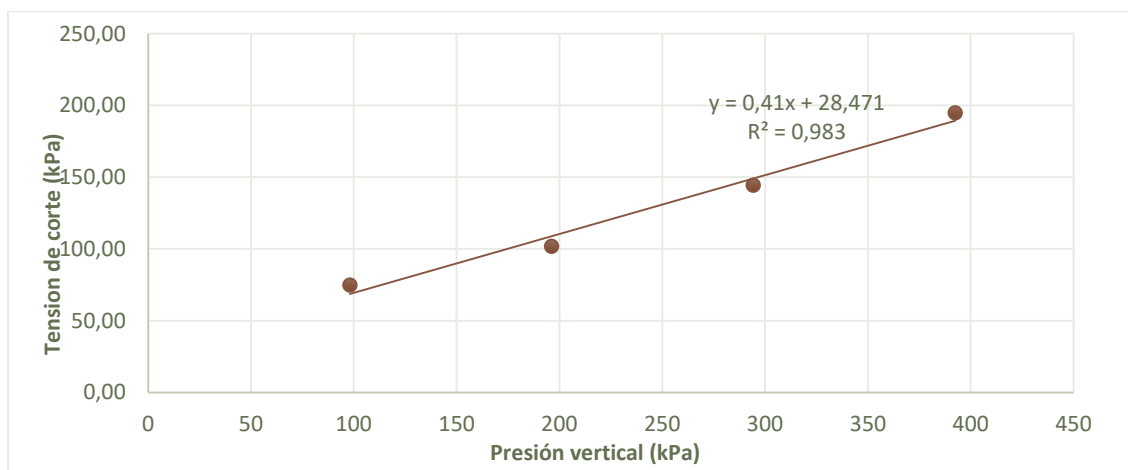


Figura 19. Relación tensión-presión para la muestra S6 y humedad (w) del 0%

El análisis de dichas gráficas se recoge en la Tabla 28, donde se deduce que la presencia de agua reduce la cohesión de las partículas de NFU en torno a un 65,26% respecto al valor con 0% de humedad.

Tabla 28. Repercusión por la presencia de agua en la cohesión del NFU.

Muestra	V (mm/min)	Humedad (%)	E. línea rotura	Cohesión (KPa)
90%G2 + 10%G1	0,6	0	$y=0,41x+28,471$	28,47
	0,6	25	$y=0,51x+9,889$	9,89

Nota: Ensayos realizados grupo investigación GRENECO. **Fuente:** Elaboración propia.

4.3.4 DURABILIDAD DEL NFU

4.3.4.1 Evaluación del riesgo de auto combustión

Una de las características que marcan negativamente a los granulados de neumático es su potencial inflamabilidad. Los primeros casos se dieron en los Estados Unidos en 1995, cuando se produjeron incendios aparentemente espontáneos en 3 rellenos distintos de NFU con un espesor superior de 7,00 m. Este hecho ha generado desconfianza e incertidumbre sobre el uso de este material reciclado. Un análisis empírico de estos casos, dio motivo a la norma ASTM a prescribir una serie de consideraciones para evitar este tipo de fenómenos.

Las restricciones más actualizadas son prescritas por la norma ASTM D6270-17, considerada como la norma de diseño de referencia. El espesor de las capas en los rellenos de NFU debe siempre estar limitado a 3 m (Clase de relleno tipo II con un tamaño ≤ 300 mm). En caso de trabajar con un rango granulométrico menor; el espesor de la capa se limita a 1 m (Clase de relleno tipo I con un tamaño ≤ 200 mm). Las especificaciones del material también limitan el contenido de fragmentos de acero según las siguientes indicaciones:

- El TDA debe tener menos del 1% (en peso) de fragmentos de metal, que no estén embebidos en el material.
- Los fragmentos embebidos en el triturado no deben sobresalir más de 25 mm del borde de la partícula en el 75% de las piezas.
- Igualmente, no deben sobresalir más de 50 mm en el 50% de las piezas.

Las indicaciones propuestas por Humphrey (2001, 2006b) son las siguientes para rellenos clase Clase II, a la hora de minimizar el riesgo de autocombustión:

- Limitar las infiltraciones de aire y agua cubriendo la zona superior y los laterales del relleno del terraplén empleando una capa de suelo compactado de 50 cm con baja permeabilidad, para evitar la infiltración de agua.
- Aislar las capas de TDA de los suelos con alto contenido de materia orgánica.
- Si se disponen capas de drenaje en el pie del relleno de las capas de NFU, debe disponerse material bien granulado para limitar el libre acceso de aire.

A partir de las recomendaciones expuestas anteriormente, se concluye que el huso granulométrico empleado en esta investigación se enmarca dentro de los rellenos clase I, con un tamaño menor a 200 mm. No obstante, al trabajar con un tamaño de partícula inferior, la cantidad de acero expuesto es inexistente, ya que el nivel de trituración favorece la separación y cribado de los distintos materiales que componen el NFU. Por ello, en las aplicaciones prácticas propuestas se implantan capas de más de 1 m de espesor, al obviarse los procesos de oxidación que favorecen la autocombustión.

No obstante, y en base a la falta de una metodología clara que permita obtener una conclusión sobre los procesos que conducen a la inflamabilidad del compuesto, se llevará a cabo un análisis en base a la normativa existente sobre los aspectos que influyen en la autocombustión, de forma que se permita avalar la aplicación en obra del huso granulométrico propuesto en esta tesis.

Normas para la evaluación de la corrosión:

- UNE-EN ISO 9223:2012 (Ratificada). *Corrosión de los metales y aleaciones. Corrosividad de atmósferas. Clasificación, determinación y estimación. (ISO 9223:2012) (Ratificada por AENOR en marzo de 2012.)*
- UNE-EN ISO 9224: 2012 (Ratificada). *Corrosión de metales y aleaciones. Corrosividad de las atmósferas. Valores rectores para las categorías de corrosividad.*

El incremento de temperatura debido a la oxidación del acero existente en los NFU troceados, puede verse reducido de manera considerable si se dispone una capa de cobertura de permeabilidad suficiente de manera que se favorezcan los fenómenos de convección con el exterior, aunque esto favorece la entrada de agua y la generación de una atmósfera más corrosiva cuando no se cumplan las prescripciones sobre la cantidad de acero expuesto en el granulado de NFU.

La incertidumbre principal que existe en la actualidad, es la inexistencia de un método que permita cuantificar el riesgo de auto combustión de los rellenos de NFU. Por ello, ha aumentado el estudio de mezclas entre arena y NFU como alternativa a los rellenos de NFU puro.

Una aproximación al problema podría realizarse “a partir de las observaciones experimentales disponibles e incorporando metodologías probadas (evaluación de la corrosión ISO) y herramientas teóricas (análisis de elementos finitos de calor acoplado y flujo másico.” (Arroyo et al., 2011).

Los experimentos analizados se decantan por la opción de que la oxidación del acero es la principal fuente de calor exotérmico en el NFU (Toledo & Lloret, 2009) y son opuestos a otras posibilidades, como la formación de sulfato férrico a partir del azufre contenido en el caucho. Igualmente, se ha observado que es conveniente permitir que los núcleos internos de las obras ejecutadas con NFU se encuentren protegidos por materiales permeables al aire, de forma que la temperatura exterior ambiental se equipare a la temperatura en el interior de los núcleos de las construcciones.

La combustión puede darse si se alcanza el punto de auto ignición que se encuentra aproximadamente entre los 278°C y los 343°C, por lo que es indispensable considerar la suficiente cubrición de las capas de NFU mediante material granular respecto al ambiente exterior.

4.3.4.2 Lixiviados

De los ensayos químicos obtenidos en relación con la lixiviación, se deduce que el empleo de NFU como material de relleno viario es perfectamente viable desde el punto de vista medioambiental, ya que el agua que pudiera percolar a través del relleno presenta unas concentraciones de contaminantes generalmente muy inferiores a las estipuladas en el R.D. 140/2003, referente a la calidad del agua para consumo humano (Europea Feder, 2013). No obstante, debido a los diferentes procedimientos para la evaluación de lixiviados, es necesario que se profundice en esta rama en futuras investigaciones (Mohajerani et al., 2022), ya que se ha detectado que existe una falta de estudios sobre la idoneidad de los procedimientos para materiales de caucho en función de las condiciones del medio en el que están expuestos.

La norma UNE-EN 14405 especifica un procedimiento de percolación de flujo ascendente para determinar el comportamiento en la lixiviación de sustancias inorgánicas y sustancias orgánicas no volátiles de materiales residuales granulosos.

Este ensayo verifica que la muestra se ajusta a los valores reglamentarios límites resultantes de ensayos anteriores, siendo por tanto, imprescindibles a la hora de garantizar una caracterización básica.

La probeta en la que se dispone el residuo se somete a percolación con agua en función de una relación líquido/sólido, en condiciones de percolación específicas, con unas condiciones hidráulicas dinámicas. Los eluidos producidos en el ensayo, pueden caracterizarse posteriormente por métodos físicos, químicos y ecotoxicológicos. En primer lugar, se miden el Ph y la conductividad de acuerdo a la Norma EN 16192, inmediatamente después de la recolección. Opcionalmente se puede medir el potencial de redox E_h en mV de cada fracción de eluido.

En aplicaciones sobre el terreno como capas de recogida de lixiviados, la obturación del porcentaje de huecos puede generar un incremento en la presión intersticial en la línea superior, que aumenta el potencial de fuga de los lixiviados en los vertederos.

En ambientes ricos en microbios, puede generarse una capa sobre los agregados de NFU que se deposita y reducen el espacio entre los poros. Si además añadimos una carga de compresión elevada se reducen aún más estos poros. En un estudio comparativo realizado entre la grava y el NFU se detectó que la velocidad en un año de análisis y bajo una carga de 150 kPa, fue de 10^{-5} a 10^{-6} cm/s para el NFU, mientras que para la grava fue de 10^{-4} a 10^{-5} cm/s. Por lo tanto, se aconseja disponer el NFU en zonas que no sean críticas en la recolección de los lixiviados.

capítulo 5

APLICACIONES GEOTECNICAS PROPUESTAS CON NFU

5.1 PARÁMETROS GEOTÉCNICOS CONSIDERADOS

De acuerdo con la implementación de materiales no convencionales, el PG-3 clasifica en tres grupos los materiales clasificados como marginales, normalmente procedentes de procesos de reciclado:

1. Materiales naturales no convencionales.
2. Materiales fabricados expresamente para su utilización como relleno.
3. Residuos y subproductos industriales, obtenidos al final de un ciclo de consumo, donde se encuentra el NFU.

Los valores característicos del granulado de NFU que se han considerado para el análisis de las aplicaciones propuestas en los siguientes subcapítulos se incluyen en las Tabla 29; Tabla 30; Tabla 31; Tabla 32; Tabla 33; Tabla 34; Tabla 35 y la Tabla 36 al igual que el resto de materiales convencionales según bibliografía. Para la definición de los materiales se empleará el modelo elasto-plástico de Mohr-Coulomb, basado en la ley de elasticidad isotrópica de Hooke para el cálculo numérico mediante software.

Tabla 29. Valores característicos Ensayo Próctor del granulado de NFU.

PESO ESPECÍFICO SECO (kN/m^3)

MUESTRA	S4	S5	S6	Arena (A)	Turba (T)	Arcilla (B)
Val. medio	5,72	5,93	5,72	16,0	8,0	15,0

Nota: Ensayos realizados grupo investigación GRENECO. **Fuente:** Elaboración propia

Tabla 30. Valores característicos Ensayo de peso específico saturado del granulado de NFU.

PESO ESPECÍFICO SATURADO (kN/m^3)

MUESTRA	S4	S5	S6	Arena (A)	Turba (T)	Arcilla (B)
Val.	9,8	10,68	10,48	20,00	11,00	18,00

Nota: Ensayos realizados grupo investigación GRENECO. **Fuente:** Elaboración propia

Tabla 31. Valores característicos del ensayo de corte directo: Cohesión y Ángulo de rozamiento

COHESIÓN (kPa)

MUESTRA	S4	S5	S6	Arena (A)	Turba (T)	Arcilla (B)
Val. medio	17,99	9,72	13,99	1,00	5,00	2,00

ÁNGULO DE ROZAMIENTO (°)

MUESTRA	S4	S5	S6	Arena (A)	Turba (T)	Arcilla (B)
Val. medio	21,90	23,24	23,53	30,00	20,00	24,00

Nota: Ensayos realizados grupo investigación GRENECO. **Fuente:** Elaboración propia

Tabla 32. Valores del ensayo de permeabilidad K (m/s)

PERMEABILIDAD k (m/día)

MUESTRA	S4	S5	S6	Arena (A)	Turba (T)	Arcilla (B)
Val.	59,18	59,18	86,40	86,40	Kx $2 \cdot 10^{-3}$ Ky $1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$

Nota: Ensayos realizados grupo investigación GRENECO. **Fuente:** Elaboración propia

Tabla 33. Valores del coeficiente de poisson (ν)

COEFICIENTE DE POISSON

MUESTRA	S4	S5	S6	Arena (A)	Turba (T)	Arcilla (B)
Val.	-	0,38	0,38	0,30	0,50	0,33

Nota: Ensayos realizados grupo investigación GRENECO. **Fuente:** Elaboración propia

Tabla 34. Valores del módulo edométrico E_{oed}

MÓDULO EDOMÉTRICO (E_{oed}) (kN/m²)

MUESTRA	S4	S5	S6	Arena (A)	Turba (T)	Arcilla (B)
Val.	-	1830,2	1555,8	4038	561,70	1482

Nota: Ensayos realizados grupo investigación GRENECO. **Fuente:** Elaboración propia

Tabla 35. Tipo de comportamiento del suelo

TIPO DE COMPORTAMIENTO DEL SUELO

MUESTRA	S4	S5	S6	Arena (A)	Turba (T)	Arcilla (B)
Tipo	Drenado	Drenado	Drenado	Drenado	No drenado	No drenado

Tabla 36. Propiedades térmicas según bibliografía

Propiedades térmicas

	Arena	NFU	Arcilla	Turba	Hormigón
Calor específico (c_s) kJ/t/K	860	1470	879	879	900
Conductividad térmica (λ_s) kW/m/K	$4 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$1,28 \cdot 10^{-3}$	$1,28 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Exp. Térmica del sólido	Lineal	Lineal	Lineal	Lineal	Lineal
Densidad suelo (ρ_s) t/m ³	2,6	$1,21 \cdot 10^3$	1,5	0,8	2,5
Componente X expansión (α_x) 1/K	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$3,43 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$0,01 \cdot 10^{-3}$
Componente Y expansión (α_y) 1/K	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$3,43 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$0,01 \cdot 10^{-3}$
Componente Z expansión (α_z) 1/K	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$3,43 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$0,01 \cdot 10^{-3}$

Fuente: Adaptado de "Evaluation of self-combustion risk in tire derived aggregate fills (Arroyo et al., 2011).

La orientación específica del diseño a seguir, variará dependiendo del proyecto de construcción y la aplicación, siendo responsabilidad última del ingeniero del proyecto la de asegurar que se sigue la normativa vigente, así como las peculiaridades del producto sobre el proyecto a ejecutar. Las normas y directrices que se han aplicado para el diseño de estructuras y terraplenes utilizando NFU, son las siguientes:

- UNE EN 1997-1:2010, Eurocódigo 7.
- Anejo Nacional Español del Eurocódigo 7.
- Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carretera y Puentes (PG-3).
- Guía de Cimentaciones en Carreteras (Ministerio de Fomento).
- Código Técnico de la edificación.

Al igual que otros materiales de construcción, el fabricante deberá aportar la etiqueta CE del producto, de forma que se justifiquen los requisitos establecidos por la Unión Europea para su uso en el propósito especificado:

- Directiva 89/106/CEE.

5.1.1 Análisis de sensibilidad de las muestras de NFU

Debido al rol tan importante que juegan las propiedades de los materiales en el cálculo, se desarrolla un análisis de sensibilidad para una sección tipo de muro de contención en L. Dicho análisis consiste en indicar un rango de valores en donde puede variar un parámetro concreto y evaluar la variación del factor de seguridad. Para ello, se especifica un valor mínimo y un valor máximo para cada parámetro sometido al análisis de sensibilidad.

La herramienta para llevar a cabo este análisis numérico es PLAXIS 2D V8.6 y V20, que permite usar diferentes modelos de comportamiento del suelo, como el elástico lineal Mohr Coulomb; el endurecimiento del suelo blando y los modelos de deslizamiento, como se llevó a cabo en otros estudios similares (Mehrhad Tajabadipour, 2017), (Reza Jamshidi Chenari, 2017).

Se establece una Relación Mínima (Rel. Mín.) y una Relación Máxima (Rel. Máx) para calcular el Valor Mínimo (Val. Mín) y Valor Máximo (Val. Máx), conforme a las siguientes ecuaciones:

$$\text{Val. Mín.} = \text{Principal} - \text{Rel. Mín.} \qquad \text{Val. Máx.} = \text{Principal} - \text{Rel. Máx.}$$

El término “Principal” se corresponde con el valor del parámetro definido inicialmente en el subcapítulo anterior. Cada uno de los parámetros se somete de forma aislada a una variación en incrementos uniformes entre el Valor Máximo y el Valor Mínimo y se calcula el factor de seguridad obtenido en PLAXIS 2D V8. El análisis de los resultados obtenidos permite observar el Factor de Seguridad frente al parámetro de entrada, por lo que al variar este, se puede obtener la sensibilidad del factor de seguridad según los cambios en el dicho valor.

Para realizar el análisis de sensibilidad se parte de los parámetros geotécnicos de la Tabla 37. No se ha considerado variación en el módulo de elasticidad, permeabilidad y coeficiente de Poisson. La Figura 20, Figura 21 y Figura 22 recogen los resultados de la variación de parámetros indicada anteriormente.

Tabla 37. Propiedades del granulado de NFU considerado para el análisis de sensibilidad

Muestra	Propiedad	Rel. Mín.	Rel. Máx.	Valor Mín.	Valor Máx.
S6	γ (kN/m ³)	0,50	1,50	5,26	7,26
	C' (kN/m ²)	0,30	5,20	13,70	19,20
	Φ' (°)	3,30	1,30	20,27	24,83

De los parámetros considerados en el análisis de sensibilidad, el peso específico del granulado de neumático es el que tiene mayor influencia en la estabilidad del terreno con un 7,23% de diferencia. Mientras que el ángulo de rozamiento y la cohesión presentan una variación entre 0,27% y el 2,27% respectivamente.

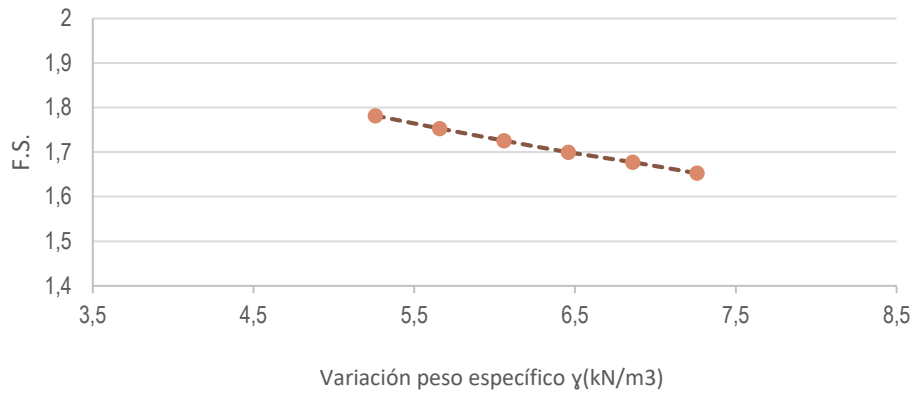


Figura 20. Análisis de sensibilidad: Variación peso específico (kN/m³)

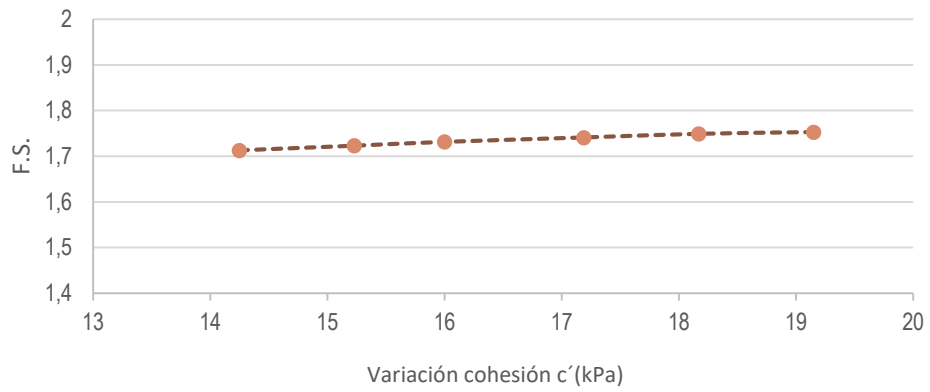


Figura 21. Análisis de sensibilidad: Variación cohesión (c') (kPa)

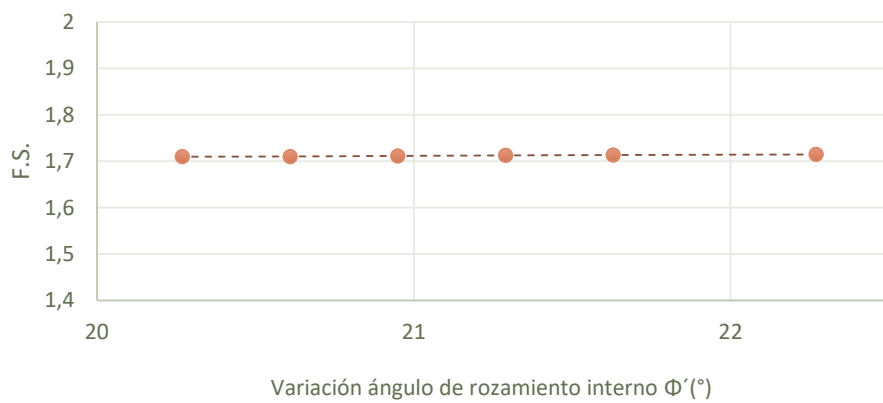


Figura 22. Análisis de sensibilidad: Variación ángulo de rozamiento interno (Φ') (°)

5.2 APLICACIÓN 1: MURO DE CONTENCIÓN CON RELLENO DE NFU EN EL TRASDÓS

5.2.1 Consideraciones iniciales para el muro de contención

En esta aplicación se valida el potencial de uso del granulado de neumático como material de relleno en el trasdós en estructuras de contención. Para ello, se realiza un estudio comparativo entre dos alturas diferenciadas de un muro de contención en L de 2,50 m y 5,80 m con una sobrecarga de 5 kN/m² actuando sobre el talón. En primer lugar, se emplea material convencional y en segundo lugar se incorpora relleno de NFU. La principal ventaja de este material es su bajo peso específico y cohesión, que evitan un incremento de las presiones en el trasdós, mejorando la seguridad de la estructura. Los muros de contención en L aprovechan el peso propio del terreno que tienen sobre el talón para su estabilización; sin embargo, al contar el NFU con un peso específico del orden de tres veces inferior al árido convencional, no será un factor determinante en la estabilización del muro. En este análisis no se considera el factor de seguridad a hundimiento, ya que se encuentra directamente relacionado con el terreno de cimentación y puede variar según la ubicación del caso de estudio.

Los muros de contención son estructuras continuas que producen un efecto estabilizador sobre una masa de suelo. El cuerpo del muro trabaja esencialmente a flexión y la compresión vertical debida a su propio peso es un factor estabilizante, comportándose básicamente como voladizos empotrados en su base. Cuando el muro va a romper, existe una cuña que plastifica con el terreno y se solidariza con el mismo, formándose el estado activo de Rankine. Los resultados estarán condicionados por el porcentaje de NFU que se haya considerado en las diferentes secciones.

Partiendo de estas premisas, los principales objetivos del presente análisis son obtener resultados comparativos en cuanto a los valores de **factor de seguridad al deslizamiento y al vuelco** en base a los cálculos desarrollados por la normativa española (CTE-DB-SE-C, v2019) basado en los **coeficientes globales de seguridad**, y a nivel europeo el **EC-7-Parte 1 (UNE-EN 1997-1:2016)** basado en los **coeficientes parciales de seguridad**. Por lo que se plantean dos apartados de cálculo analítico en base a cada una de las normativas, comparando algunas de las secciones tipo planteadas.

Para el estudio de las diferentes hipótesis se parte de una hoja de cálculo, basado en el cálculo analítico, y el empleo del programa de elementos finitos PLAXIS 2D V8 y V20 que permite realizar un cálculo numérico; donde además, se observa el comportamiento térmico del material frente a variaciones en la temperatura ambiente. Por último, se analizan los costes necesarios y las emisiones de CO₂ estimadas, de forma que se verifique la viabilidad del empleo de este subproducto reciclado.

En base a los resultados obtenidos, se plantea como conclusión el análisis de estabilidad de un muro de contención ejecutado en la muralla del Castillo de Utrera, Sevilla. Se parte la sección de la muralla sobre la que se interviene y se analizan los resultados de estabilidad obtenidos, considerando la ejecución del trasdós del muro con material convencional y con NFU.

En la Figura 23 se esquematiza la metodología llevada a cabo para cada una de las hipótesis planteadas, que han generado un total de 45 modelos definitivos. Los resultados obtenidos muestran una mejora en el factor de seguridad de la sección del orden del 28,5 al 41,26%, siendo más evidente para muros de más esbeltos. Respecto a la aplicación en el trasdós del recinto amurallado de Utrera, los empujes actuando en el trasdós de podrían llegar a reducirse, dependiendo del modelo estudiado, desde un 10 a un 30% respecto a la solución que supone material convencional en el trasdós de la muralla.

5.2.2 Esquema conceptual plan de etapas muro de contención

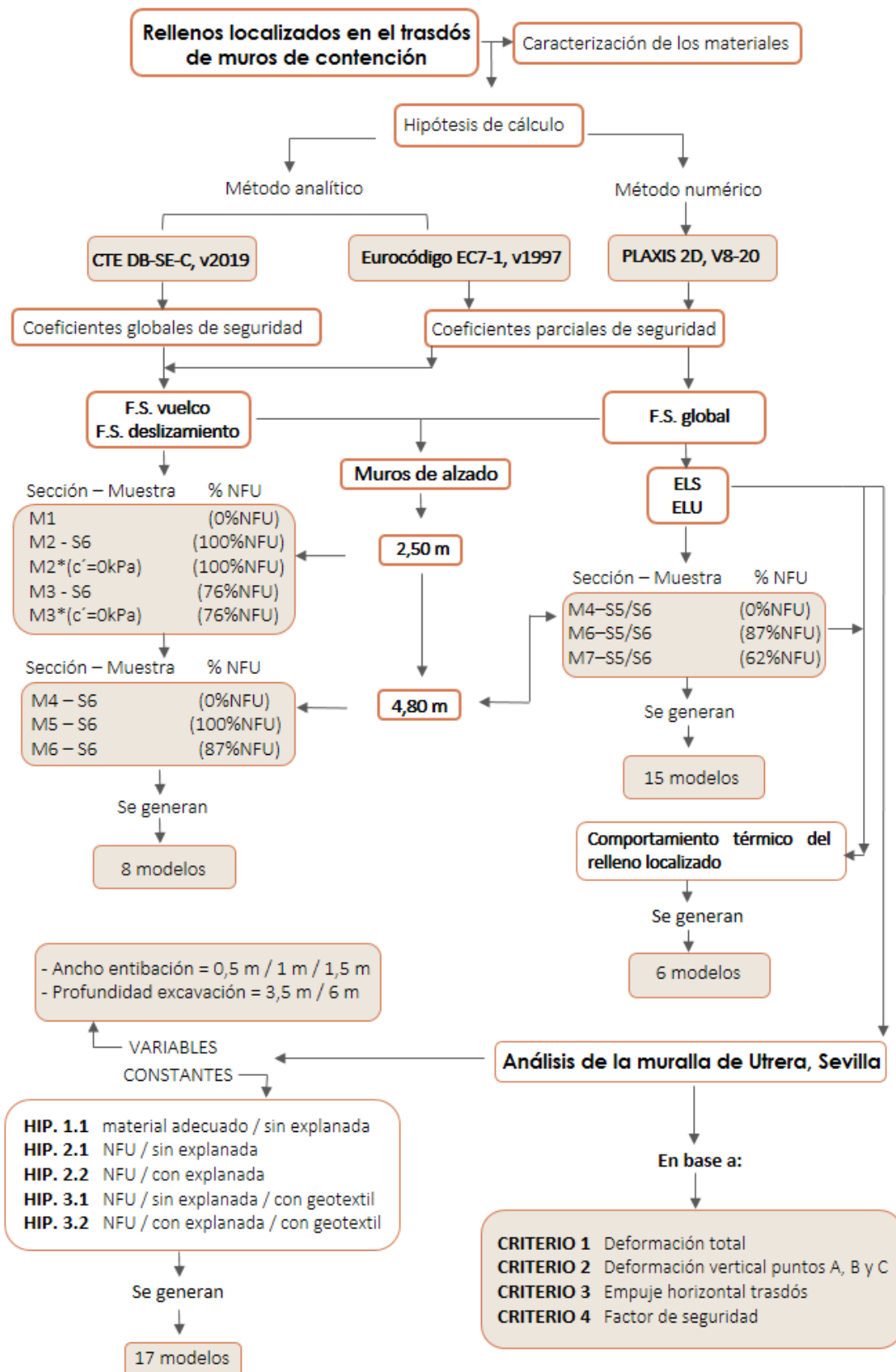


Figura 23. Plan de análisis relleno localizado en trasdós de muro de contención

5.2.3 Características de los materiales para rellenos localizados

Las zonas de trasdós de estructuras de contención, zanjas y otras, que por su reducida extensión, no puedan compactarse con los medios habituales tendrán la consideración de rellenos localizados y deberán seguir las prescripciones indicadas en el artículo 332 del PG-3.

Dicho pliego indica que se deben emplear suelos adecuados y seleccionados, cuyas características se indican en la Tabla 38, siempre que su CBR según UNE 103502 sea superior a 10 y en caso de trasdós de obra de fábrica superior a 20.

Tabla 38. Materiales a emplear en rellenos localizados según artículo 330 PG-3.

PARÁMETRO		SELECCIONADOS	ADECUADOS
<i>Materia orgánica UNE 103204</i>		< 0,2%	< 0,1%
<i>Sales solubles NLT 114</i>	Yeso	< 0,2%	< 0,2%
	Otras		
<i>Hinchamiento libre UNE 103061 y UNE 103500</i>			
<i>Asiento en ensayo de colapso NLT-254 y UNE 103500</i>			
<i>Granulometría</i>	Tamaño máximo (mm)	≤100	≤100
	Otras condiciones	#0,4<15%(*) #2<80% #0,4<75%	#2<80%
	Finos (#0,08mm)	<25%	<35%
<i>Plasticidad UNE 103103 y UNE 103104</i>		Según especificaciones del proyecto	

Fuente: Adaptado de Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (Ministerio de Fomento, 2015).

Como buena práctica constructiva, y teniendo en cuenta los condicionantes de durabilidad del material, se debe contemplar la incorporación de un sistema de evacuación de aguas, a partir de un drenaje en la zona inferior donde se ubique el relleno con NFU con el fin de evitar el contacto prolongado en el tiempo del agua con este material.

Se debe usar un separador geotextil sobre la capa de NFU para evitar la obstrucción debido a la penetración de la raíz vegetativa y/o infiltración de finos. Además, dicho geotextil debe servir para contener el granulado de NFU, de forma que se evite la dispersión del material por el terreno circundante. En el caso de que las partículas de NFU puedan contener filamentos de acero expuestos es necesaria la colocación de una capa intermedia que evite la perforación de la geomembrana. La principal consideración de diseño es la resistencia al punzonamiento de la geomembrana, que está directamente relacionada con la presencia de acero en el NFU.

A nivel de compactación el PG3-3 indica que el espesor de las capas a compactar será inferior o igual a 25 cm, hecho que se considerará a nivel de modelado de las diferentes secciones en el programa de cálculo, que en el caso del NFU deberá considerarse - al igual que indican otros estudios- para la puesta en obra del material reciclado.

Con esfuerzos de compactación moderados, según ensayo Próctor Normal, se obtiene la máxima resistencia del NFU, por lo que no es necesario incrementar la energía de compactación. Este hecho implica importantes ahorros en el proceso de compactación. Se observa igualmente, que el contenido de humedad de la muestra no es relevante en la resistencia del material, de forma que agregando un porcentaje de agua del 10 % se consigue únicamente mejorar la maleabilidad de la muestra. Produciéndose también importantes ahorros tanto a nivel económico como medio ambiental.

5.2.4 Caracterización e hipótesis de cálculo (CTE-DB-SE-C, v2019)

El método de los coeficientes globales de seguridad está implantado a nivel nacional a la hora de diseñar cimentaciones. Este método se basa en englobar en un solo parámetro (coeficiente global de seguridad) la imprecisión que ha de considerarse tanto en las acciones como en las resistencias, en los métodos de cálculo o debido a cualquier otra causa de incertidumbre (Martínez López, 2013). La Ecuación 9 hace referencia de dicha verificación.

$$FS = \frac{Tf(x_1, x_2, \dots, x_n)}{Td(x_1, x_2, \dots, x_n)} ; \text{Ecuación 9}$$

Siendo

“Tf” y “Td” la agrupación de resistencias o parámetros favorables y las solicitaciones o términos desfavorables respectivamente.

“FS” es el factor de seguridad global.

El conservadurismo en este tipo de cálculos favorece la aparición de normativas que tienen en cuenta las incertidumbres - debidas a acciones o resistencias - con el fin de optimizar los recursos. Por tanto, para el dimensionado de la cimentación se empieza por considerar el método de los estados límites últimos y de servicio asociados con el colapso total o parcial del terreno o con el fallo estructural de la cimentación (CTE-DB-SE-C, v2019).

Para los Estados Límites de Servicio según se clasifican en el documento de seguridad estructural (CTE-DB-SE, v2019), se deberán considerar los límites relativos a:

- a) Los movimientos excesivos de la cimentación que puedan inducir esfuerzos y deformaciones anormales, poniendo en peligro el confort de los usuarios o el funcionamiento de equipos e instalaciones.
- b) Las vibraciones que al transmitirse a la estructura puedan producir falta de confort en las personas.
- c) Los daños o deterioros que puedan afectar negativamente a la apariencia.

Para los Estados Límite Últimos se consideran todos aquellos clasificados en el apartado 3.2.1 del documento de seguridad estructural (CTE-DB-SE, v2019), debidos a:

- d) Pérdida de la capacidad portante del terreno de cimentación por hundimiento, deslizamiento y vuelco.
- e) Pérdida de la estabilidad global del terreno en el entorno próximo a la cimentación.
- f) Pérdida de la capacidad resistente de la cimentación por fallo estructural.

En esta aplicación se analizarán los estados que consideran la pérdida de la capacidad portante del terreno de apoyo de la cimentación por deslizamiento o vuelco, ya que el hundimiento depende de las condiciones del sustrato de apoyo.

Para verificar que no se supere ningún estado límite último se deberán considerar las acciones (cargas y empujes) que puedan afectar a la cimentación. Para ello, se calcula el empuje activo que actúa sobre el trasdós del muro de contención, para analizar el desplazamiento y giro del elemento de contención hacia el exterior bajo las presiones del relleno, hasta alcanzar unas condiciones de empuje mínimo.

Para calcular los empujes sobre un elemento de contención se supone la ley de empujes unitarios. Con la geometría del problema que parte este estudio, los empujes sobre el muro se obtienen a partir de la siguiente la Ecuación 10, Ecuación 11 y Ecuación 12.

Suelos sin cohesión:

$$e'_{ar} = k_{ar} \cdot q + k_{ar} \cdot \sigma'_{v(\text{terreno})}; \text{Ecuación 10}$$

Suelos con cohesión:

$$e'_{ar} = k_{ar} \cdot q + k_{ar} \cdot \sigma'_{v(\text{terreno})} - 2c\sqrt{k_{ar}}; \text{Ecuación 11}$$

$$\text{Donde: } k_{ar} \text{ (coef. De empuje activo)} = \frac{1 - \sin \Phi}{1 + \sin \Phi}; \text{Ecuación 12}$$

q es la sobrecarga superficial (kN/m²)

σ'_{terreno} presión vertical del terreno ($\gamma \cdot z$)

c' es la cohesión efectiva del material de relleno

En el análisis de estados límites últimos por métodos de equilibrio límite se considerará que, **la presión de las tierras sobre el elemento de contención no será inferior a 0,25 veces la tensión efectiva vertical**, debido al efecto favorable que la cohesión supone en el cálculo de los empujes, que pueden llegar a ser nulos en la parte superior del alzado.

No se consideran empujes debidos al agua, ya que la elevada permeabilidad del NFU y el sistema de drenaje que se deberá disponer en el talón, garantizan que no se produzca un incremento de las presiones intersticiales.

En este apartado se analizarán los estados límites de estabilidad basados en el formato de los coeficientes parciales de seguridad. El equilibrio de la cimentación (estabilidad al vuelco y deslizamiento) se verifica cuando se cumple la condición de estabilidad:

$$E_{d,dst} \leq E_{d,stab}$$

Siendo: $E_{d,dst}$ el valor de cálculo del efecto de las acciones desestabilizadoras;

$E_{d,stab}$ el valor de cálculo de las acciones estabilizadoras.

Los valores de cálculo de los efectos de las acciones se determinan a partir de la combinación de acciones con su correspondiente coeficiente de mayoración o minoración. El valor de cálculo para el efecto de las acciones se determina según la ecuación:

$$E_d = \gamma_E \cdot E \left(\gamma_F \cdot F_{repr}; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d \right); \text{Ecuación 13}$$

Siendo F_{repr} el valor representativo de las acciones que intervienen en la situación de dimensionado considerada;

X_k el valor característico de los materiales;

a_d el valor de cálculo de los datos geométricos;

γ_E el coeficiente parcial para el efecto de las acciones;

γ_F el coeficiente parcial para las acciones;

γ_M el coeficiente parcial para las propiedades de los materiales.

Además, se considera el valor de cálculo de la resistencia del terreno a partir de la Ecuación 14:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_R} R \left(\gamma_F \cdot F_{repr}; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d \right); \text{Ecuación 14}$$

Siendo γ_R el coeficiente parcial de resistencia

El valor de los diferentes coeficientes contemplados en las expresiones anteriores se incluye en la Tabla 39.

Tabla 39. Coeficientes parciales de seguridad para la estabilidad CTE-DB-C

Situación de dimensionado	Tipo	Materiales		Acciones	
		γ_R	γ_M	γ_E	γ_F
Persistente o transitoria	Hundimiento	3,0	1,0	1,0	1,0
	Deslizamiento	1,5	1,0	1,0	1,0
	Vuelco	1,5	1,0	1,0	1,0

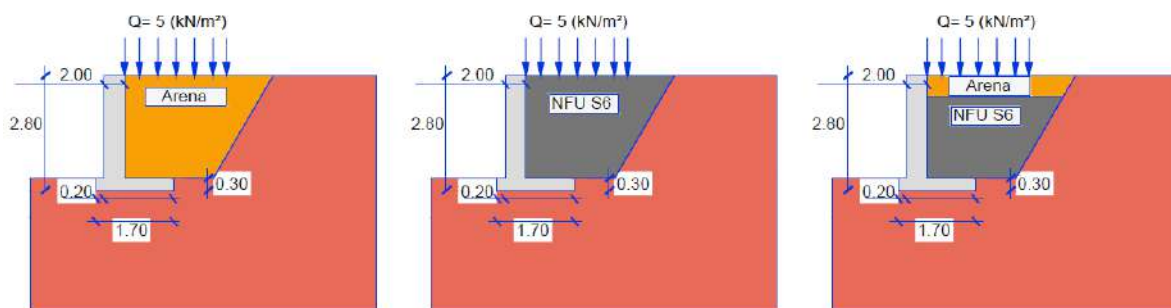
Fuente: Adaptado de Código Técnico de la edificación Documento Básico Cimientos (CTE-DB-SE, v2019).

Se concluye que el método basado en los coeficientes parciales de seguridad del Código Técnico (CTE-DB-SE, v2019) no considera la mayoración ni minoración de las acciones que puedan actuar sobre la estructura, al presentar valores unitarios. Por lo tanto, a partir del coeficiente global de seguridad se tiene en cuenta la indeterminación generada tanto por las acciones como por la resistencia.

5.2.4.1 Cálculo en muros de 2,50 m de alzado

En primer lugar, se realizan los cálculos para un muro de contención de menor altura en L de 2,50 m de alzado y cimentación de 0,30 m de canto, con lo que tenemos una altura total de 2,80 m. El espesor del alzado del muro es de 0,50 m tanto en la base como en la coronación, la base de la zapata es de 1,00 m de ancho y la puntera de 0,20 m.

Una de las secciones analizadas considera en el trasdós del muro material granular convencional (sección M1); la siguiente hipótesis considera relleno de NFU a partir de la muestra S6 en su totalidad (sección M2), siendo esta hipótesis teórica al no considerar una capa de protección frente a la atmósfera del volumen de NFU, por lo que no podría ejecutarse. Por último, se modelo una sección que contemplara una capa de material convencional en contacto con la atmósfera para la protección del granulado y el control de las deformaciones verticales y relleno con NFU (sección M3).



Sección M1

Sección M2

Sección M3

Figura 24. Hipótesis muro altura 2,80 m y base 1,70 m.

La Tabla 40 muestra los coeficientes de seguridad de esta primera batería de cálculo como planteamiento habitual para este tipo de muros en L. En naranja se marcan los valores que no cumplen con la prescripción y en verde aquellos que la superan.

Para analizar la repercusión que el efecto de la cohesión del NFU tiene en los resultados finales, se supone una cohesión del material reciclado igual a cero y una cohesión del material igual a 13,99 kPa.

Tabla 40. F.S. Deslizamiento y Vuelco muro L 2,80 m y B 1,70 m cohesión ($c'=0$ Kpa) y ($c'=10$ kPa)

	M1	M2*	M2-S6	M3*	M3-S6	Especificación
Cohesión de NFU (c') kPa	0	0	13,99	0	13,99	
Resultante por el Núcleo central	SI	NO	SI	NO	SI	-
F.S. al Deslizamiento	1,45	2,27	1,94	1,81	2,41	$\geq 1,50$
F.S. al Vuelco	3,03	3,55	3,44	2,99	3,79	$\geq 2,00$

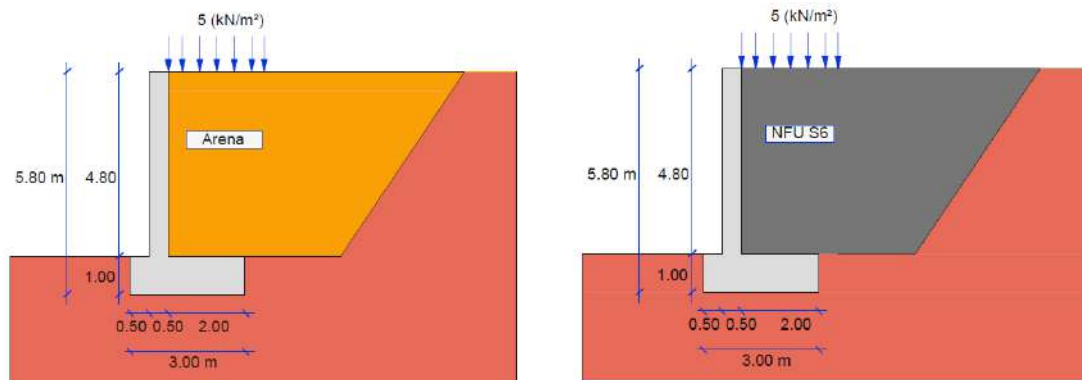
Nota: Resultados obtenidos del cálculo manual. **Fuente:** elaboración propia

El coeficiente de seguridad al deslizamiento se incrementa por el empleo de NFU en el trasdós del muro al reducirse las tensiones horizontales y por ende los empujes sobre el mismo. En las hipótesis donde se considera la cohesión de la muestra S6 ($c'=13,99$ kPa) se produce un incremento respecto al valor límite al deslizamiento ($\geq 1,5$) en torno al 23%, por lo que podría considerarse reducir la longitud del talón del muro, además de pasar la resultante por el núcleo central. **Al realizar los cálculos suponiendo el NFU con cohesión nula (sección M2* y M3*), no se cumple la condición de paso de la resultante por el núcleo central, por lo que para el resto de cálculos se considera el efecto favorable de la cohesión obtenida en los ensayos de laboratorio.** El relleno de material convencional (sección M1) no cumple con los valores admisibles de resistencia al deslizamiento. Por lo que, para que la sección M1 alcance un valor de seguridad al deslizamiento adecuado, habría que prolongar el largo del talón 0,20 m.

Los valores de estabilidad global suponiendo el relleno de material convencional se mantienen constantes, mientras que el resto de hipótesis que consideran la cohesión del NFU, ajustan los coeficientes de seguridad obtenidos suponiendo como mínimo un 25% del valor de las tensiones verticales actuando en el trasdós del muro (CTE DB SE C, v2019), ya que la cohesión puede generar empujes nulos sobre el trasdós del mismo en la parte superior del alzado.

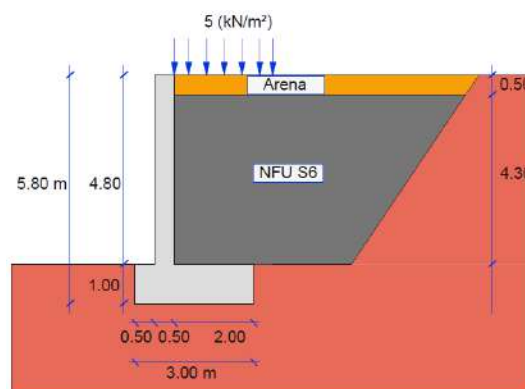
5.2.4.2 Cálculo muro de 4,80 m de alzado

En el siguiente caso de estudio se considera un muro de 4,80 m de alzado y cimentación de 1,00 m de canto, con lo que tenemos una altura total de 5,80 m. El espesor del alzado del muro es de 0,50 m tanto en la base como en la coronación, la base de la zapata es de 2,00 m de ancho y la puntera de 0,50 m. Se empleó la muestra S6 y arena como material convencional, siguiendo el patrón de las distintas secciones para el muro de 2,50 m de alzado.



Sección M4

Sección M5



Sección M6

Figura 25. Hipótesis muro altura 5,80 m y base 3,00 m.

Las secciones que contienen NFU, según la muestra S6, alcanzan los valores límite de los coeficientes de seguridad requeridos y el paso de la resultante por el núcleo central, a diferencia de los valores obtenidos si empleamos material convencional como relleno en el trasdós -sección M4-. **Para alcanzar un factor de seguridad al deslizamiento aceptable en la sección M4, es necesario aumentar el largo del talón en 1,20 m, resultando la anchura de la zapata en 4,20 m.**

Tabla 41. F.S. Deslizamiento y Vuelco muro L 5,80 m y B 3,00 m cohesión.

Sección	M4	M5-S6	M6-S6	Especificación
<i>Resultante por el Núcleo central</i>	NO	SI	SI	-
<i>F.S. al Deslizamiento</i>	1,05	1,88	2,72	≥ 1,50
<i>F.S. al Vuelco</i>	1,99	3,55	5,09	≥ 2,00

Nota: Resultados obtenidos del cálculo manual. **Fuente:** elaboración propia

Se concluye que, la reducción en el empleo de hormigón armado, comienza a ser significativa para una altura de muro de 5,80 m, ya que la longitud del talón para la sección M4 necesita prolongarse un 18% más que la longitud del talón de la sección M1, la cual consideraba una altura de muro de 2,50 m.

La sección M6 que considera una capa superior de 0,50 m de espesor de material convencional presenta un factor de seguridad al vuelco y al deslizamiento un 30% superior a la sección M5, debido a la acción estabilizadora que genera el peso de esa capa sobre el talón.

El factor de seguridad al deslizamiento y al vuelco se incrementa en un **44,85%** y un **60,70%** respecto a los valores límite especificados en el CTE-DB-SE-C (v2019). Por lo que se concluye la idoneidad de empleo del material mediante el cálculo analítico desarrollado a partir de la normativa española.

5.2.5 Caracterización e hipótesis de cálculo (Eurocódigo EC-7, 1997)

El EC-7 (UNE-EN 1997) denominado Proyecto Geotécnico, desarrolla los aspectos geotécnicos de un proyecto de estructuras, de edificación y obra civil, estableciendo las reglas para determinar las acciones geotécnicas y el planteamiento de las comprobaciones de cálculo.

Este documento es ampliamente utilizado y presenta cada vez mayor relevancia en el proyecto geotécnico. Por lo que resulta de interés, desarrollar un análisis de resultados para la aplicación que ocupa este apartado teniendo en cuenta las distintas hipótesis de cálculo.

La idea principal para abordar el proyecto geotécnico mediante cálculos se fundamenta en tres nociones principales:

1. Definición de los “Estados límite” (últimos o de servicio) que deben satisfacer cada una de las actuaciones geotécnicas contempladas en los proyectos. Donde se puede diferenciar entre:

- Estado Límite último (ELU) asociado al colapso que genera el fallo estructural. En este estudio se considera la situación persistente o transitoria según la Ecuación 15:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \sum_{m \geq 1} \gamma_{G,m} G^*_{k,m} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}; \text{Ecuación 15}$$

Donde

$G_{k,j}$ valor característico de cada acción permanente “j”

$G^*_{k,m}$ valor característico de cada acción permanente de valor no constante “m”

$Q_{k,1}$ valor característico de la acción variable dominante

$\psi_{0,i} Q_{k,i}$ valor de combinación de las acciones variables secundarias con la acción variable dominante.

$\gamma_G, \gamma_Q, \gamma_P$ coeficientes parciales de las cargas permanentes, de las acciones variables y del pretensado respectivamente.

b) Estado límite de servicio (ELS), en donde se diferencian:

Combinación característica (poco probable)

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{m \geq 1} G^*_{k,m} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}; \text{Ecuación 16}$$

Esta combinación, que coincide con la combinación fundamental de ELU se utiliza normalmente para la verificación de ELS irreversibles.

Combinación frecuente

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{m \geq 1} G^*_{k,m} + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}; \text{Ecuación 17}$$

Esta combinación se utiliza en general para la verificación de ELS reversibles.

Combinación casi permanente

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{m \geq 1} G_{k,m}^* + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} ; \text{Ecuación 18}$$

Suele emplearse para verificar algunos ELS reversibles y para la evaluación de los efectos diferidos.

2. **Método de cálculo mediante el empleo de coeficientes parciales de seguridad**, que repercute en las acciones (γ_F) o efectos de las mismas (γ_E); materiales referidos a parámetros geotécnicos (γ_M) y por último resistencias del terreno (γ_R).

3. Determinación de diferentes **“Enfoques de Proyecto”**, los cuales constituyen diferentes formas de cuantificar la incertidumbre en el cálculo de los estados límite mediante la adopción de los distintos coeficientes parciales de seguridad.

De ello, se deduce que **la principal diferencia del marco desarrollado por el EC-7 con respecto a la práctica geotécnica tradicional es la adopción del método de cálculo basado en coeficientes parciales de seguridad.**

Con objeto de sistematizar el análisis, este estudio se centra en el estado límite tipo EQU, aunque el Eurocódigo indica cinco tipos de estado límite último más.

En el estado límite EQU se analiza la pérdida de equilibrio estático de la estructura, considerado como cuerpo rígido. En este tipo de estado límite, la resistencia de los materiales estructurales y del terreno no colabora en el equilibrio.

Los distintos Enfoques de Proyecto se diferencian en los parámetros a los que se aplican simultáneamente los coeficientes parciales de seguridad: acciones, materiales o resistencias, como se muestra en la Tabla 42.

Tabla 42. Uso de los coeficientes parciales de seguridad en los diferentes Enfoques de Proyecto

Enfoque de Proyecto		Mayoración de acciones	Minoración de parámetros geotécnicos	Minoración de resistencias
1	Combinación 1	X		
	Combinación 2		X	$\chi^{(a)}$
2		$\chi^{(b)}$		
3		$\chi^{(b)}$	X	

^(a) (Sólo pilotes cargados axialmente y anclajes)

^(b) (o efectos de las acciones)

Fuente: Adaptado de Eurocódigo EC-7 Parte 1 (UNE-EN 1997).

Las verificaciones del Estado Límite último pueden llevarse a cabo a partir de los tres Enfoques de Proyecto disponible:

- DA1 – Combinación 1: A1+M1+R1
- DA1 – Combinación 2: A2 + M2 + R1
- DA2: A1+M1+R2
- DA3: (A1 o A2)* + M2 + R3

A1 es para acciones estructurales y A2 para acciones geotécnicas.

Tanto para el análisis en condiciones drenadas y no drenadas, se emplea el conjunto de los factores parciales de seguridad resumidos en la Tabla 43 y la Tabla 44 para los distintos Enfoques de Proyecto.

Tabla 43. Factores parciales para el Enfoque de Proyecto 1

Parámetro		Símb.	DA1-1			DA1-2		
			A1	M1	R1	A2	M2	R1
Acción permanente (G)	Desfavorable	γ_G	1,35			1,00		
	Favorable	$\gamma_{G,fav}$	1,00					
Acción variable (Q)	Desfavorable	γ_Q	1,50			1,3		
	Favorable	-	0			0		
Resist. al corte		γ_ϕ					1,25	
Cohesión (c')		γ_c						
Resist. al corte no drenado (c_u)		γ_{c_u}					1,40	
Peso específico (γ)		γ_γ					1,0	
Vuelco (R_v)		γ_{R_h}			1,0			1,0
Deslizamiento (R_h)		γ_{R_e}						1,0

Factores válidos para situaciones persistentes y transitorias

Fuente: Adaptado de Eurocódigo EC-7 Parte 1 (UNE-EN 1997).

Tabla 44. Factores parciales para el Enfoque de Proyecto 2 y 3

Parámetro		Símb.	DA2/DA2*			DA3		
			A1	M1	R2	A2*	M2	R3
Acción permanente (G)	Desfavorable	γ_G	1,35			1,0		
	Favorable	$\gamma_{G,fav}$	1,0					
Acción variable (Q)	Desfavorable	γ_Q	1,5			1,3		
	Favorable	-	0			0		
Resist. al corte		γ_ϕ		1,00			1,25	
Cohesión (c')		γ_c						
Resist. al corte no drenado (c_u)		γ_{c_u}					1,4	
Peso específico (γ)		γ_γ					1,0	
Vuelco (R_v)		γ_{R_h}			1,4			1,0
Deslizamiento (R_h)		γ_{R_e}			1,1			

Factores válidos para situaciones persistentes y transitorias

* Aplicado a acciones geotécnicas

Fuente: Adaptado de Eurocódigo EC-7 Parte 1 (UNE-EN 1997).

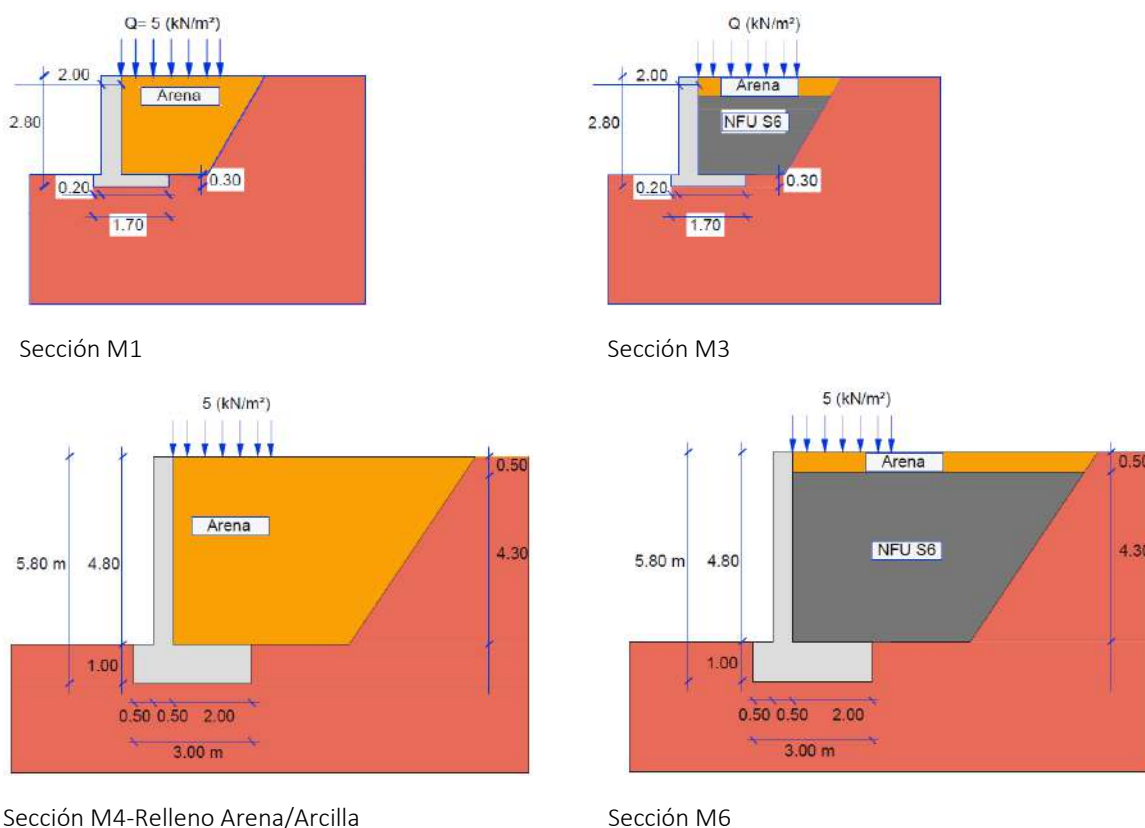
El análisis de los diferentes Enfoques de Proyecto existentes en el EC-7 ha hecho que el Anejo Nacional Español opte inicialmente por el Enfoque de Proyecto 2 para todas las actuaciones geotécnicas, salvo para el cálculo de la estabilidad global y de taludes para la que se selecciona el Enfoque de Proyecto 3.

El Enfoque de Proyecto 2 no minorra los parámetros geotécnicos, por lo que se parece más a las prácticas habituales en España, aspecto que se ha considerado primordial mantener sin cambios. Sin embargo, la gran diferencia entre el método empleado en España y el que se desarrolla en el Anejo Nacional Español es en el tratamiento de las acciones, donde estas o el efecto de las mismas se mayoran. **La disparidad de los resultados obtenidos, de acuerdo al Enfoque de Proyecto 2, ha conllevado al cálculo de todos los Enfoques de Proyecto con el objetivo de verificar los factores de seguridad obtenidos y compararlos con los resultados según el procedimiento especificado en el CTE-DB-SE-C (v2019).**

5.2.5.1 Cálculo muros de 2,50 m y 4,80 m de alzado según EC7-1, 1997

Se analiza mediante cálculo analítico basado en el procedimiento descrito en el EC7-Parte 1, los distintos factores de seguridad que se obtienen para un muro de contención en L, en base al relleno que se emplee en el trasdós de este, según las secciones que se emplearon en apartados anteriores. La sección M2 se descarta en este apartado al no poder ejecutarse en obra, ya que el NFU siempre debe estar aislado del contacto directo con la atmósfera; además de presentar un factor de seguridad inferior a la sección M3 que si considera dicha capa, como se verifico en el cálculo del apartado anterior.

En línea con la importancia que la cohesión de los materiales presenta en los resultados de estabilidad, se considera material tipo arcilloso como relleno en el trasdós de la sección M4 con el fin de poder comparar los resultados con la misma sección, pero suponiendo arena como relleno en el trasdós del muro de contención, como puede apreciarse en la Figura 26.



Sección M4-Relleno Arena/Arcilla

Sección M6

Figura 26. Hipótesis muro altura 2,80 m y 5,80 m y base 1,70 m y 3,00 m para EC7-1

Las hipótesis desarrolladas determinan el factor de seguridad al deslizamiento obtenido en base al Enfoque de Proyecto 2 y de acuerdo al CTE-DB-SE-C para las secciones planteadas anteriormente, como muestra la Tabla 45 para las secciones M4 y M6, considerando en la primera de ellas relleno arcilloso, además del relleno sin cohesión constituido por la arena.

Tabla 45. Cálculo del F.S. al deslizamiento para una situación persistente en sección M4 y M6

Deslizamiento

Relleno	M4 Arena	Incremento	M4 Arcilla	Incremento	M6	Incremento	F.S. Límite
CTE	1,05	-30,00%	1,05	-30,00%	1,77	15,25%	1,5
EC7-1 P2	0,83	-24,54%	0,98	-10,90%	2,53	56,52%	1,1
Dif. (%)	<u>20,95</u>	<u>18,20%</u>	<u>6,67</u>	<u>63,66%</u>	<u>30,03</u>	<u>73,01%</u>	<u>26,67</u>

Los resultados obtenidos en la Tabla 45 indican que, para **materiales sin cohesión**, como en este caso la arena, **los coeficientes de resistencia obtenidos se equiparan** respecto al coeficiente límite en igual proporción **para el cálculo mediante CTE-DB-C y EC-7**. Ahora bien, para **materiales con cohesión**, como puede ser en este ejemplo la arcilla y el NFU, **los coeficientes de resistencia al deslizamiento no se equiparan porcentualmente**, siendo más desfavorable en el caso del CTE-C, al suponer este como mínimo un 25% de las tensiones verticales actuando en el trasdós del muro para el cálculo de los empujes. Por último, el caso que combina arena y NFU, muestra un desfase superior, ya que en el caso del EC-7 no se consideran empujes en gran parte del alzado del muro, al tener el NFU un peso específico muy bajo, además de la cohesión del material. **De esto se deduce que mediante este procedimiento los resultados son sobredimensionados al compararlo con los valores obtenidos mediante el CTE-C**.

En la Tabla 46 se recogen los resultados obtenidos en los cálculos para el muro de contención suponiendo relleno NFU y una capa de arena superior según sección M4 y M6, siguiendo la práctica habitual española (CTE-BD-SE-C, v2019) y el método preconizado en el EC-7 para los distintos enfoques de proyecto. Con ello, se observa el **desfase porcentual entre el factor de seguridad límite y el obtenido mediante el cálculo** siguiendo los procedimientos de las **distintas normativas** reseñadas.

Tabla 46. Comparativa del F.S. al deslizamiento EC-7 y CTE-DB-SE-C para sección M4 y M6

Deslizamiento

Relleno	Sección M4-Arena	Incremento (%)	Sección M6	Incremento (%)	F.S. Límite
CTE-DB-SE-C	1,05	-42,85	1,77	15,25	1,5
Enfoque proyecto 1.1	0,77	-29,87	2,78	60,43	1 1,1
Enfoque proyecto 1.2	0,67	-49,25	1,65	33,33	
Enfoque proyecto 2	0,83	-32,53	2,53	56,52	
Enfoque proyecto 3	0,67	-49,25	1,65	33,33	

Respecto al factor de seguridad al deslizamiento, la Tabla 46 indica que el Enfoque de proyecto 1.2 y 3 suponen un menor sobredimensionamiento de la estructura para la sección M6, al ser el incremento menor respecto al valor límite. Además, el relleno con material convencional tipo arena, arroja un factor de seguridad inferior al valor límite, por lo que la sección del muro planteada no sería válida tampoco según los cálculos desarrollados por el EC7 al igual que indicaron los resultados obtenidos según CTE-DB-SE-C, (v2019).

Tabla 47. Comparativa del F.S. al vuelco EC-7 y CTE-DB-SE-C para sección M4 y M6

Vuelco

Relleno	Sección M4-Arena	Incremento (%)	Sección M6	Incremento (%)	F.S. Límite
CTE-DB-SE-C	2,0	0	3,13	35,06	2,0
Enfoque proyecto 1.1	1,76	43,18	5,45	81,65	1,0
Enfoque proyecto 1.2	1,87	46,52	4,0	75,00	
Enfoque proyecto 2	1,76	43,18	5,45	81,65	
Enfoque proyecto 3	1,87	46,52	4,0	75,00	

En cuanto al factor de seguridad al vuelco cuyos resultados se muestran en la Tabla 47, se observa un comportamiento similar. La minoración de los parámetros del terreno en los Enfoques de Proyecto 1.2 y 3, conlleva un decremento de la cohesión y que por consiguiente los empujes se incrementan sobre el trasdós, siendo los resultados más conservadores.

Para analizar el efecto que tiene la altura del muro en el factor de seguridad al deslizamiento y al vuelco se muestran los resultados obtenidos en la Tabla 48 y la Tabla 49 la sección M1 y M3 de 2,50 m de alzado.

Tabla 48. Comparativa del F.S. al deslizamiento EC-7 y CTE-DB-SE-C para sección M1 y M3

Deslizamiento

Relleno	Sección M1	Incremento (%)	Sección M3	Incremento (%)	F.S. Límite
CTE-DB-SE-C	1,18	-27,00	1,98	24,24	1,5
Enfoque proyecto 1.1	0,81	-23,45	3,39	67,55	1 1,1
Enfoque proyecto 1.2	0,71	-36,78	2,94	62,25	
Enfoque proyecto 2	0,74	-48,81	3,08	64,28	
Enfoque proyecto 3	0,71	-36,78	2,94	62,58	

Tabla 49. Comparativa del factor de seguridad al vuelco EC-7 y CTE-DB-SE-C para sección M1 y M3

Vuelco

Relleno	Sección M1	Incremento (%)	Sección M3	Incremento (%)	F.S. Límite
CTE-DB-SE-C	2,84	29,57	3,51	43,01	2,0
Enfoque proyecto 1.1	2,00	50,00%	4,96	79,83	1,0
Enfoque proyecto 1.2	2,20	54,50%	4,74	78,90	
Enfoque proyecto 2	2,00	50,00%	4,96	79,83	
Enfoque proyecto 3	2,20	54,50%	4,74	78,90	

Como puede apreciarse en la Tabla 48 y la Tabla 49, los muros de menor altura presentan un incremento más considerable en los coeficientes parciales de seguridad, respecto a los valores límite, debido principalmente a la inexistencia de empujes en el trasdós por el efecto de la cohesión.

Para las dos alturas de muro de contención analizadas, la variación en el **factor de seguridad al deslizamiento** respecto al valor límite, muestran un comportamiento similar en el caso de considerar materiales sin cohesión como la arena. Mientras que para **materiales con cohesión el CTE-DB-SE-C presenta una variación de un 25% respecto al valor límite**, para el cálculo realizado por el EC7-P1 se alcanza como mínimo un **62% de variación**, según indica la Figura 27.

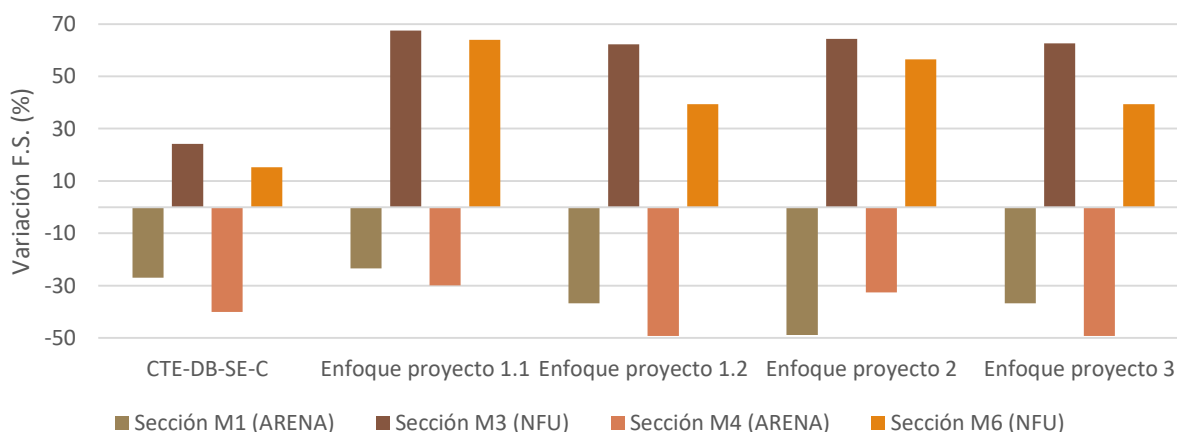


Figura 27. Variación del F.S. al deslizamiento para los muros de contención según EC7-1 y CTE-DB-SE-C

Respecto al vuelco, la Figura 28 muestra la variación del factor de seguridad respecto al valor límite para las distintas secciones y procedimientos de cálculos.

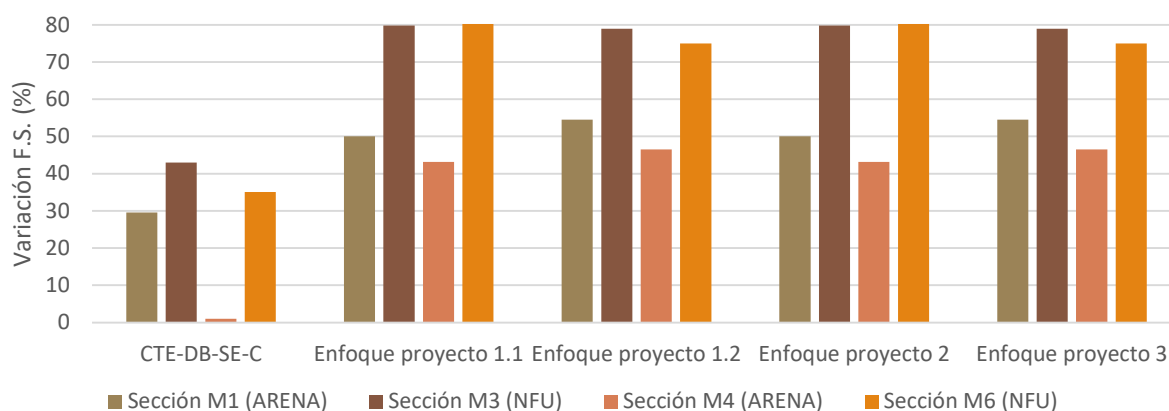


Figura 28. Variación en el F.S. al vuelco para los muros de contención según EC7-1 y CTE-DB-SE-C

Al igual que en el caso anterior al considerar materiales con cohesión los empujes y por lo tanto, los momentos desestabilizadores se reducen, favoreciendo el incremento del factor de seguridad. **En la sección M4 según los cálculos obtenidos por el CTE-DB-SE-C al considerarse como mínimo el 25% de las tensiones verticales actuando sobre el trasdós, el factor de seguridad se reduce, ajustándose al valor límite.**

5.2.6 Cálculo numérico de muro de contención mediante PLAXIS 2D V8/ V20

En esta segunda fase de análisis, se procede al modelado en el programa de elementos finitos PLAXIS 2D V8 y V20 de las secciones analizadas en los apartados anteriores. Se busca comprobar el diseño de las estructuras de contención lateral con el fin de interpretar y analizar fenómenos como los desplazamientos laterales indeseados del terreno.

Este método se basa en la generación de subdivisiones del modelo en un número finito de elementos de menor envergadura, en lugar de la idea de continuidad del cálculo diferencial. Cada uno de estos elementos presenta un número de nodos y estos a su vez poseen determinados grados de libertad que corresponden a valores discretos de las incógnitas del problema a resolver. En el caso de cálculo de deformaciones los grados de libertad representan las componentes del desplazamiento de cada nodo.

El empleo de este programa permite simular el comportamiento del terreno a partir del modelo lineal elástico de Mohr-Coulomb. Para cada estrato se estima una media constante de rigidez que se incrementa linealmente con la profundidad. Debido a esta rigidez constante, los cálculos se desarrollan de una forma relativamente rápida y se obtiene una estimación de las deformaciones del modelo.

Este programa de cálculo permite obtener la superficie de rotura más desfavorable y por lo tanto analiza la estabilidad global de la sección, lo que supone considerar la interacción entre diferentes mecanismos de rotura. La curva de rotura obtenida por elementos finitos define el factor de seguridad asociado a dicha rotura considerando los distintos modos de fallo habituales (deslizamiento, hundimiento, vuelco...).

En el primer cálculo se analizan las secciones del proyecto en base a los Estado Límite de Servicio (ELS), sin el empleo de los Enfoques de Proyecto que indica el Eurocódigo 7. Se considera un comportamiento correcto frente a las deformaciones y asentamientos excesivos si se verifican para las condiciones de dimensionado, que el efecto de las acciones no supera el valor admisible.

- 0. Fase inicial
- 1. Fase 1 (ELS)
- 2. Fase 2 (ELS)
- 3. Fase 3 (ELS)

....

El comportamiento correcto de la cimentación, en relación con la situación que se analice, queda verificado si se cumple la siguiente condición:

$$E_{ser} \leq C_{lim}$$

Siendo

E_{ser} el efecto de las acciones para una determinada situación de dimensionado

C_{lim} el valor límite para el mismo efecto.

Para el cálculo de problemas completamente horizontales, se emplea el coeficiente de empuje en base a la expresión empírica de Jaky, la cual se indica en la Ecuación 19.

$$K_0 = 1 - \sin \Phi ; \text{Ecuación 19}$$

Para materiales sin cohesión se concluye que para evitar los puntos plásticos en el modelo de Mohr-Coulomb, el valor de K_0 oscila entre los valores obtenidos según la Ecuación 20:

$$\frac{1 - \sin \Phi}{1 + \sin \Phi} < K_0 < \frac{1 + \sin \Phi}{1 - \sin \Phi} ; \text{Ecuación 20}$$

El cálculo plástico se emplea para llevar a cabo un análisis de deformación elasto-plástico en el que no se consideran el cambio de la presión de poro respecto al tiempo. La matriz rígida en un cálculo plástico estandar se basa en la geometría original de la deformada, considerándose apropiado en la mayoría de las aplicaciones geotécnicas. Los resultados obtenidos se consideran razonablemente precisos, aunque no se considere el historial de carga ni el proceso de consolidación.

Para calcular el factor de seguridad se reducen los parámetros de resistencia del terreno hasta que se desarrolla al completo el mecanismo de fallo, según la Ecuación 21:

$$SF = \frac{\text{resistencia disponible}}{\text{resistencia de fallo}} = \text{valor de } \sum Msf \text{ de fallo} ; \text{Ecuación 21}$$

Los parámetros de resistencia del terreno $\tan \Phi$ y cohesión se reducen hasta que se produce el fallo de la geometría. El multiplicador $\sum Msf$ se emplea para definir el valor de la resistencia del terreno como una etapa dada en el análisis, según la Ecuación 22.

$$\sum Msf = \frac{\tan \Phi_{entrada}}{\tan \Phi_{reducada}} = \frac{C_{entrada}}{C_{reducada}} = \frac{s_{u, entrada}}{s_{u, reducida}} = \frac{\text{resistencia a tracción}_{entrada}}{\text{resistencia a tracción}_{reducada}} ; \text{Ecuación 22}$$

Como se ha indicado debe comprobarse al final del cálculo que se ha desarrollado el mecanismo de rotura. En ese caso, el factor de seguridad viene dado por la Ecuación 23.

$$SF = \frac{\text{resistencia disponible}}{\text{resistencia de rotura}} = \text{valor de } \sum Msf \text{ en rotura} ; \text{Ecuación 23}$$

Concluido el análisis de los Estados Límite de Servicio, a continuación se calculan los Estado Límite Últimos basados en los distintos Enfoques de Proyecto que indica el Eurocódigo 7 (EC-7-P1), en base a las secciones propuestas en el apartado anterior. La posibilidad de aplicar los factores parciales para las cargas y los parámetros del terreno permite incluir los resultados del factor de seguridad global junto a los resultados obtenidos anteriormente.

En este procedimiento, los cálculos de diseño (ELU) se inician a partir de cada cálculo desarrollado para ELS. En este caso un factor parcial en un parámetro de rigidez solo se usa para calcular desplazamientos adicionales como resultado de la redistribución de tensiones debido a la factorización (mayor) de cargas y los parámetros de resistencia igualmente factorizados (reducidos).

0. Fase Inicial

1. Fase 1 (ELS) → 4. Fase 4 (ELU)

2. Fase 2 (ELS) → 5. Fase 5 (ULS)

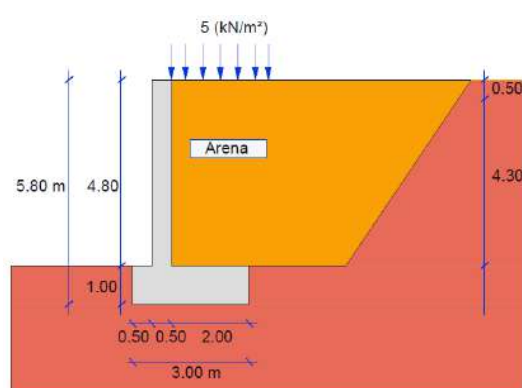
3. Fase 3 (ELS) → Fase 6 (ELU)

Una vez que los cálculos de ELU han finalizado, se considera que el modelo cumple con el Enfoque de Proyecto correspondiente. Si existen incertidumbres al respecto debido a deformaciones excesivas, puede llevarse a cabo un cálculo adicional de seguridad, usando el mismo enfoque de proyecto, que deberá arrojar un valor estable de M_{sf} mayor a la unidad.

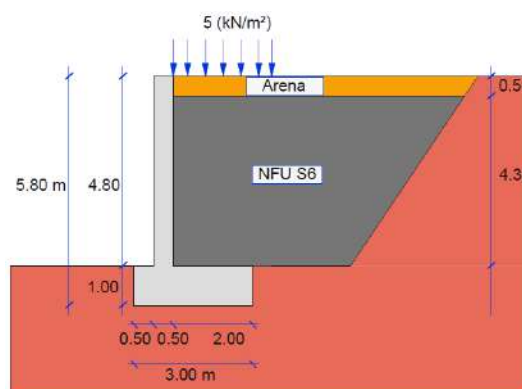
5.2.6.1 Cálculo Estado Límite de Servicio en PLAXIS 2D V8 – V20

En el programa de cálculo se incluyen cinco fases de análisis. En la fase uno se presenta el modelo inicial compuesto por 4,80 m de relleno convencional en el trasdós del muro de contención. En la fase dos se excava el relleno existente, para en la fase tres seleccionar la sección que incluya NFU. En la fase cuatro se aplica la sobrecarga de uso ($Q=5 \text{ kN/m}^2$) sobre el estrato superior. Por último, en la fase cinco se calcula el factor de seguridad global mediante el procedimiento “Phi-c reduction”.

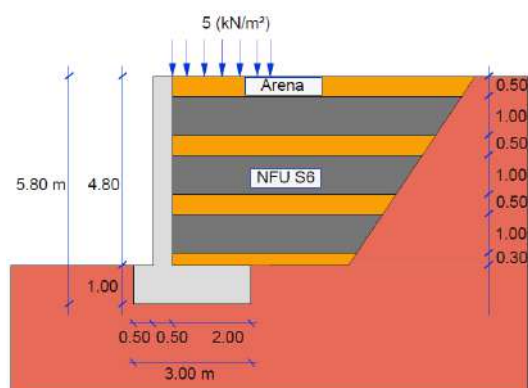
Se modela la sección M7, compuesta por capas de 0,50 m de espesor de material convencional que separa las capas de 1 m de espesor de NFU, siguiendo las recomendaciones establecidas en la norma americana (ASTM D6270, 2020), donde se fijaba el espesor máximo de los rellenos Clase I en 1 m, para un tamaño de partícula menor a 20 cm, según se observa en la Figura 29.



Sección M4



Sección M6



Sección M7

Figura 29. Hipótesis muro altura 5,80 m y base 3,00 m para PLAXIS 2D V8 Y V20

Con el fin de determinar la influencia que puede tener la muestra S5 o S6 en los resultados finales, se calcularon los valores del factor de seguridad según la Tabla 50, donde además se evalúa la diferencia en el factor de seguridad obtenido al considerar el relleno con material convencional -sección M4- o con NFU -sección M6 y M7-.

Tabla 50. F.S. Global de muro con h= 5,80 m muestras S5 y S6 PLAXIS 2D V8 – V20

Sección	M4	M6-S5	Dif. (%)	M7-S5	Dif. (%)	M6-S6	Dif. (%)	M7-S6	Dif. (%)
<i>F.S. Global</i>	1,58	2,44	35,24	2,09	24,40	2,69	41,26	2,21	28,50

Los rellenos con **NFU incrementan el factor de seguridad respecto a la sección con material convencional** entre un **24,40%** para la solución **M7-S5**, y un **41,26%** para la solución **M6-S6**. Se deduce además que suponer en el modelado la **separación de las capas de NFU mediante capas de material tipo arena reduce entre un 10% y 12%** la mejora en el **factor de seguridad** obtenido respecto a la sección M6 para ambas muestras de NFU. Además, **las diferencias en el factor de seguridad global** para cada una de las mezclas de granulado de NFU no suponen más de un **6%** de diferencia, presentando la muestra **S6 un mejor comportamiento**.

Los desplazamientos se producen por el asiento y el giro de la cimentación, no por los empujes que son cero debido a la cohesión y a la consiguiente grieta de tracción que aparece en cada una de las secciones. Se observa como los desplazamientos van incrementándose a medida que el factor de seguridad se mantiene constante, según los valores de la Figura 30.

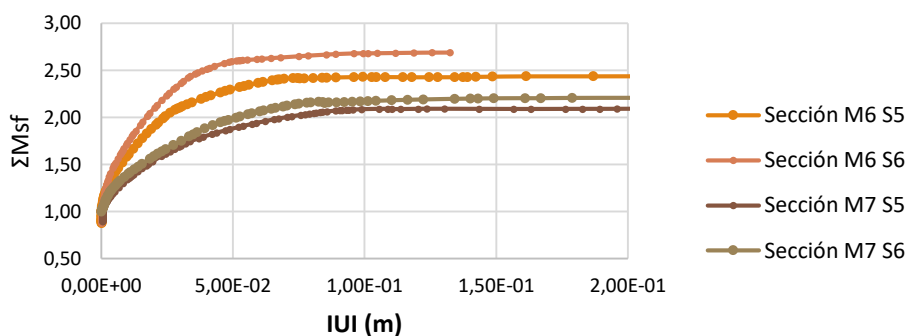


Figura 30. Factor de seguridad global de cada sección de muro en L según PLAXIS 2D V8 – V20

5.2.6.2 Cálculo Estado Límite Último en PLAXIS 2D V20

Para las secciones M3 y M6, se calculan los distintos Enfoques de Proyecto, en donde se indican los factores parciales para las cargas y los materiales (resistencia), y cuyos resultados se muestran en la Tabla 51 y en la Tabla 52. No se incluyen los cálculos para la sección M1 y M4, ya que no se alcanza la estabilidad global en la última fase de cálculo.

Tabla 51. Diferencia entre F.S. de ELU y ELS para sección M6

Enfoque proyecto	F.S. global (ELU)	F.S. global (ELS)	Dif. ELU y ELS (%)
<i>Sección</i>	Sección M6	Sección M6	
<i>Enfoque proyecto 1.1</i>	2,28	2,69	15,24
<i>Enfoque proyecto 1.2</i>	2,53		5,59
<i>Enfoque proyecto 2</i>	2,28		15,00
<i>Enfoque proyecto 3</i>	2,54		5,59

Tabla 52. Diferencia entre F.S. de ELU y ELS para la sección M3

Enfoque proyecto	F.S. global (ELU)	F.S. global (ELS)	Dif. ELU y ELS (%)
<i>Sección</i>	Sección M3	Sección M3	
<i>Enfoque proyecto 1.1</i>	2,52	2,78	16,54
<i>Enfoque proyecto 1.2</i>	2,32		9,31
<i>Enfoque proyecto 2</i>	2,52		16,54
<i>Enfoque proyecto 3</i>	2,32		9,31

Se observa que las diferencias entre el F.S. en ELS y el ELU oscilan entre el 6% y el 17%, correspondiéndose la mayor diferencia con aquellos enfoques que mayoran las acciones sobre la estructura, mientras que la minoración de la resistencia de los materiales aporta factores de seguridad cercanos para los dos estados límite.

Al comparar la diferencia respecto al nivel límite de los factores de seguridad obtenidos en PLAXIS 2D V20 para el cálculo en base a los ELS y a los ELU, se observa según la Figura 31 que la mínima “sobreseguridad” que se obtiene con el análisis en ELS es de 2,69 y 2,78 para el muro de alzado 4,80 m y 2,5 m respectivamente, mientras que para los cálculos en ELU es de 2,50. Esto significa que si se realiza el diseño en ELU se alcanza entre un 5 y un 10% menos de seguridad que si el diseño se lleva a cabo en ELS.

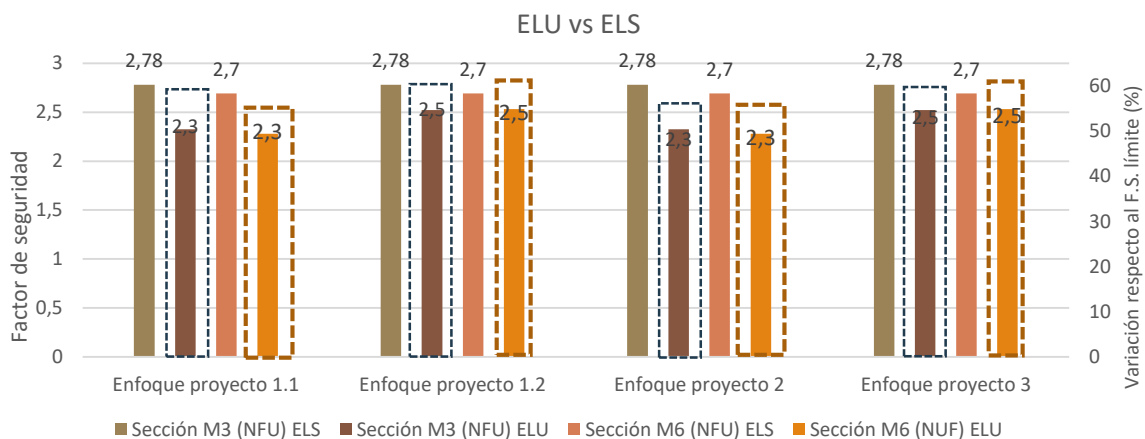


Figura 31. Comparativa del F.S. obtenido en PLAXIS según ELS y ELU para las secciones M3 y M6

5.2.7 Comportamiento térmico muro de contención en L 4,80 m de alzado

La granulometría analizada no presenta filamentos de acero expuesto, por lo que no es necesario calcular el calor generado por la oxidación de este material. De esta forma, el riesgo por autocombustión se reduce, evitándose una generación de calor que puede prolongarse en el tiempo desde el primer año de puesta en obra hasta seis años después, dependiendo del diámetro del acero.

Un aumento de la temperatura exterior del aire puede provocar la expansión térmica del intradós del muro, mientras que el trasdós permanece a una temperatura inferior. Esto conlleva la deflexión hacia el interior del muro y, en consecuencia, un aumento de la tensión lateral en el suelo detrás del muro y a un aumento de los momentos de deflexión en el propio muro.

Las propiedades térmicas del granulado de NFU se basan en la bibliografía analizada, como queda recogido en la Tabla 36, ya que no se han realizado pruebas de laboratorio. Las capas de material convencional se basan en valores usuales encontrados igualmente en la bibliografía disponible.

El análisis consta de las siguientes fases:

- Fase inicial: Se mantuvieron las opciones de cálculo y presión intersticial por defecto. Para el cálculo térmico se seleccionó la opción “Gradiente del terreno”. En las condiciones de modelo se activó la opción de “Flujo Térmico” y se indicó una temperatura de referencia de 15°C.
- Fase 1: Para el cálculo de la presión intersticial se seleccionó la opción “Flujo de agua subterránea en estado estacionario” y para el cálculo térmico se seleccionó “Flujo térmico en estado estacionario”. La opción de “Puesta a cero los desplazamientos” también se marcó. Dentro del modelo se activó la opción “Clima” y se indicó una temperatura exterior de 25°C. La opción “Flujo térmico” debe desactivarse.
- Fase 2: Para este cálculo se seleccionó la opción “Flujo de agua subterránea en estado estacionario”. En el tipo de cálculo térmico se fijó “Uso de la temperatura de la fase anterior”. Se consideró un intervalo de tiempo de 100 días para que se aplicara una función de la temperatura creada y se indicó un valor de 30 para la amplitud y un periodo de 365 días. De forma que al considerar un intervalo de tiempo de 100 días en la fase, la temperatura se ha incrementado hasta alcanzar los 50°C, según muestra la Figura 32.

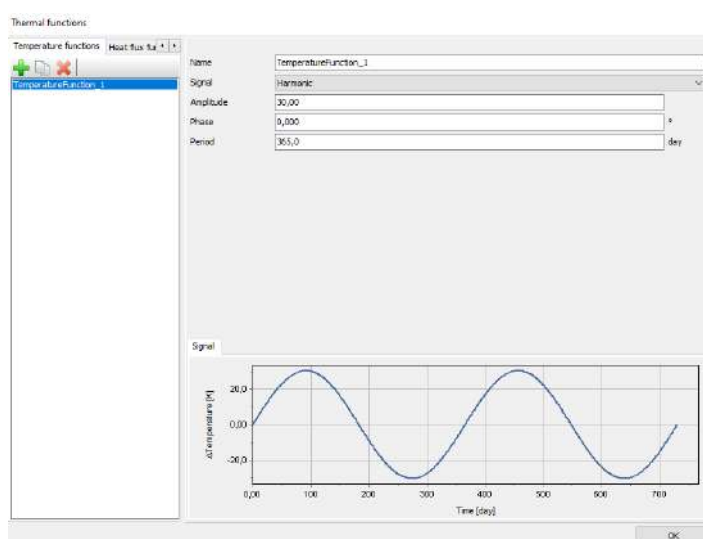


Figura 32. Función de la temperatura para cálculo térmico del muro de contención en PLAXIS 2D V20

Concluidos los cálculos respecto al comportamiento estructural de muro, como resultado del periodo de tiempo en el que se produce el incremento de la temperatura en el intradós, mientras que el trasdós se

encuentra en otras condiciones, el alzado del muro mostrará un **empuje pasivo** contra el terreno en la **sección M4**. La Figura 33 muestra la malla deformada al final de esta fase de cálculo, el valor de la deformación máxima es de 0,050 m para la sección M4.

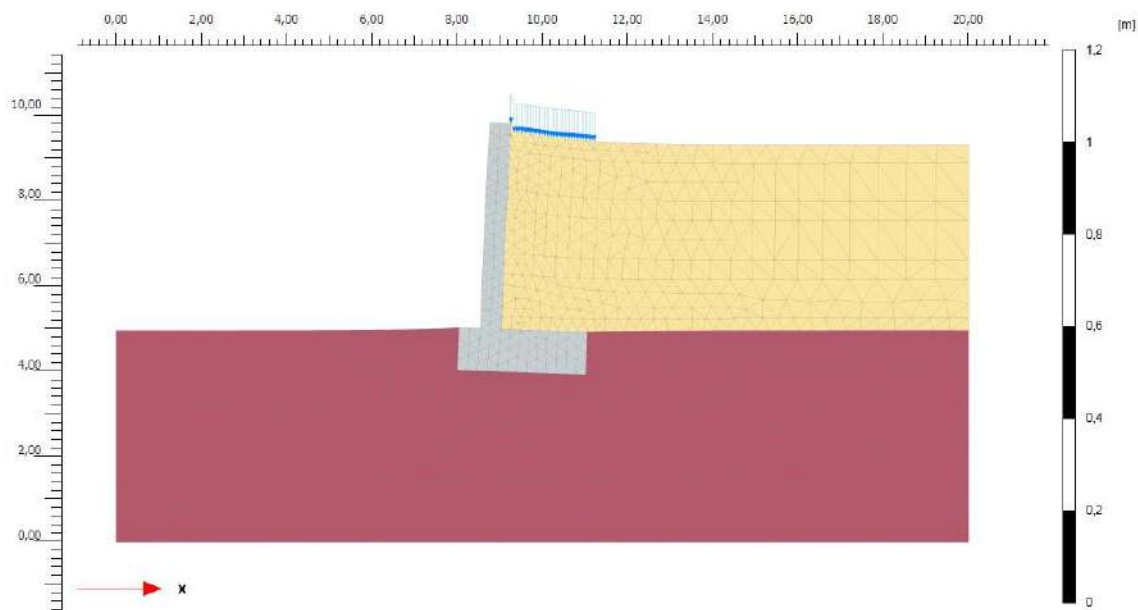


Figura 33. Deformación del muro debido al incremento de la temperatura exterior sección M4

En la **sección M6**, como resultado del periodo de tiempo en el que se produce el incremento de la temperatura en el intradós, mientras que el trasdós se encuentra en otras condiciones térmicas, el alzado del muro mostrará un **empuje activo debido a expansión del material**, a diferencia de la sección M4, que generaba un empuje pasivo sobre el trasdós. La Figura 34 muestra la malla deformada al final de esta fase de cálculo que presenta una deformación máxima de 0,1814 m para esta sección.

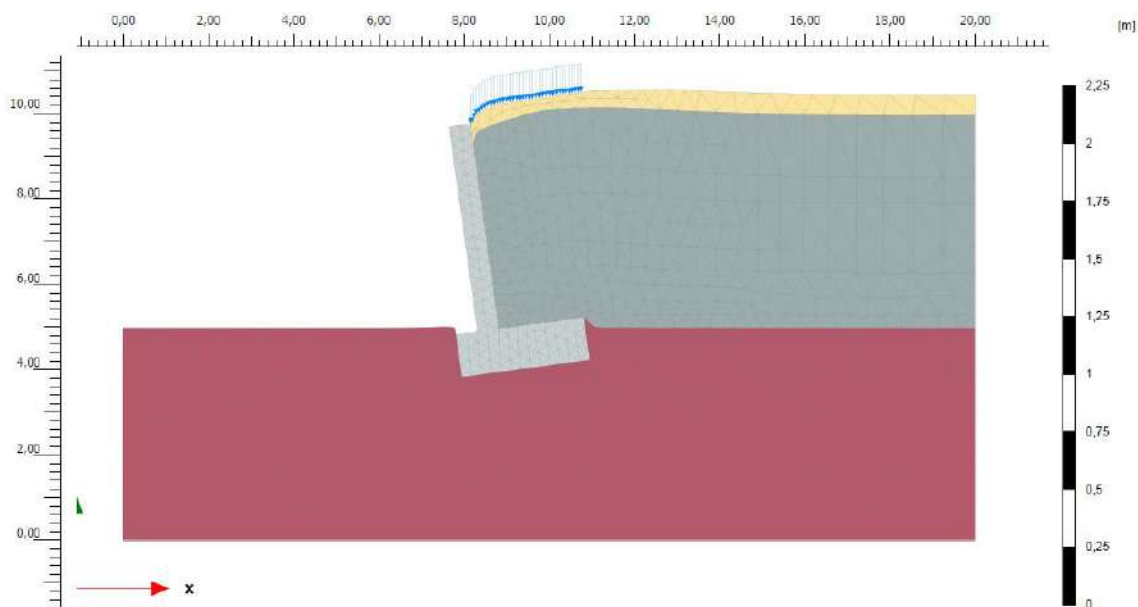


Figura 34. Deformación del muro debido al incremento de la temperatura exterior sección M6

Para la sección M7 la deformación máxima tiene un valor de 0,1139 m y el empuje del muro es hacia el intradós al igual que ocurría en la sección M6, según indica la Figura 35.

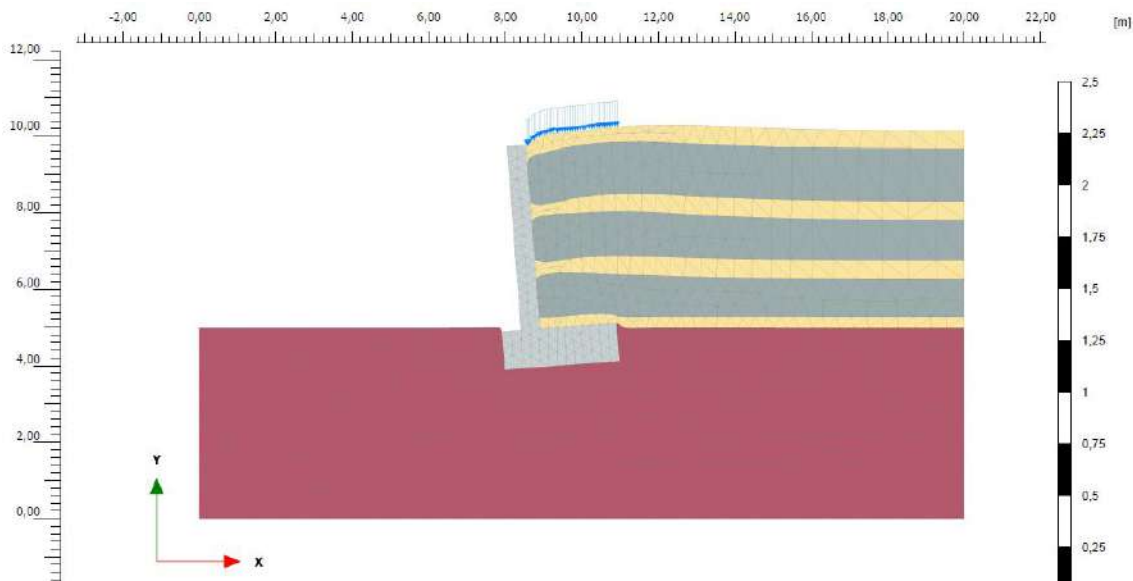


Figura 35. Deformación del muro debido al incremento de la temperatura exterior sección M7

La Figura 36, Figura 37 y Figura 38 muestra la distribución de la temperatura en función de las condiciones climáticas (temperatura del aire) que se corresponden con la fase 2, la cual afecta al intradós del muro de contención con efecto en la temperatura del relleno en el trasdós, para las secciones M4, M6 y M7.

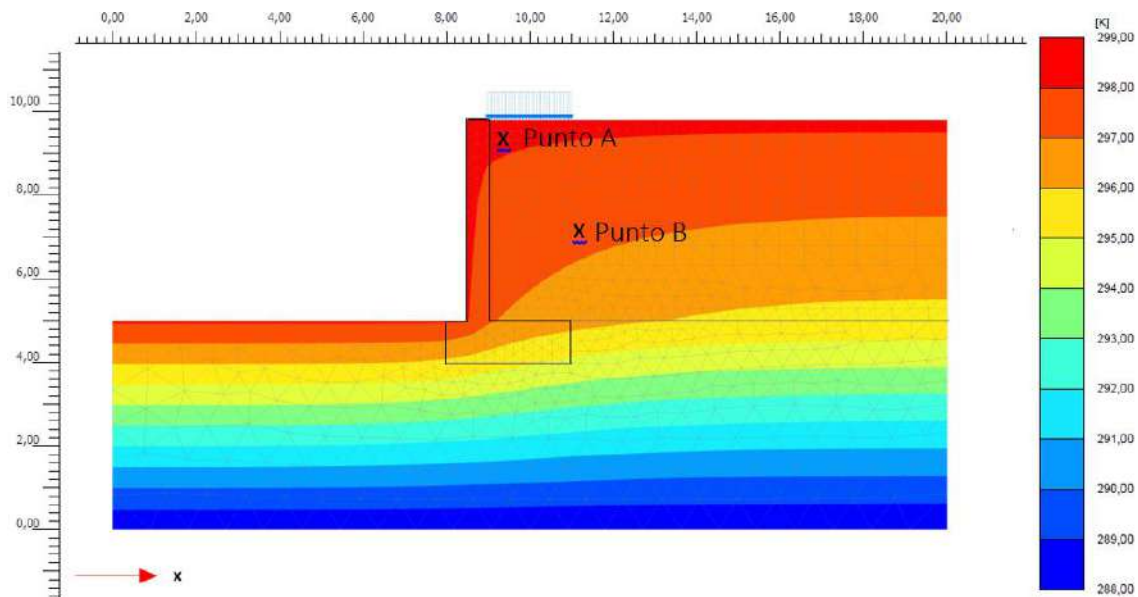


Figura 36. Distribución de la temperatura en proceso de calentamiento sección M4

En la Figura 36 que considera como relleno material tipo arena, se alcanza una temperatura de 24°C, a una profundidad de aproximadamente 3 m desde la cota de coronación. Mientras que en la Figura 37, compuesta por relleno de NFU la profundidad a la que se alcanza dicha temperatura es de 1 m, a partir de la cual va disminuyendo en consonancia con la temperatura de los estratos inferiores.

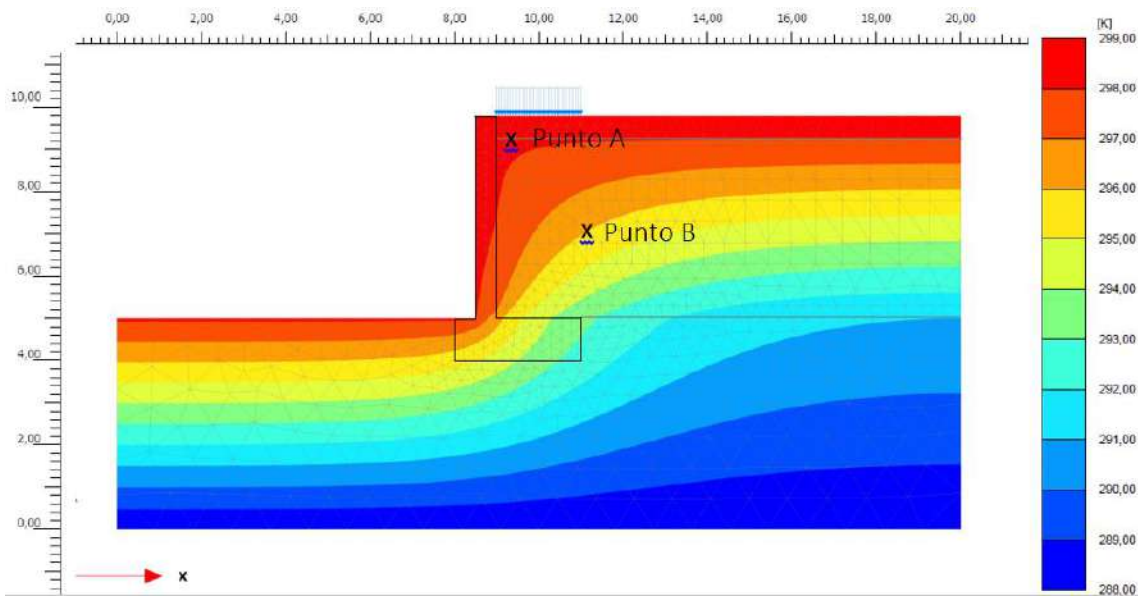


Figura 37. Distribución de la temperatura en proceso de calentamiento sección M6

En el caso de considerar capas intermedias de material convencional para sectorizar el relleno de NFU, el comportamiento es similar a la sección M6, pero marcándose zonas escalonadas que indican las diferencias consideradas en las propiedades térmicas de los materiales que componen la sección M7, según muestra la Figura 38.

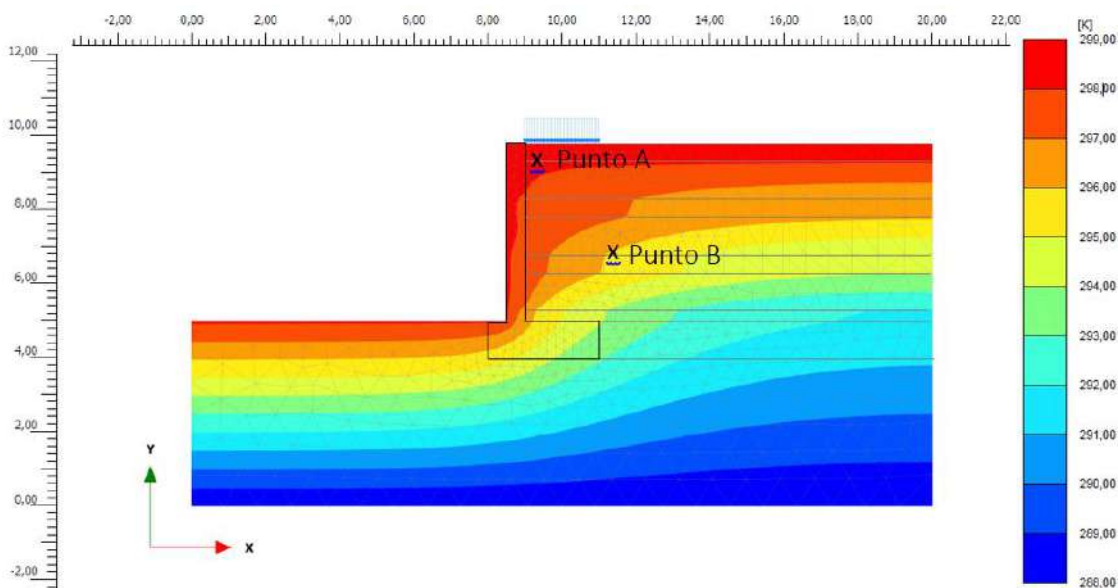


Figura 38. Distribución de la temperatura en proceso de calentamiento sección M7

En la Figura 39 se grafican las curvas de la temperatura en cada uno de los puntos considerados para evaluar el efecto de la temperatura en los rellenos localizados con NFU. Mientras la temperatura en el punto A, próximo a la coronación del relleno, es similar para todas las secciones analizadas, la sección M6 cuyo relleno es completamente NFU, presenta una diferencia de un 20% si se compara con la sección M4 cuyo relleno es arena.

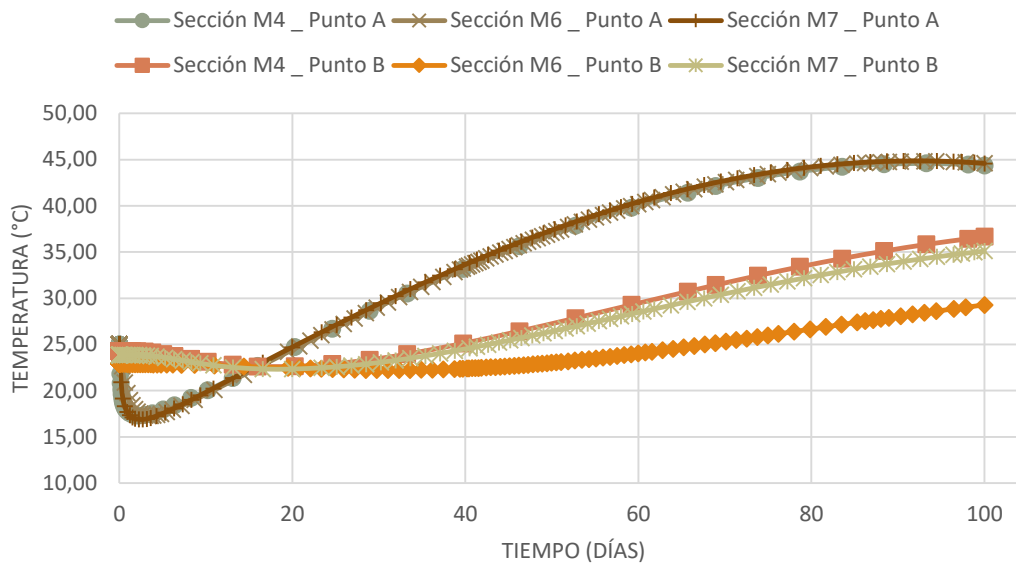


Figura 39. Temperaturas en punto A y B para las distintas secciones

Por ello, se concluye que el NFU no sólo **no aumenta su temperatura** cuando suponemos se encuentra cubierto por una capa permeable como la arena, sino que además impide que la temperatura exterior se refleje en la temperatura interior del relleno a menor profundidad respecto al material convencional, debido principalmente a su baja conductividad.

5.2.8 Recuperación de la sección de la Muralla de Utrera, Sevilla

5.2.8.1 Introducción y antecedentes del recinto amurallado

El municipio de Utrera pertenece a la provincia de Sevilla y se constituye como el décimo término municipal más extenso de la comunidad autónoma de Andalucía. El centro histórico fue declarado en 2002 como Bien de Interés Cultural en calidad de Conjunto Histórico – Artístico.

Entre su arquitectura civil de interés se encuentra el recinto amurallado medieval de la ciudad, que puede observarse de forma recortada en diferentes zonas del casco histórico, entre los que se encuentran el Arco de la Villa, el Portillo de la Misericordia y algunas de las 38 torres originales que protegían el recinto.

En el Plan Especial de Protección y Catálogo del conjunto Histórico de Utrera (Delegaciones Municipales de Urbanismo y obras, 2018), se constata la absorción de los muros defensivos de la Edad Moderna, por lo que se dificulta su trazado. La continuidad de su proyección entre medianeras y su carácter lineal permitió identificarla en algunos tramos como fondo de solares y límites de parcelas que han absorbido parte de su estructura.

Los dos recintos amurallados de los que dispone la ciudad necesitan un tratamiento común, por ello se propone desarrollar en el Estudio de Detalle que dispone el Plan Especial una serie de actuaciones que permitan identificar con precisión los límites de la parcela catastral del Castillo y el recinto amurallado, resolviendo los problemas de identificación de la propiedad de las viviendas colindantes, según muestra la Figura 40.



Figura 40. Aproximación recinto amurallado de Utrera, Sevilla

Por todo ello, se propuso la puesta en valor de los elementos que quedan en los recintos (torres y tramos de la muralla) para cubrir varios objetivos:

1. Restauración, limpieza e impermeabilización de los elementos existentes.
2. Búsqueda de edificios desde donde se pueda acceder para su visita y su registro.
3. Facilitar el uso privado mediante concesión, a los tramos de muralla de difícil o imposible acceso, de forma que se facilite el mantenimiento de los mismos.
4. Demolición de propiedades para generar un espacio accesible junto a la muralla, que promuevan las visitas culturales y turísticas de los elementos que lo merezcan.

A partir de estas consideraciones se analiza la estabilidad de una sección del recinto amurallado por el tramo que parte del Arco de la Villa, según ubicación mostrada en la Figura 40, una de las antiguas puertas de acceso a Utrera, ya que tras la demolición de las medianeras existentes que la mantenían embutida y la creación de nuevas superficies pavimentadas, podría producirse la inestabilidad del conjunto.

5.2.8.2 Argumentación de las hipótesis planteadas

Para argumentar el empleo de NFU en el trasdós de la muralla, se realiza un análisis comparativo entre la solución con **material convencional desarrollada en la hipótesis 1**, y las soluciones que emplean **granulado de neumático** como relleno localizado en la **hipótesis 2**. Para ello, se analizó la **influencia en el ancho de relleno localizado** en el trasdós de la muralla para que las **tensiones horizontales (σ'_h)** fueran **menores**, comprendido **entre 0,50 m para una profundidad de 3 y 6 m** de excavación y un **ancho de 1 m y 1,50 m para 6 m de profundidad**. Además se ejecutó una losa de 0,30 m de espesor apoyada sobre la muralla 0,50 m, la cual descansa directamente sobre el terreno existente y en segundo lugar, sobre una explanada de 1 m de suelo adecuado, constituida en capas de 0,20 m de espesor. Con ello, se analiza la influencia de la explanada en las deformaciones verticales del terreno al aplicar las distintas sobrecargas sobre el acerado (5 kN/m²) y la calzada (10 kN/m²). Por último, en la **hipótesis 3** como medida de refuerzo se disponen **capas de separación** mediante

geotextiles **cada metro**, aunque la disposición y compactación de las mismas se realice en capas de 0,25 m de espesor.

El análisis se ha llevado a cabo en base a la comprobación de distintos criterios:

- Criterio 1: Deformación total en las distintas fases de cálculo.
- Criterio 2: Deformación vertical puntos A, B y C.
- Criterio 3: Empuje horizontal sobre el trasdós de la muralla de Utrera.
- Criterio 4: Factor de seguridad.

En el criterio 1 se analiza la deformación de la malla con el objetivo de conocer la fase en la que se producen los mayores desplazamientos y en qué dirección del plano tienen lugar, concluyéndose la zona del terreno que se encuentra plastificada.

En la Figura 41 se indica la ubicación de los puntos analizados en el criterio 2, donde se analiza la deformación vertical del terreno bajo la losa y en las edificaciones cercanas. Se opta por no contemplar sobre el NFU la ejecución de ningún tipo de explanada en ninguna de las hipótesis, por lo que no se analiza la deformación vertical que sufre este material una vez se procede a la colocación de la losa al estar apoyada directamente sobre la muralla.

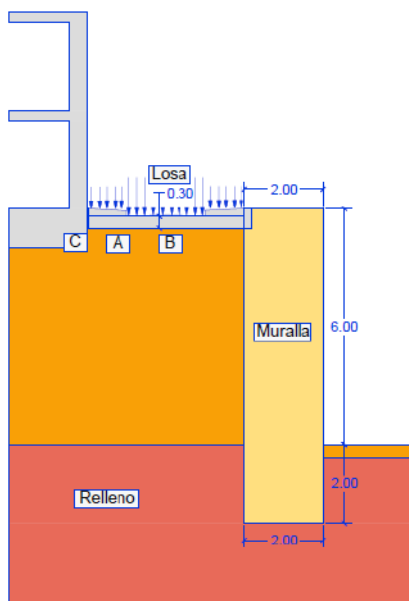


Figura 41. Ubicación puntos A, B y C para análisis de deformación vertical en la muralla de Utrera

Para el criterio 3 fue necesario emplear la herramienta “Sección de corte”, indicando las coordenadas de un segmento paralelo a 0,20 m del trasdós de la muralla, de forma que se obtiene la **distribución de las tensiones efectivas verticales y horizontales**; así como la fuerza equivalente o resultante del empuje horizontal, como puede apreciarse en la Figura 42 para las **condiciones iniciales** del modelo. Dichas tensiones se calculan a partir del procedimiento K_0 en el que puede indicarse de forma manual el coeficiente de empuje en reposo para las condiciones iniciales.

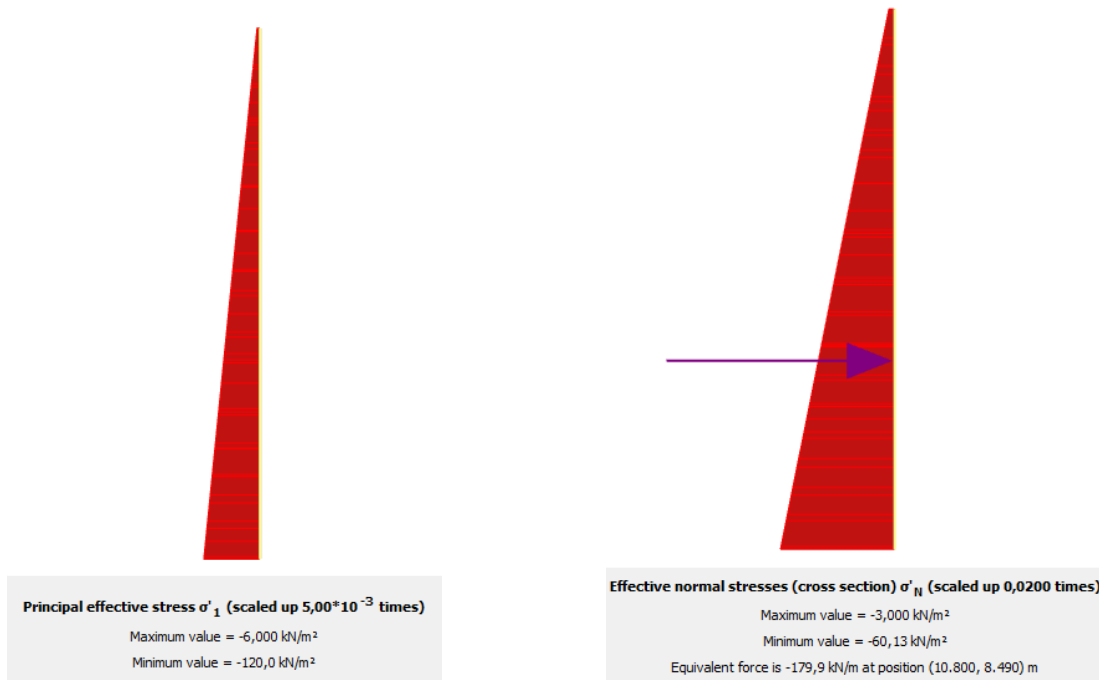


Figura 42. Tensiones verticales efectivas y tensiones horizontales efectivas iniciales según sección a 0,20 m del trasdós de la muralla de Utrera SEGÚN condiciones iniciales.

Para considerar el **efecto** que los **desplazamientos de la muralla** producen en las **tensiones efectivas verticales y horizontales del terreno** hay que realizar un cálculo “Plástico” basado en el modelo de Mohr Coulomb. Según se aprecia en la Figura 43, la distribución de tensiones en el trasdós de la muralla no es lineal; siendo nula en la parte superior de la misma, donde se produce la consiguiente grieta de tracción debido a la cohesión del material.

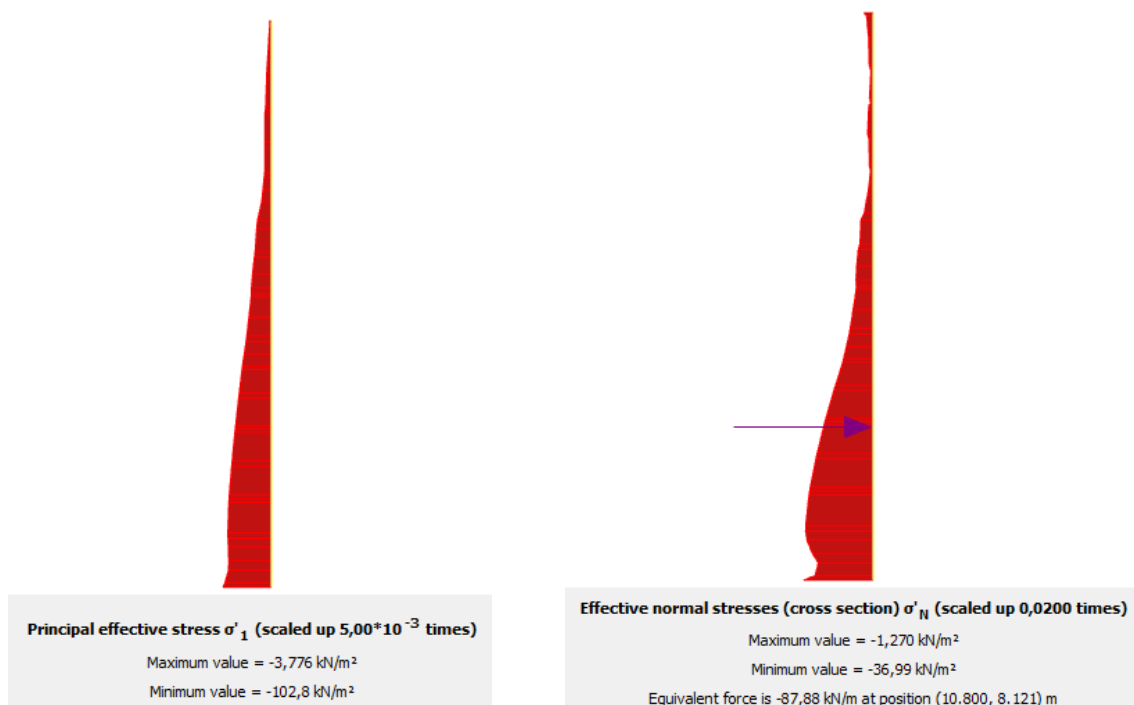


Figura 43. Tensión efectiva vertical y horizontal en cálculo plástico para las condiciones iniciales.

Se concluye que debido a este fenómeno de deformación de la muralla, las tensiones verticales en el trasdós son un 15% inferior respecto a la fase inicial, mientras que el empuje horizontal (fuerza equivalente) disminuye un 51% aproximadamente respecto al cálculo analítico.

Además, hay que considerar el efecto que el proceso de entibación produce en las tensiones horizontales. Ya que si el terreno a contener se encuentra confinado entre dos elementos sensiblemente paralelos, el empuje podría reducirse por efecto silo al trabajar las partes del modelo de forma independiente, por lo que el diagrama de empujes aparece truncado por el plano medio en la ubicación de los puntales horizontales (CTE-DB-SE-C, v2019).

Por último, respecto al criterio 4 en el estado final se cuenta con poder alcanzar un factor de seguridad superior a 1,50.

Como se muestra en la Figura 44, las hipótesis 1 no consideran la incorporación de NFU en el trasdós de la muralla. La **hipótesis 1.1** contempla la colocación de **material adecuado en el trasdós**, mientras que en la **hipótesis 1.2**, se lleva a cabo la ejecución de una **explanada bajo la losa**. Los resultados de esta hipótesis permiten realizar una **comparativa con aquellas soluciones que emplean NFU**, y así verificar las mejoras que proporciona la implementación de este material como relleno localizado en la rehabilitación de estructuras de contención.

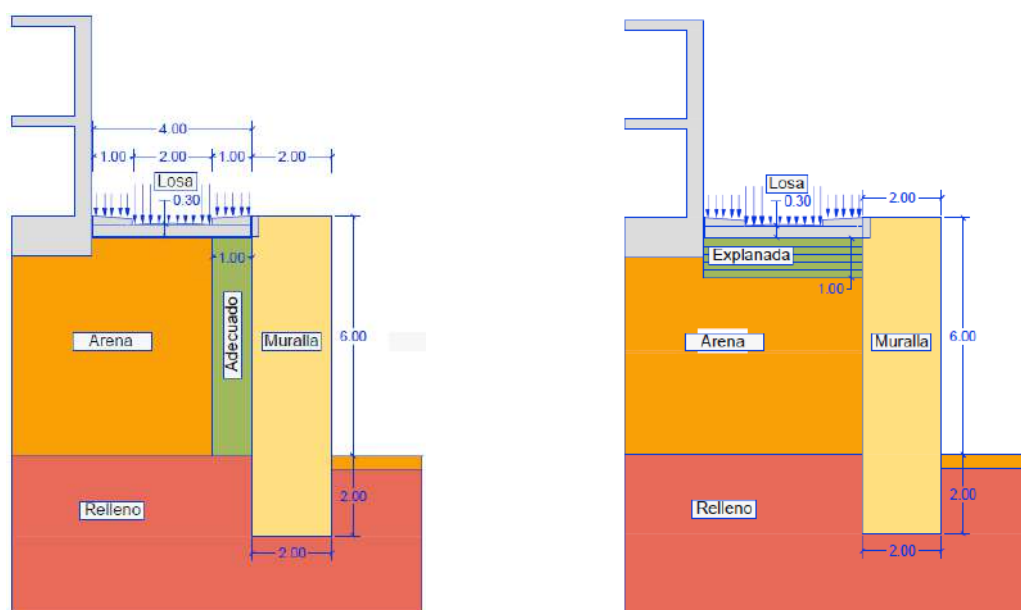


Figura 44. Hipótesis 1.1 y 1.2 con suelo adecuado como relleno localizado

En la **hipótesis 2**, como se muestra en la Figura 45 y en la Figura 46, se supone la colocación de **NFU en el trasdós de la muralla**, mediante una serie de **fases constructivas** que tienen en cuenta la **entibación del terreno**, sin considerar la ejecución de ninguna explanada bajo la losa.

En la **hipótesis 2.1** el parámetro que se modifica es el **ancho del relleno** localizado que aumenta de **0,50 m**, a **1 m** y **1,50 m**; así como la **profundidad de la excavación**, que para el ancho de relleno de **0,50 m** se considera de **3,50 m** y **6 m**, mientras que para el ancho de **1 m** y **1,5 m** la **profundidad de la excavación** es de **6 m**, manteniéndose el resto de parámetros constantes.

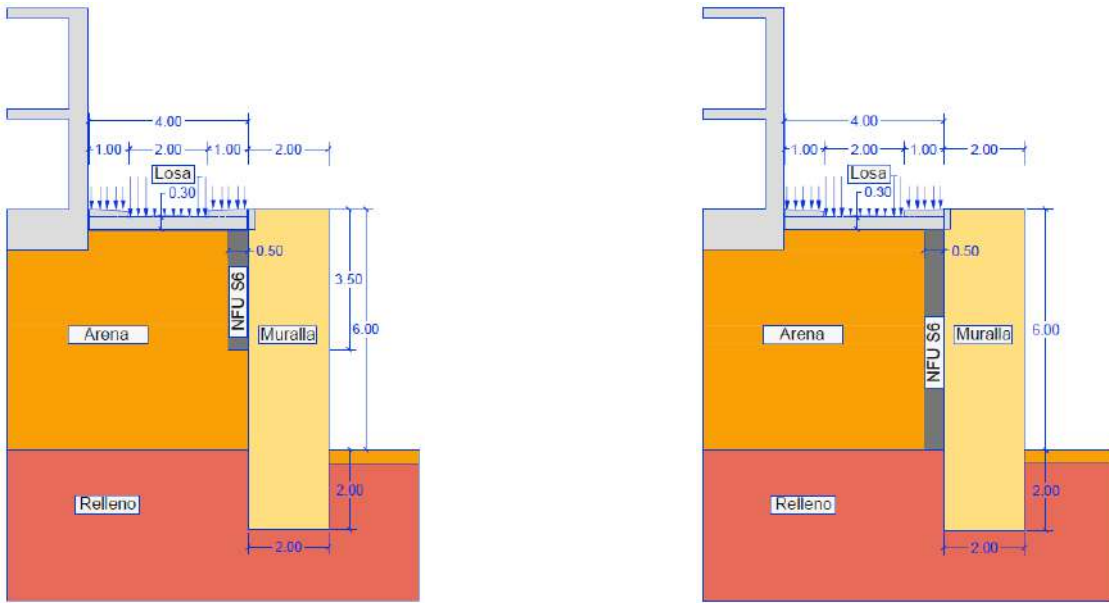


Figura 45. Hipótesis 2.1 relleno de NFU de 0,50 m de ancho a 3,50 m y 6 m de profundidad sin explanada

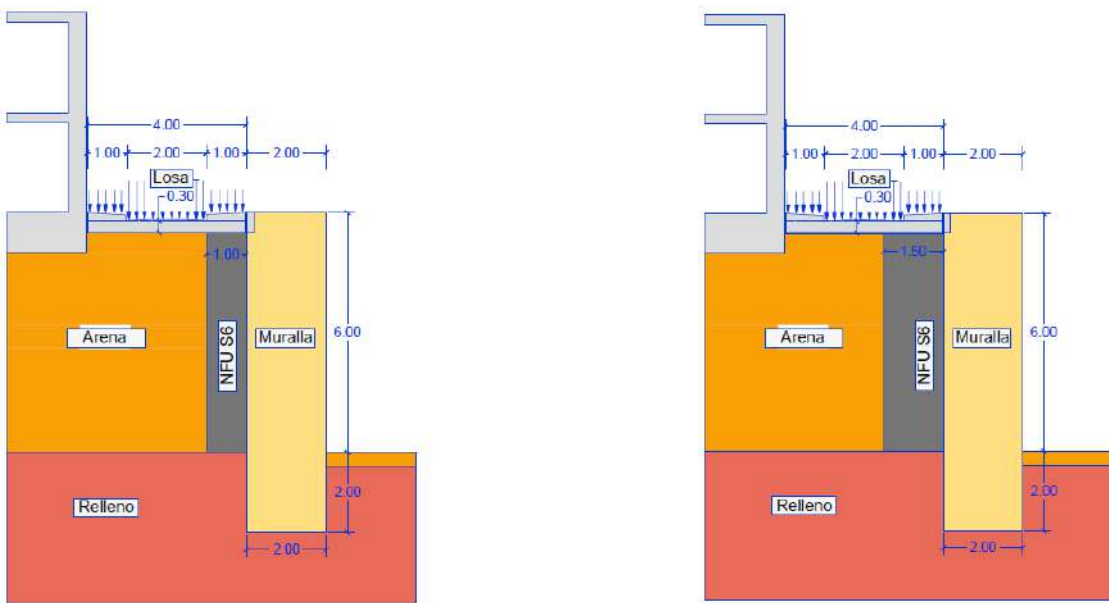


Figura 46. Hipótesis 2.1 con NFU como relleno de 1 y 1,5 m de ancho a 6 m de profundidad sin explanada

En la **hipótesis 2.2** según la Figura 47 y la Figura 48, se incorpora a partir de la hipótesis 2.1, una **explanada de 1 m** de profundidad, con el objetivo de poder comparar los **desplazamientos verticales** que se producen bajo la losa en base a los puntos indicados, respecto a no considerar ningún tipo de explanada. Al **no considerar el relleno de NFU como material de soporte**, no se analizan las deformaciones verticales que se producen en dicho estrato.

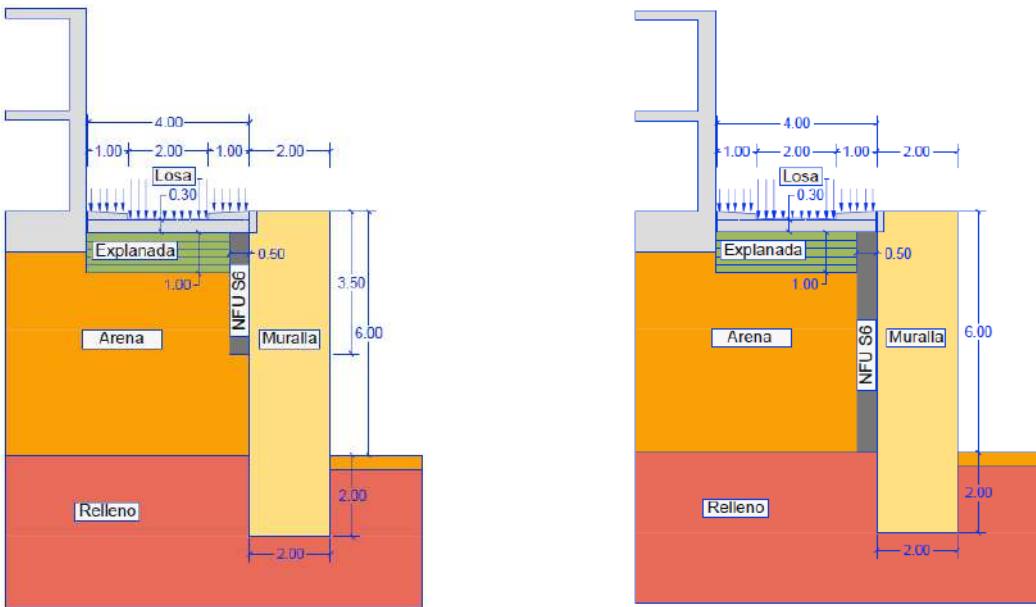


Figura 47. Hipótesis 2.2 relleno con NFU de 0,50 m de ancho a 3,50 y 6 m de profundidad sin explanada

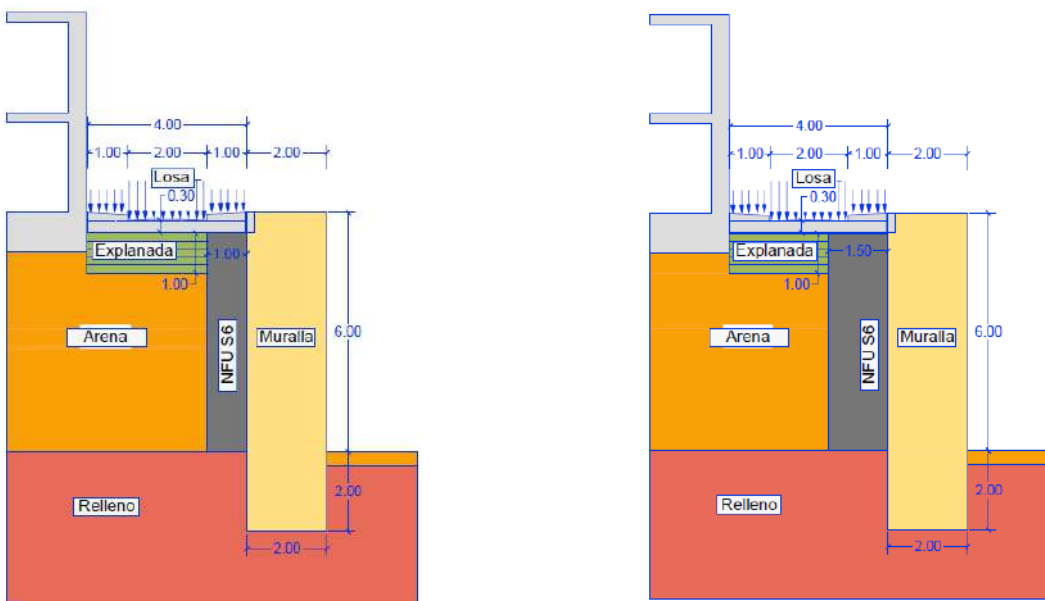


Figura 48. Hipótesis 2.2 con NFU como relleno de 1 y 1,5 m de ancho a 6 m de profundidad con explanada

Por último, en la **hipótesis 3** siguiendo los modelos desarrollados en la hipótesis anterior, se implementa un **geotextil de separación** entre las capas del relleno y entre la muralla y el terreno existente con el objetivo de mejorar la rigidez del conjunto. En la hipótesis 3.1 no se considera explanada, según se indica en la Figura 49 y en la Figura 50.

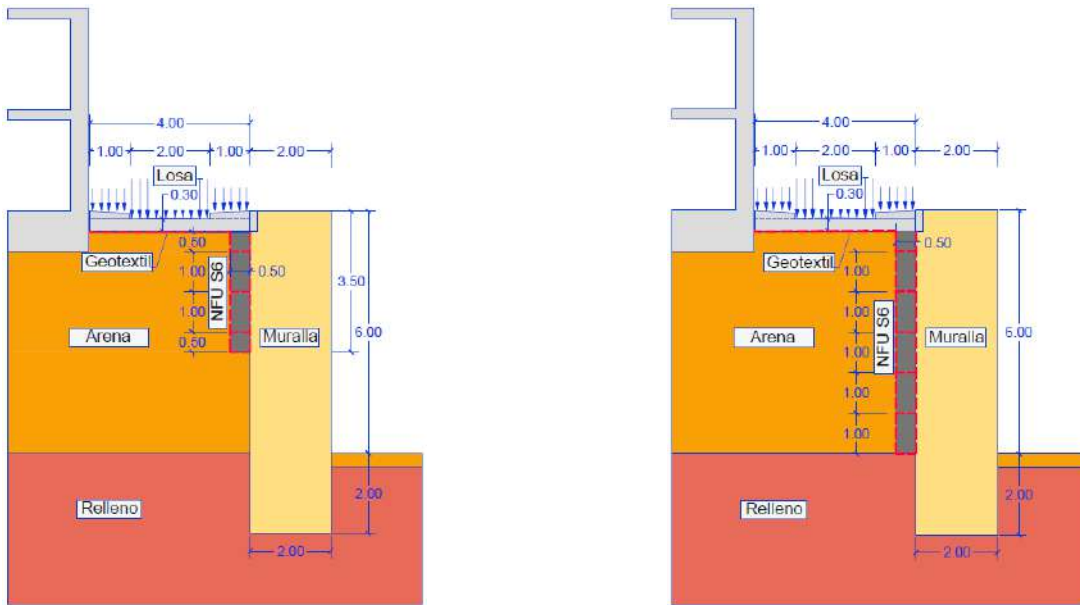


Figura 49. Hipótesis 3.1 relleno con NFU de 0,50 m de ancho a 3,50 y 6 m de profundidad con geotextil

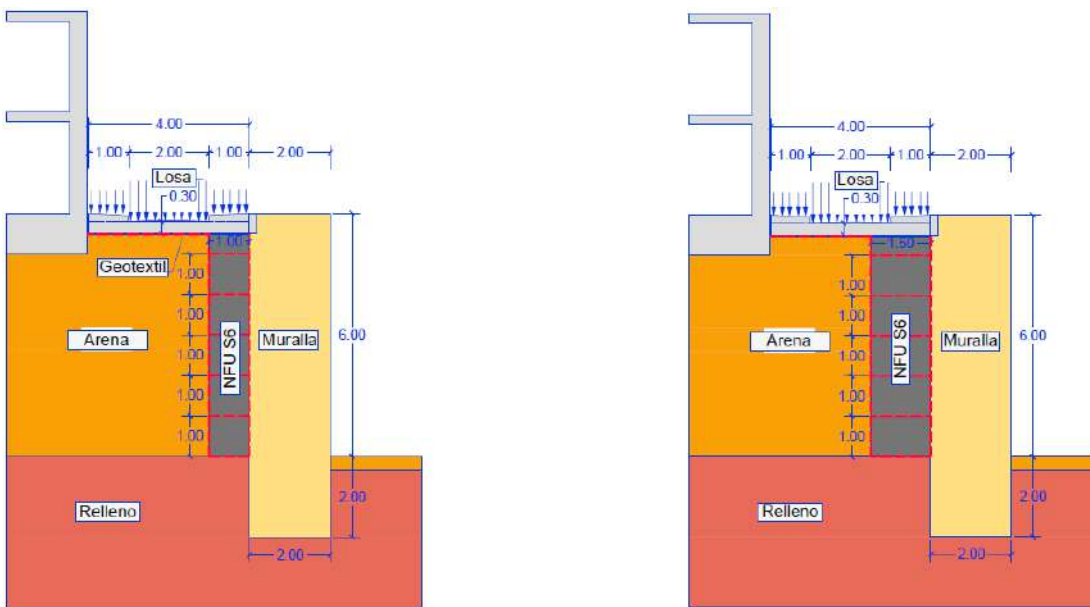


Figura 50. Hipótesis 3.1 relleno con NFU de 1 y 1,5 m de ancho a 6 m de profundidad con geotextil.

Con la incorporación de la explanada en la hipótesis 3.2 se incorpora también un geotextil separador entre esta, el terreno existente y el relleno localizado de NFU, según la Figura 51 y Figura 52.

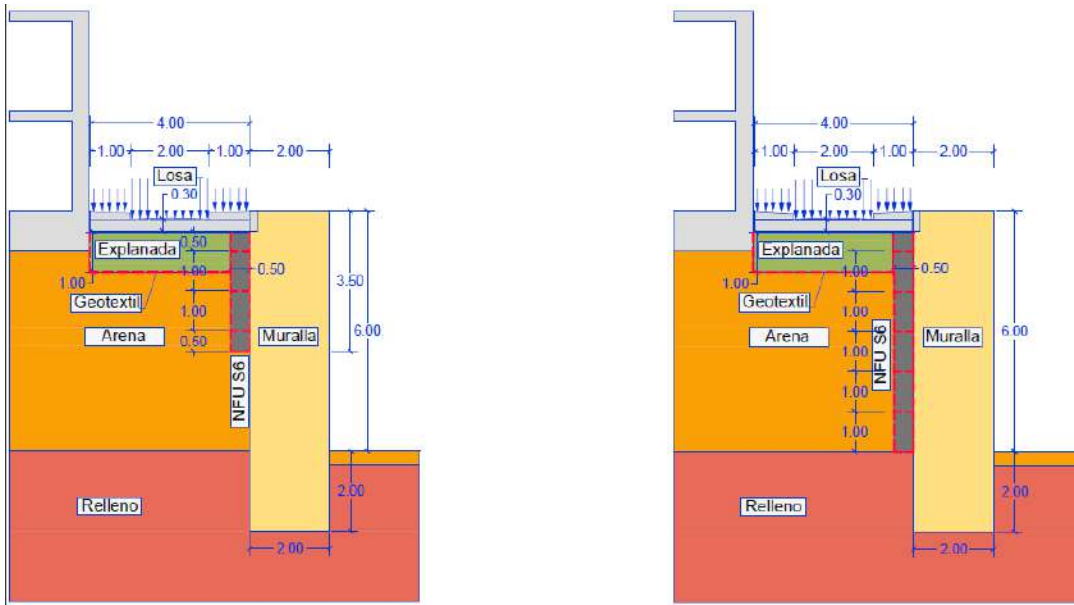


Figura 51. Hipótesis 3.2 relleno con NFU (0,5-3,5 y 6 m) de profundidad con explanada y geotextil

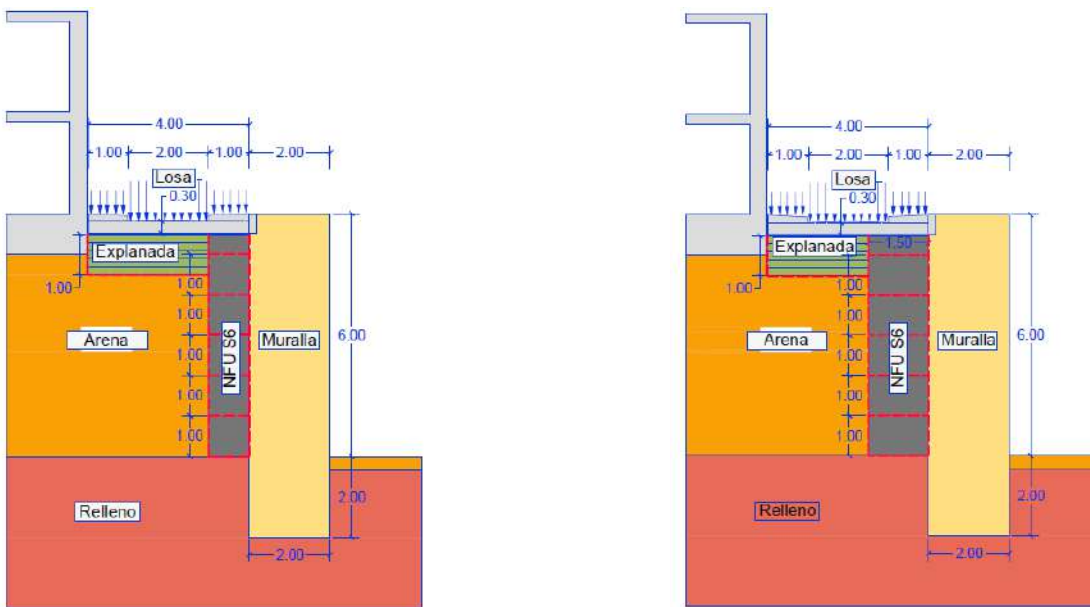


Figura 52. Hipótesis 3.2 relleno con NFU de (1 y 1,5-6 m) con explanada y geotextil

5.2.8.3 Condiciones de contorno y fases de cálculo

La malla de cálculo tiene una longitud máxima de 20 m y una altura máxima de 12 m. El modelo está constituido por 18.241 nodos. Se definieron cada uno de los sólidos poligonales necesarios que constituyen la sección de la muralla y se simuló una sobrecarga uniforme de 5 kN/m² sobre el acerado y de 10 kN/m² sobre la calzada, además se consideró una sobrecarga de 15 kN/m² para simular la existencia de edificaciones cercanas y por último, una sobrecarga de 3 kN/m² actuando en el intradós de la muralla. Posteriormente se definió el mallado del modelo y en las condiciones de flujo no se supuso la existencia de nivel freático.

Cada una de las secciones se esquematiza en seis materiales, que consideran tanto los parámetros geotécnicos del terreno como los parámetros de los elementos estructurales. Para reproducir el comportamiento inicial del terreno se ha empleado el modelo constitutivo elasto-plástico de Mohr-Coulomb, que considera cinco parámetros de entrada, es decir, módulo edométrico (E) y el coeficiente de Poisson (ν) para evaluar la elasticidad del suelo; ángulo de rozamiento (Φ') y cohesión (c') para la plasticidad y ψ como ángulo de dilatación. Los elementos estructurales consideran el modelo Lineal Elástico. Todos los parámetros han sido determinados en base a la bibliografía existente, ya que no se cuenta con ensayos in situ salvo los realizados en laboratorio con NFU, según la Tabla 53.

Tabla 53. Parámetros característicos considerados para el modelado de la muralla de Utrera

Propiedades materiales	ID	Modelo	γ kN/m³	C' kN/m²	Φ' (°)	E' kN/m²	Tipo	ν
Arena		Mohr Coulomb	20	5	30	$4,6 \cdot 10^3$	Drenado	0,30
Relleno			27	5	34	$25 \cdot 10^3$	Drenado	0,30
NFU - S6			5,72	14	23,50	969,4	Drenado	0,30
Suelo adecuado			18	1	30	$50 \cdot 10^3$	Drenado	0,35
Losa		Lineal elástico	25	-	-	$20 \cdot 10^6$	No poroso	0,20
Tapial		Lineal elástico	20,58	-	-	$1,7 \cdot 10^6$	No poroso	0,24

Las propuestas de mejora incluyen la sustitución de relleno convencional en el trasdós de la muralla por relleno tipo NFU y, la implementación de geotextiles separadores entre sustratos de diferente naturaleza y entre el propio relleno de NFU, contemplándose geotextiles del Grupo 0, cuyas características se indican en la Tabla 54.

Tabla 54. Resistencia grupos de geotextiles conforme UNE EN ISO 10319 para muralla de Utrera

Grupo	ϵ_r (kN/m) valor mínimo	R_T (kN/m) valor mínimo	Función geotextil
0	6,4	16	SEPARACIÓN

Donde R_T es la resistencia a tracción (kN/m) y ϵ_r es la deformación unitaria en rotura (tanto por uno) medidas conforme UNE EN ISO 10319.

Para llevar a cabo la colocación del granulado de NFU como relleno localizado fue necesario considerar la entibación del terreno definiendo elementos tipo "Pantallas" que simularan planchas de acero de contención en contacto con el terreno existente, y elementos tipo "Soportes" para implementar codales horizontales mediante tubos de acero. Los parámetros de dichos elementos se indican en la Tabla 55.

Tabla 55. Parámetros de los elementos de entibación para la muralla de Utrera

Componentes entibación	Descripción	Parámetro	Unidades
Codales	Tipo de material	Elástico	-
	Rigidez axial de la barra	4040	kN
	Espacio entre barras en el plano perpendicular	1	m
Plancha de acero	Tipo de material	Elástico	-
	Rigidez axial (EA)	$2,1 \cdot 10^6$	kN/m
	Rigidez flexional (EI)	17,5	kN m ² /m
	Espesor equivalente (d)	0,01	m
	Peso (w)	0,77	kN/m/m
	Coefficiente de Poisson (ν)	0,3	-

5.2.8.4 Resultados obtenidos para la Muralla de Utrera

En función de la hipótesis considerada el proyecto consta de diferentes fases, las cuales se describen a continuación. La fase inicial y fase 1 coinciden en todas las hipótesis analizadas, según se describen a continuación:

- Fase inicial: Se considera el estado actual de la muralla actuando una sobrecarga lineal de 15 kN/m^2 que simula la presión ejercida por edificaciones cercanas y una sobrecarga lineal en el intradós de la muralla que representa las medianeras de las edificaciones existentes. Al contar con un perfil del terreno horizontal, se realizan los cálculos mediante el “procedimiento K0”. En “Carga tipo” se selecciona “Etapa de construcción” y finalmente en “Presión intersticial” se elige la opción “Freático”.

- Fase 1: Consiste en obtener el factor de seguridad en condiciones iniciales. Se selecciona como tipo de cálculo “Seguridad” y en “Carga tipo” se elige la opción “Multiplicadores incrementales”. Además en los parámetros de control de deformaciones se marca “Reseteo de los desplazamientos a cero”, de forma que las deformaciones de la fase anterior no distorsionen el F.S. obtenido.

a) **Hipótesis 1: modificación a partir de materiales convencionales.**

En esta hipótesis se emplean materiales convencionales para la estabilización de la muralla. En la hipótesis 1.1 se sustituye 1 m de ancho por material adecuado en el trasdós de la muralla, y en la hipótesis 1.2, se incorpora una explanada de suelo adecuado de un metro de profundidad y de 4 m de ancho, sin actuar sobre el trasdós de la muralla.

Hipótesis 1.1:

- Fase 2, fase 3, fase 4, fase 5, fase 6 y fase 7: Se procede a la colocación de la estructura de contención provisional conocida como entibación para estabilizar las paredes verticales de la excavación. La profundidad respecto al nivel superior que se alcanza en cada una de las fases es de 1,50 m; 2,50 m; 3,50 m; 4,50 m; 5,50 m y 6 m, indicándose como tipo de cálculo “Consolidación”. En “Tipo de carga” se selecciona “Etapa de construcción” y en “Presión intersticial” se elige la opción “Freático”. El intervalo de tiempo de cada una de las fases hasta alcanzar la profundidad de excavación final es de 2 días, siendo el total acumulado de 12 días.

- Fase 8, fase 9, fase 10, fase 11, fase 12 y fase 13: Se lleva a cabo la colocación del relleno localizado mediante suelo adecuado en el trasdós de la muralla. Se sigue el mismo procedimiento de cálculo que en las fases anteriores. En el intervalo de tiempo se especifica 1 día por cada fase, siendo el total acumulado de 6 días.

- Fase 14: Se procede a la excavación de la superficie ocupada por la losa en el terreno y el apoyo sobre la muralla de 0,50 m. Se desactivan los elementos correspondientes y se indica como tipo de cálculo “Consolidación”. En “Tipo de carga” se selecciona “Etapa de construcción” y en “Presión intersticial” se elige la opción “Freático”. En el intervalo de tiempo se especifica 1 día.

- Fase 15: Se lleva a cabo la construcción de la losa conforme al procedimiento de la fase 2. En el intervalo de tiempo se especifica 1 día.

- Fase 16: Se desactiva la sobrecarga lineal sobre el intradós de la muralla. Para ello, se considera un cálculo “Plástico”, en el tipo de carga se selecciona “Etapa de construcción” y en “Presión intersticial” se elige la opción “Freático”.

- Fase 17: Se activan las sobrecargas lineales que actúan sobre la losa siguiendo el procedimiento de cálculo de la fase anterior al tratarse de un cálculo “Plástico”.

- Fase 18. Fase final de consolidación. Como tipo de cálculo elegimos “Consolidación” y en “Tipo de carga” se selecciona la opción “Mínima presión intersticial”. En el apartado “Presión intersticial” se elige “Freático” y en “P-paro” se especifica 1 kPa.

- Fase 19: sigue el mismo procedimiento que la Fase 1 para calcular el factor de seguridad del conjunto modificado.

El esquema del procedimiento y los resultados respecto a desplazamientos totales y factor de seguridad global, se incluyen en la Tabla 56.

Tabla 56. Definición fases, desplazamiento total y factor de seguridad en hipótesis 1.1

Sección Muralla de Utrera – hipótesis 1.1

Fase	Cálculo	Tipo	Intervalo	Desplazamiento total (m)	F.S. Global
0	Procedimiento KO	“Etapa de construcción”	-	-	-
1	Seguridad	“Multiplicador incremental”	-	-	1,707
2	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0306	-
3	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0320	-
4	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0348	-
5	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0420	-
6	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0683	-
7	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0897	-
8	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0900	-
9	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0912	-
10	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0927	-
11	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0934	-
12	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0939	-
13	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0993	-
14	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0929	-
15	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0944	-
16	Plástico	“Etapa de construcción”	0 día	0,0953	-
17	Plástico	“Etapa de construcción”	0 día	0,0959	-
18	Consolidación	Mínima presión intersticial	1 kPa	0,0961	-
19	Seguridad	“Multiplicador incremental”	-	-	1,607

El método de cálculo basado en las teorías de equilibrio límite se basa en que el material alcanza dicho equilibrio a lo largo de diversas líneas de deslizamiento, las cuales delimitan la cuña de rotura sobre la que se produce el movimiento del terreno.

Los desplazamiento incrementales representados en la Figura 53 no representan un valor físico, pero si indicativo de la superficie de deslizamiento del modelo.

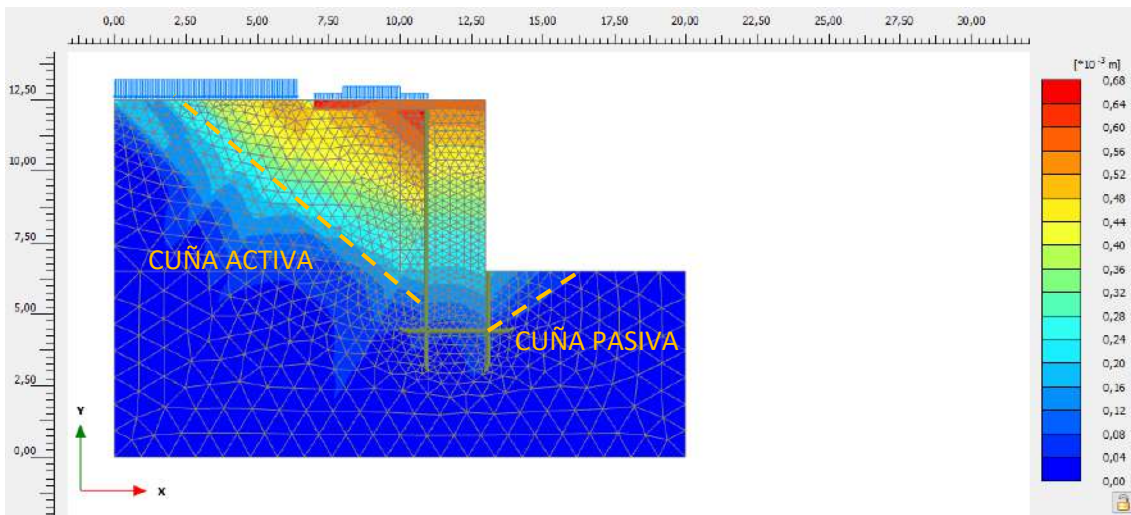


Figura 53. Hipótesis 1.1 Desplazamientos muralla con relleno adecuado de 1m ancho en la fase 19

El empuje horizontal equivalente obtenido según una sección paralela a 0,20 m del trasdós de la muralla presenta un valor de **125,5 kN/m**.

Hipótesis 1.2:

En esta hipótesis se considera la ejecución de una explanada bajo la losa, para comparar respecto a la hipótesis anterior, los desplazamientos verticales de los puntos indicados. No se considera la excavación en el trasdós de la muralla para la colocación de suelo adecuado.

- Fase 3, Fase 4, Fase 5, Fase 6 y Fase 7: En cada una de las fases se procede a la excavación de una capa de 0,20 m de espesor por 4 m de largo. Se selecciona el cálculo "Consolidación". En "Tipo de carga" se selecciona "Etapa de construcción" y en "Presión intersticial" se elige la opción "Freático". El intervalo de tiempo de cada una de las fases hasta alcanzar la profundidad de excavación final es de 1 día, siendo el total acumulado de 5 días.
- Fase 8, fase 9, fase 10, fase 11 y fase 12: Se lleva a cabo la colocación de cada una de las capas de suelo adecuado para la formación de la explanada. Se sigue el mismo procedimiento de cálculo especificado en las fases anteriores siendo el tiempo total acumulado de 5 días.
- Fase 13: Se activa la superficie de la losa siguiendo el mismo procedimiento de cálculo de la fase 8 y suponiendo un intervalo de tiempo de 1 día.
- Fase 14: Al desactivar la sobrecarga lineal sobre el intradós de la muralla, se considera un cálculo "Plástico", en el tipo de carga se selecciona "Etapa de construcción" y en "Presión intersticial" se elige la opción "Freático".
- Fase 15: Se considera la aplicación de la sobrecarga en la losa. Para ello, se lleva a cabo un análisis "plástico", en el tipo de carga se selecciona "Etapa de construcción" y en "Presión intersticial" se elige la opción "Freático".
- Fase 16: Fase final de consolidación. Como tipo de cálculo elegimos "Consolidación" y en "Tipo de carga" se selecciona la opción "Mínima presión intersticial". En el apartado "Presión intersticial" se elige "Freático" y en "P-paro" se especifica 1 kPa.
- Fase 17: sigue el mismo procedimiento que la Fase 1 para calcular el factor de seguridad de la muralla.

El esquema del procedimiento y los resultados respecto a desplazamientos totales y factor de seguridad global, se incluyen en la Tabla 57.

Tabla 57. Definición fases, desplazamiento total y factor de seguridad en hipótesis 1.2

Sección Muralla de Utrera – hipótesis 1.2

Fase	Cálculo	Tipo	Intervalo	Desplazamiento total (m)	F.S. Global
0	Procedimiento KO	“Etapa de construcción”	-	-	-
1	Seguridad	“Multiplicador incremental”	-	-	1,675
2	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0242	-
3	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0248	-
4	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0250	-
5	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0252	-
6	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0254	-
7	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0257	-
8	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0258	-
9	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0271	-
10	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0283	-
11	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0287	-
12	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0300	-
13	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0299	-
14	Plástico	“Etapa de construcción”	-	0,0315	-
15	Plástico	“Etapa de construcción”	-	0,0307	-
16	Consolidación	Mínima presión intersticial	1 kPa	0,0307	-
17	Seguridad	“Multiplicador incremental”	-	-	1,369

En la Figura 54, se indica los desplazamientos incrementales de la muralla. El empuje horizontal actuando sobre el trasdós de la muralla es de **116,4 kN/m**, lo que supone que se ha producido menor deformación al no haber excavado a lo largo del trasdós completo de la muralla, a diferencia de la hipótesis 1.1.

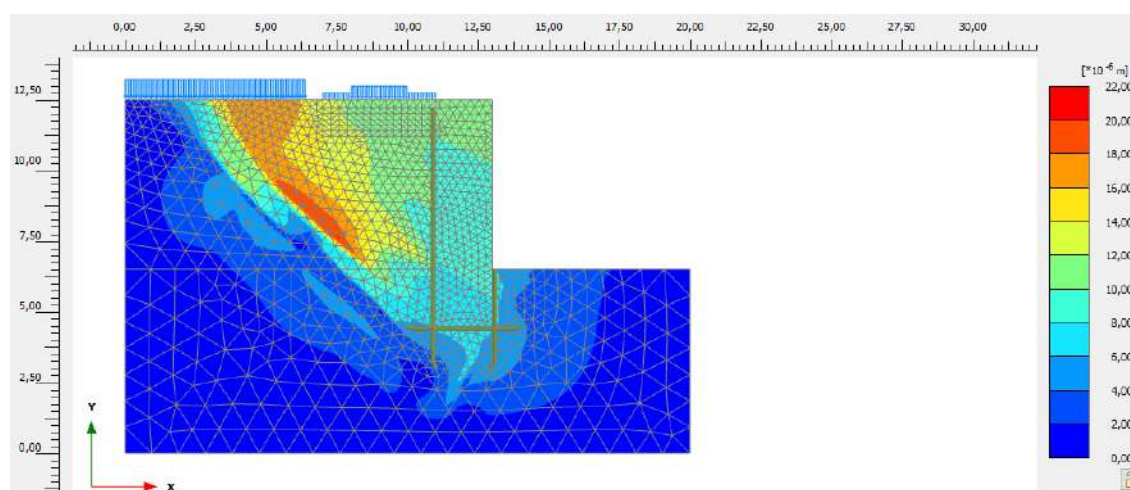


Figura 54. Hipótesis 1.2 Desplazamientos muralla con explanada sin NFU fase 17

En la Tabla 58, se resume el desplazamiento vertical de los puntos analizados para la hipótesis 1, de forma que se obtienen los asentamientos entre dichos puntos. La colocación de la explanada provoca un mayor asiento diferencial entre B y C, mientras que para el resto de cálculos los asentamientos no alcanzan la unidad.

Tabla 58. Desplazamientos verticales (Uy) m puntos A, B y C para hipótesis 1 sección Muralla de Utrera

Hipótesis 1 Muralla de Utrera

Hipótesis	Ancho entibación (m)	Fase	Punto A (m)	Punto B (m)	Punto C (m)	Asiento entre B y C (cm)	Asiento entre A y B (cm)
1.1	-	17	-0,011	-0,0069	-0,012	0,51	0,41
1.2	-	15	-0,0096	-0,0046	-0,016	1,14	0,50

b) Hipótesis 2: relleno localizado de NFU en el trasdós de la Muralla.

En esta hipótesis se definen tres anchos de excavación con el objetivo de obtener el mínimo empuje horizontal sobre el trasdós de la Muralla de Utrera. Respecto a la deformación vertical bajo la losa, no se contempla en la hipótesis 2.1 ninguna explanada, mientras que en la hipótesis 2.2, se incorpora una explanada de suelo adecuado de un metro de profundidad que linda con el relleno de NFU.

Hipótesis 2.1:

- Fase 2, fase 3, fase 4, fase 5, fase 6 y fase 7: **Se procede a la colocación de la estructura de contención provisional conocida como entibación para estabilizar las paredes verticales de la excavación.** La profundidad respecto al nivel superior que se alcanza en cada una de las fases es de 1,50 m; 2,50 m y 3,50 m, indicándose como tipo de cálculo "Consolidación". En "Tipo de carga" se selecciona "Etapa de construcción" y en "Presión intersticial" se elige la opción "Freático". El intervalo de tiempo de cada una de las fases hasta alcanzar la profundidad de excavación final es de 2 días, siendo el total acumulado de 12 días.

- Fase 8, fase 9, fase 10, fase 11, fase 12 y fase 13: Se lleva a cabo la colocación del relleno localizado de NFU en el trasdós de la muralla. Se sigue el mismo procedimiento de cálculo que en las fases anteriores. En el intervalo de tiempo se especifica 1 día por cada fase, siendo el total acumulado de 6 días para estas fases.

- Fase 14: Se elimina la esquina superior derecha de la muralla para simular el apoyo de la losa sobre esta y se excava en la cota superior la superficie ocupada por la losa. Se sigue el mismo procedimiento indicado en las fases anteriores y se considera 1 día en el intervalo de tiempo.

- Fase 15: Se activa la superficie de la losa siguiendo el mismo procedimiento de cálculo anterior y suponiendo un intervalo de tiempo de 1 día.

- Fase 16: Se considera un cálculo "Plástico", en el tipo de carga se selecciona "Etapa de construcción" y en "Presión intersticial" se elige la opción "Freático", al desactivar la sobrecarga lineal sobre el intradós de la muralla.

- Fase 17: Se considera la aplicación de la sobrecarga en la losa. Para ello, se lleva a cabo un análisis "plástico", en el tipo de carga se selecciona "Etapa de construcción" y en "Presión intersticial" se elige la opción "Freático".

- Fase 18: Fase final de consolidación. Como tipo de cálculo elegimos "Consolidación" y en "Tipo de carga" se selecciona la opción "Mínima presión intersticial". En el apartado "Presión intersticial" se elige "Freático" y en "P-paro" se especifica 1 kPa.

- Fase 19: sigue el mismo procedimiento que la Fase 1 para calcular el factor de seguridad de la muralla.

En esta hipótesis se analiza la influencia en los resultados finales en función del **nivel de excavación** alcanzado, de forma que se procede a la entibación hasta **excavar a 3,5 m desde la cara superior de la losa**. Por

ello, no se consideran las fases 5, 6 y 7 al no profundizar hasta el sustrato de arcillas para posteriormente en las fases 8 y 9 colocar el relleno de NFU en el trasdós de la muralla, los resultados se incluyen en la Tabla 59 .

Tabla 59. Hipótesis 2.1 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (0,5-3,5 m) sin explanada bajo la losa

Sección Muralla de Utrera – hipótesis 2.1 – 3,5 m

Fase	Cálculo	Tipo	Intervalo	Desplazamiento total (m)	F.S. Global
0	Procedimiento K0	“Etapa de construcción”	0 días	-	-
1	Seguridad	“Multiplicador incremental”	-	-	1,680
2	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0250	-
3	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0267	-
4	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0311	-
5	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	-	-
6	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	-	-
7	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	-	-
8	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	-	-
9	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	-	-
10	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0310	-
11	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0311	-
12	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0324	-
13	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0301	-
14	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0350	-
15	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0352	-
16	Plástico	“Etapa de construcción”	-	0,0344	-
17	Plástico	“Etapa de construcción”	-	0,0345	-
18	Consolidación	Mínima presión intersticial	1 kPa	0,0344	-
19	Seguridad	“Multiplicador incremental”	-	-	1,885

En la Figura 55 se observan los desplazamientos incrementales en la masa de suelo del trasdós de la muralla. El valor del **empuje horizontal en esta actuación**, que no alcanza los 6 m de excavación, es de **78,45 kN/m**, que supone el menor resultado obtenido hasta el momento.

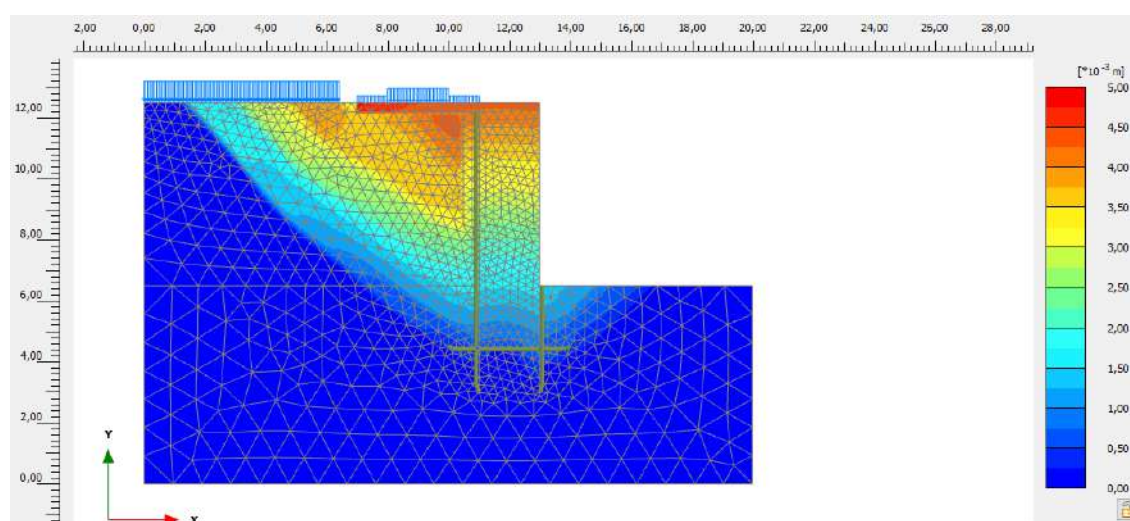


Figura 55. Hipótesis 2.1 Desplazamientos muralla relleno con NFU (0,5-3,5m) en fase 19

En la Tabla 60 se incluyen los resultados obtenidos al excavar hasta **6 m de profundidad** con el objetivo de poder comparar y evaluar el nivel de intervención necesario en el trasdós de la muralla para obtener el menor empuje, realizando la menor intervención.

Tabla 60. Hipótesis 2.1 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (0,5·6 m) sin explanada bajo la losa

Sección Muralla de Utrera – hipótesis 2.1 – 6m

Fase	Cálculo	Tipo	Intervalo	Desplazamiento total (m)	F.S. Global
0	Procedimiento K0	“Etapa de construcción”	0 días	-	-
1	Seguridad	“Multiplicador incremental”	-	-	1,68
2	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0253	-
3	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0269	-
4	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0299	-
5	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0387	-
6	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0736	-
7	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0864	-
8	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0873	-
9	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0880	-
10	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0890	-
11	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0894	-
12	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0896	-
13	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0932	-
14	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0871	-
15	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0892	-
16	Plástico	“Etapa de construcción”	-	0,0903	-
17	Plástico	“Etapa de construcción”	-	0,0909	-
18	Consolidación	Mínima presión intersticial	1 kPa	0,0911	-
19	Seguridad	“Multiplicador incremental”	-	-	1,88

En la Figura 56, se incluye los desplazamientos incrementales actuando en el trasdós de la muralla **para el ancho de entibación de 0,5 m y excavación de 6 m de profundidad**. Igualmente se obtiene el **empuje horizontal** actuando sobre la misma, que alcanza un valor de **97,85 kN/m**.

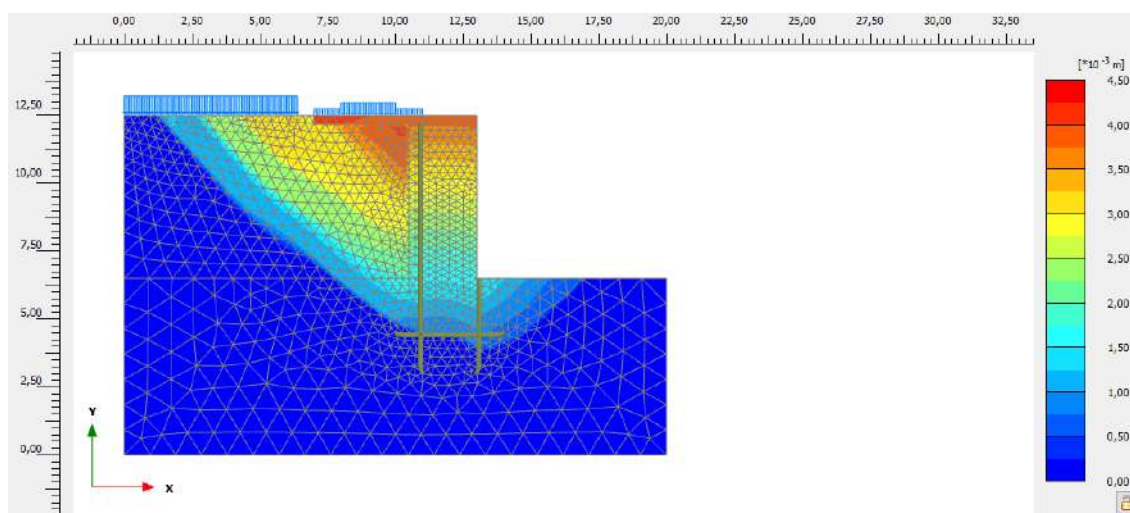


Figura 56. Hipótesis 2.1 Desplazamientos muralla relleno con NFU (0,5·6m) en fase 19

Una vez analizados los valores obtenidos para ancho de entibación de 0,5 m y profundidad variable entre 3,5 m y 6 m, se considera la ampliación del ancho de entibación a 1 m y una profundidad de fija de 6 m, según se indican los resultados de la Tabla 61 . De esta forma podrá evaluarse la influencia en el ancho y profundidad de la entibación para la colocación del relleno de NFU.

Tabla 61. Hipótesis 2.1 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (1·6 m) sin explanada bajo la losa

Sección Muralla de Utrera –hipótesis 2.1 – 6 m

Fase	Cálculo	Tipo	Intervalo	Desplazamiento total (m)	F.S. Global
0	Procedimiento K0	“Etapa de construcción”	0 días	-	-
1	Seguridad	“Multiplicador incremental”	-	-	1,68
2	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0306	-
3	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0320	-
4	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0348	-
5	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0416	-
6	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0681	-
7	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0896	-
8	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0907	-
9	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0907	-
10	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0930	-
11	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0934	-
12	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0935	-
13	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0995	-
14	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0917	-
15	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0946	-
16	Plástico	“Etapa de construcción”	-	0,0935	-
17	Plástico	“Etapa de construcción”	-	0,0953	-
18	Consolidación	Mínima presión intersticial	1 kPa	0,0953	-
19	Seguridad	“Multiplicador incremental”	-	-	1,907

Los desplazamientos incrementales se muestran en la Figura 57, mientras que el **empuje horizontal** alcanza un valor máximo de **103,5 kN/m**, lo que indica que a medida que aumenta los desplazamientos en el trasdós de la muralla, las tensiones también se incrementan.

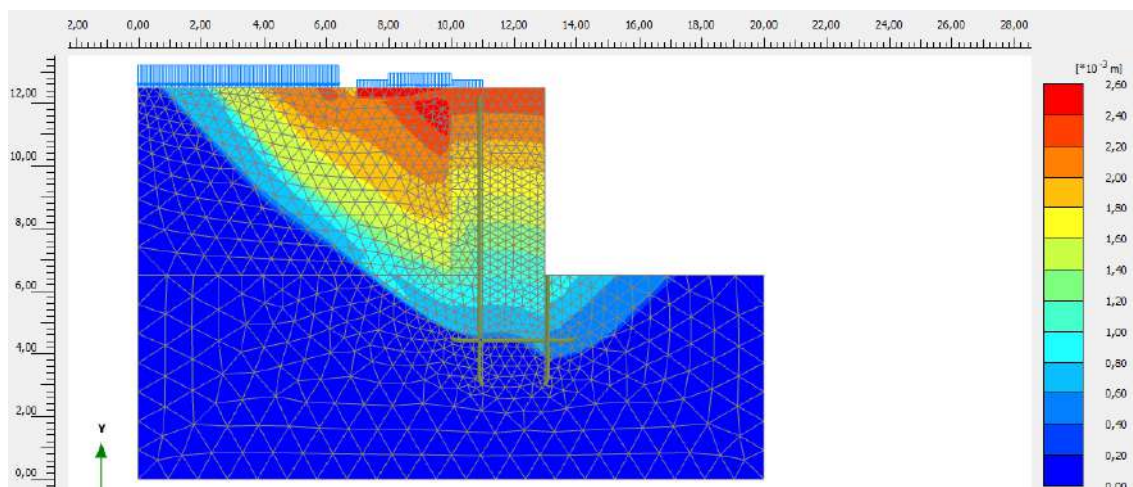


Figura 57. Hipótesis 2.1 Desplazamientos muralla relleno con NFU (1·6m) en fase 19

Por último, dentro de la hipótesis 2.1, se considera el **ancho de excavación en 1,5 m y profundidad de la misma en 6 m**, las fases consideradas al igual que los desplazamientos totales y el factor de seguridad se incluyen en la Tabla 62.

Tabla 62. Hipótesis 2.1 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (1,5·6 m) sin explanada bajo la losa

Sección Muralla de Utrera – hipótesis 2.1 – 6 m

Fase	Cálculo	Tipo	Intervalo	Desplazamiento total (m)	F.S. Global
0	Procedimiento K0	“Etapa de construcción”	0 días	-	-
1	Seguridad	“Multiplicador incremental”	-	-	1,665
2	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0299	-
3	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0312	-
4	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0341	-
5	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0455	-
6	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0843	-
7	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,1081	-
8	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1094	-
9	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1094	-
10	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1114	-
11	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1115	-
12	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1114	-
13	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1197	-
14	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1096	-
15	Plástico	“Etapa de construcción”	-	0,1113	-
16	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1125	-
17	Plástico	“Etapa de construcción”	-	0,1135	-
18	Consolidación	Mínima presión intersticial	1 kPa	0,1137	-
19	Seguridad	“Multiplicador incremental”	-	-	1,934

En la Figura 58, se muestran los desplazamientos incrementales, donde aparece un **valor máximo de empuje horizontal de 108,5 kN/m**.

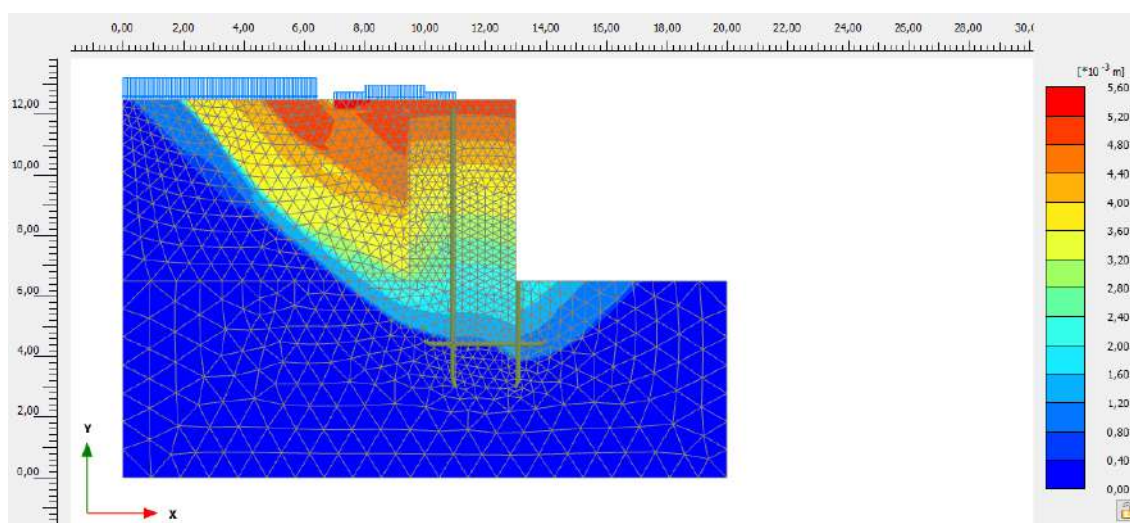


Figura 58. Hipótesis 2.1 Desplazamientos muralla relleno con NFU (1,5·6 m) en fase 19

Hipótesis 2.2:

En la hipótesis 2.2 se considera la ejecución de una explanada bajo la losa tanto para el ancho de entibación de 0,50 m, como de 1 m y de 1,50 m. Para ello, se consideran las mismas fases de la hipótesis 2.1, hasta que se comienza la excavación de la explanada según se indica a continuación y se formaliza en la Tabla 63:

- Fase 15, fase 16, fase 17, fase 18 y fase 19: En cada una de las fases se procede a la excavación de una capa de 0,20 m de espesor por 3 m de largo que linda con el relleno de NFU colocado en las fases anteriores. Se especifica cómo tipo de cálculo "Consolidación". En "Tipo de carga" se selecciona "Etapa de construcción" y en "Presión intersticial" se elige la opción "Freático". El intervalo de tiempo de cada una de las fases hasta alcanzar la profundidad de excavación final es de 1 día, siendo el total acumulado de 5 días.

- Fase 20, fase 21, fase 22, fase 23 y fase 24: Se lleva a cabo la colocación de cada una de las capas de suelo adecuado para la formación de la explanada y se van retirando los elementos de estabilización que conforman la entibación. Se sigue el mismo procedimiento de cálculo especificado en las fases anteriores siendo el tiempo total acumulado de 5 días.

- Fase 25: Se considera un cálculo "Plástico", en el tipo de carga se selecciona "Etapa de construcción" y en "Presión intersticial" se elige la opción "Freático", al desactivar la sobrecarga lineal sobre el intradós de la muralla.

- Fase 26: Se activa la superficie de la losa siguiendo el mismo procedimiento de cálculo "Consolidación" y suponiendo un intervalo de tiempo de 1 día.

- Fase 27: Se considera la aplicación de la sobrecarga en la losa. Para ello, se lleva a cabo un análisis "plástico", en el tipo de carga se selecciona "Etapa de construcción" y en "Presión intersticial" se elige la opción "Freático".

- Fase 28: Fase final de consolidación. Como tipo de cálculo elegimos "Consolidación" y en "Tipo de carga" se selecciona la opción "Mínima presión intersticial". En el apartado "Presión intersticial" se elige "Freático" y en "P-paro" se especifica 1 kPa.

- Fase 29: sigue el mismo procedimiento que la Fase 1 para calcular el factor de seguridad de la muralla.

Tabla 63. Hipótesis 2.2 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (0,5-3,5 m) con explanada bajo la losa

Sección Muralla de Utrera – hipótesis 2.2 – 3,5 m - E

Fase	Cálculo	Tipo	Intervalo	Desplazamiento total (m)	F.S. Global
0	Procedimiento K0	"Etapa de construcción"	0 días	-	-
1	Seguridad	"Multiplicador incremental"	-	-	1,679
2	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0279	-
3	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0314	-
4	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0393	-
5	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	-	-
6	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	-	-
7	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	-	-
8	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	-	-
9	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	-	-
10	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	-	-
11	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0411	-
12	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0415	-
13	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0412	-
14	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0411	-

15	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0394	-
16	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0391	-
17	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0390	-
18	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0390	-
19	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0391	-
20	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0403	-
21	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0412	-
22	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0423	-
23	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0440	-
24	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0407	-
25	Plástico	"Etapa de construcción"	-	0,0420	-
26	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 días	0,0425	-
27	Plástico	"Etapa de construcción"	-	0,0426	-
28	Consolidación	Mínima presión intersticial	1 kPa	0,0425	-
29	Seguridad	"Multiplicador incremental"	-	-	1,831

En la Figura 59 se representan los desplazamientos incrementales para la fase de cálculo del factor de seguridad, mientras el empuje horizontal máximo equivalente es de 100,5 kN/m.

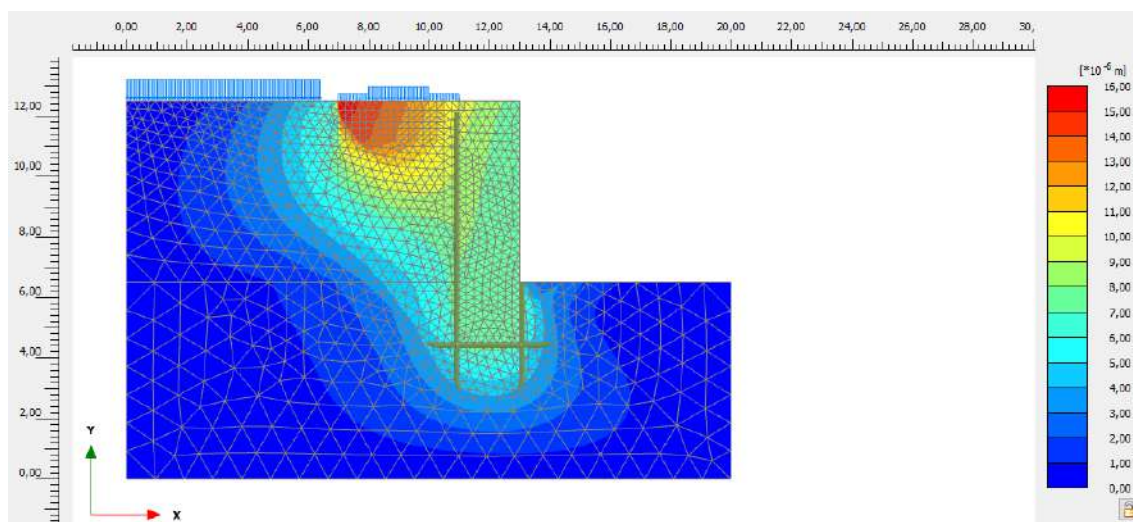


Figura 59. Hipótesis 2.2 Desplazamientos muralla relleno con NFU (0,5·3,5m) con explanada en fase 29

En la Tabla 64 se presentan los resultados al considerar la ejecución de una explanada bajo la losa, considerando de nuevo un ancho de entibación de 0,5 m pero en esta ocasión para una profundidad de 6 m.

Tabla 64. Hipótesis 2.2 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (0,5·6 m) con explanada bajo la losa

Sección Muralla de Utrera – hipótesis 2.2 – 6 m - E

Fase	Cálculo	Tipo	Intervalo	Desplazamiento total (m)	F.S. Global
0	Procedimiento K0	"Etapa de construcción"	0 días	-	-
1	Seguridad	"Multiplicador incremental"	-	-	1,672
2	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0281	-
3	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0322	-
4	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0373	-
5	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0459	-
6	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0613	-
7	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0760	-

8	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0782	-
9	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0787	-
10	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0794	-
11	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0793	-
12	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0791	-
13	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0771	-
14	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0762	-
15	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0757	-
16	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0756	-
17	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0757	-
18	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0759	-
19	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0771	-
20	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0780	-
21	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0790	-
22	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0804	-
23	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0771	-
24	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0793	-
25	Plástico	"Etapa de construcción"	-	0,0792	-
26	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0793	-
27	Plástico	"Etapa de construcción"	-	0,0793	-
28	Consolidación	Mínima presión intersticial	1 kPa	0,0793	-
29	Seguridad	"Multiplicador incremental"	-	-	1,838

En la Figura 60 se incluyen los desplazamientos incrementales; mientras el **diagrama de empujes** presenta un valor máximo de **empuje horizontal equivalente de 109,6 kN/m**.

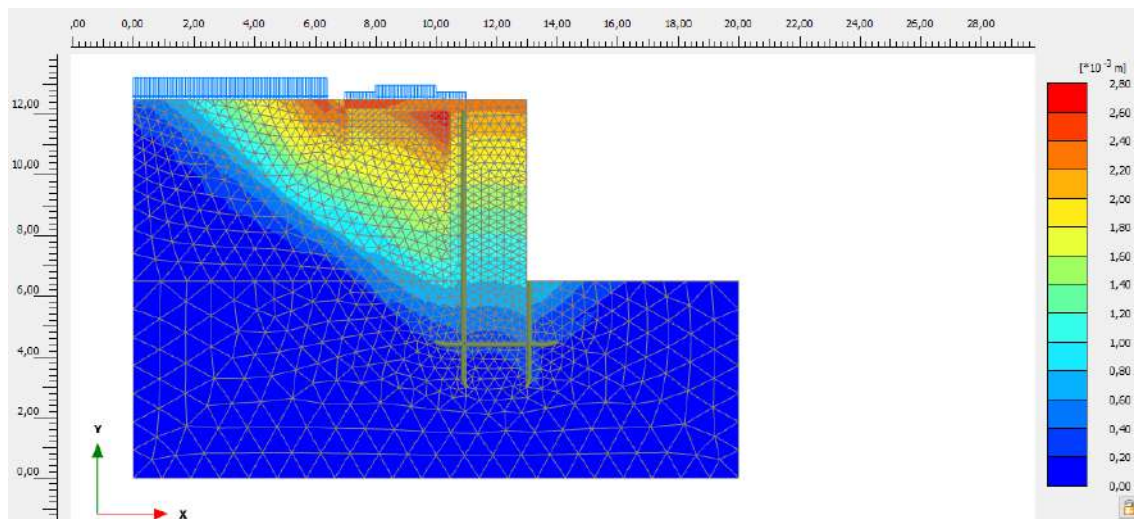


Figura 60. Hipótesis 2.2 Desplazamientos muralla relleno con NFU (0,5·6m) con explanada en fase 29

En la Tabla 65 se incluyen los resultados al considerar la ejecución de una explanada bajo la losa para un **ancho de entibación de 1 m** y una **profundidad de excavación de 6 m**.

Tabla 65. Hipótesis 2.2 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (1·6 m) con explanada bajo la losa

Sección Muralla de Utrera – hipótesis 2.2 – 6 m - E

Fase	Cálculo	Tipo	Intervalo	Desplazamiento total (m)	F.S. Global
0	Procedimiento K0	"Etapa de construcción"	0 días	-	-

1	Seguridad	"Multiplicador incremental"	-	-	1,672
2	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0273	-
3	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0295	-
4	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0332	-
5	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0438	-
6	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0693	-
7	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0955	-
8	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0965	-
9	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0966	-
10	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0980	-
11	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0972	-
12	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0967	-
13	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0943	-
14	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0931	-
15	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0922	-
16	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0919	-
17	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0919	-
18	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0921	-
19	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0932	-
20	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0940	-
21	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0949	-
22	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0961	-
23	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0936	-
24	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0932	-
25	Plástico	"Etapa de construcción"	-	0,0952	-
26	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0955	-
27	Plástico	"Etapa de construcción"	-	0,0962	-
28	Consolidación	Mínima presión intersticial	1 kPa	0,0932	-
29	Seguridad	"Multiplicador incremental"	-	-	1,909

En la Figura 61 se incluyen los desplazamientos incrementales para la fase de cálculo del factor de seguridad, mientras el valor máximo de **empuje horizontal equivalente** es de **111,8 kN/m**.

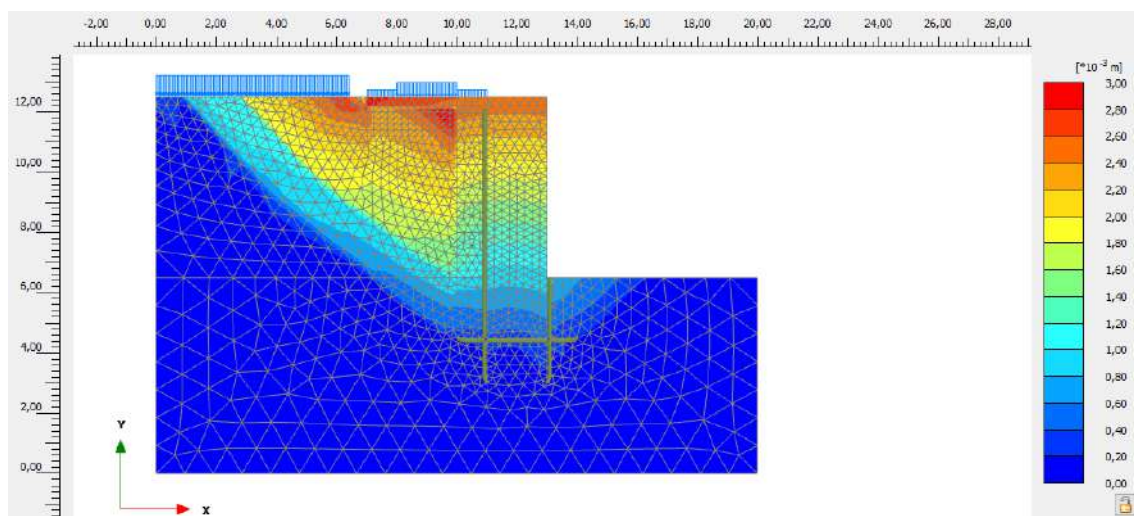


Figura 61. Hipótesis 2.2 Desplazamientos muralla relleno con NFU (1·6m) con explanada en fase 29

Por último, dentro de la hipótesis 2.2 se considera un ancho de entibación de 1,50 m y una profundidad de excavación de 6 m, los resultados se indican en la Tabla 66.

Tabla 66. Hipótesis 2.2 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (1,5-6 m) con explanada bajo la losa

Sección Muralla de Utrera – hipótesis 2.2 – 6 m - E

Fase	Cálculo	Tipo	Intervalo	Desplazamiento total (m)	F.S. Global
0	Procedimiento K0	“Etapa de construcción”	0 días	-	-
1	Seguridad	“Multiplicador incremental”	-	-	1,672
2	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0266	-
3	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0286	-
4	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0325	-
5	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0477	-
6	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0877	-
7	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,1129	-
8	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1136	-
9	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1141	-
10	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1138	-
11	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1128	-
12	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1142	-
13	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1157	-
14	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1108	-
15	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1093	-
16	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1082	-
17	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1072	-
18	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1072	-
19	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1075	-
20	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1085	-
21	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1092	-
22	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1101	-
23	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1112	-
24	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1111	-
25	Plástico	“Etapa de construcción”	-	0,1114	-
26	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1126	-
27	Plástico	“Etapa de construcción”	-	0,1138	-
28	Consolidación	Mínima presión intersticial	1 kPa	0,1139	-
29	Seguridad	“Multiplicador incremental”	-	-	1,933

La cuña de deslizamiento se obtiene a partir de los desplazamientos incrementales mostrados en la Figura 62, mientras que el empuje horizontal equivalente máximo es de 107,3 kN/m.

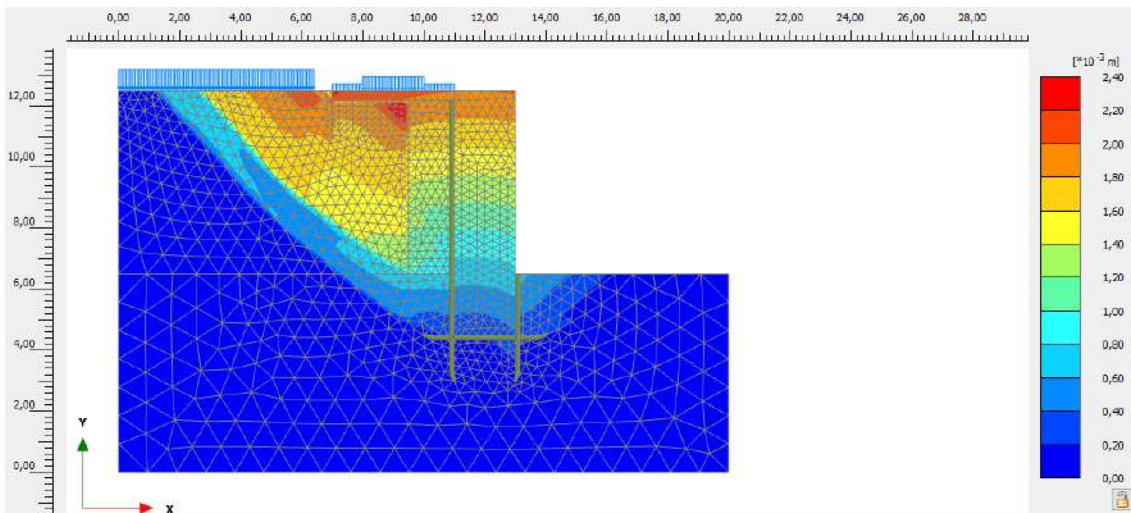


Figura 62. Hipótesis 2.2 Desplazamientos muralla relleno con NFU (1,5·6m) con explanada en fase 29

En la Tabla 67 se indican los desplazamientos verticales de los puntos analizados para la hipótesis 2, en función de cada una de las secciones, de forma que pueden obtenerse los asientos diferenciales entre cada uno de los puntos.

Tabla 67. Desplazamientos verticales (Uy) m puntos A, B y C para hipótesis 2 sección Muralla de Utrera

Hipótesis 2 Muralla de Utrera

Hip.	Ancho entibación (m)	Prof. (m)	Fase	Punto A (m)	Punto B (m)	Punto C (m)	Asiento entre B y C (cm)	Asiento entre A y B (cm)
2.1	0,50	3	18	-0,016	-0,017	-0,019	0,20	0,10
	0,50	6	18	-0,040	-0,057	-0,040	1,70	1,70
	1,00		18	-0,042	-0,061	-0,043	1,80	1,90
	1,50		18	-0,061	-0,081	-0,059	2,20	2,00
2.2	0,50	3	28	-0,0084	-0,0074	-0,016	0,86	0,10
	0,50	6	28	-0,020	-0,032	-0,027	0,5	1,2
	1,00		28	-0,042	-0,052	-0,048	0,4	1
	1,50		28	-0,064	-0,075	-0,066	1	1,10

En la hipótesis 2.1 al reducir el ancho a 0,5 m y la profundidad de la excavación a 3,5 m se disminuyen los asientos en torno a un 90 % respecto a los cálculos que consideran una profundidad de excavación de 6 m. Este hecho no ocurre para las hipótesis 2.2 que implican la colocación de una explanada bajo la losa.

Para la hipótesis 2.1 con ancho de entibación de 1 m y 1,50 m respectivamente - en el intervalo de tiempo comprendido entre el día 7 y el día 11 - se producen las mayores deformaciones verticales de los puntos analizados. En dicho intervalo se ejecuta la excavación de las tres últimas fases de 4,50 m a 6 m de profundidad.

En las hipótesis 2.2, al excavar el terreno de la losa para la formación de la explanada, las deformaciones verticales en los puntos analizados bajo la losa son nulos, mientras que para el punto C la mayor deformación vertical resulta de la excavación de las tres últimas fases, al igual que ocurre en el caso de no considerar explanada bajo la losa coincidiendo con la superficie de deslizamiento, salvo para el cálculo de 0,5 m de ancho y 3 m de profundidad donde dicha superficie de rotura se reduce.

c) Hipótesis 3: relleno localizado de NFU en el trasdós de la Muralla y geotextil.

En esta última hipótesis se parte de la hipótesis 2 añadiendo láminas de geotextil de separación entre las tongadas de NFU y en el perímetro de este en contacto con la muralla y el terreno existente, con el objetivo de comprobar el efecto que produce sobre los resultados finales. Respecto a la deformación vertical bajo la losa, no se contempla en las secciones de la hipótesis 3.1 ninguna explanada mientras que la hipótesis 3.2, se incorpora una explanada de suelo adecuado de un metro de profundidad que linda con el relleno de NFU.

Al igual que en los casos anteriores, en un primer cálculo se considera una profundidad máxima de excavación de 3,50 m para un ancho de 0,5 m, como muestra la Figura 63.

La colocación del geotextil se incluye en la fase 4 cuando finaliza la entibación hasta la cota indicada, y en las fases 10, 11 y 12 en las que además se añade a mitad de tongada una lámina de geotextil al colocar el relleno de NFU.

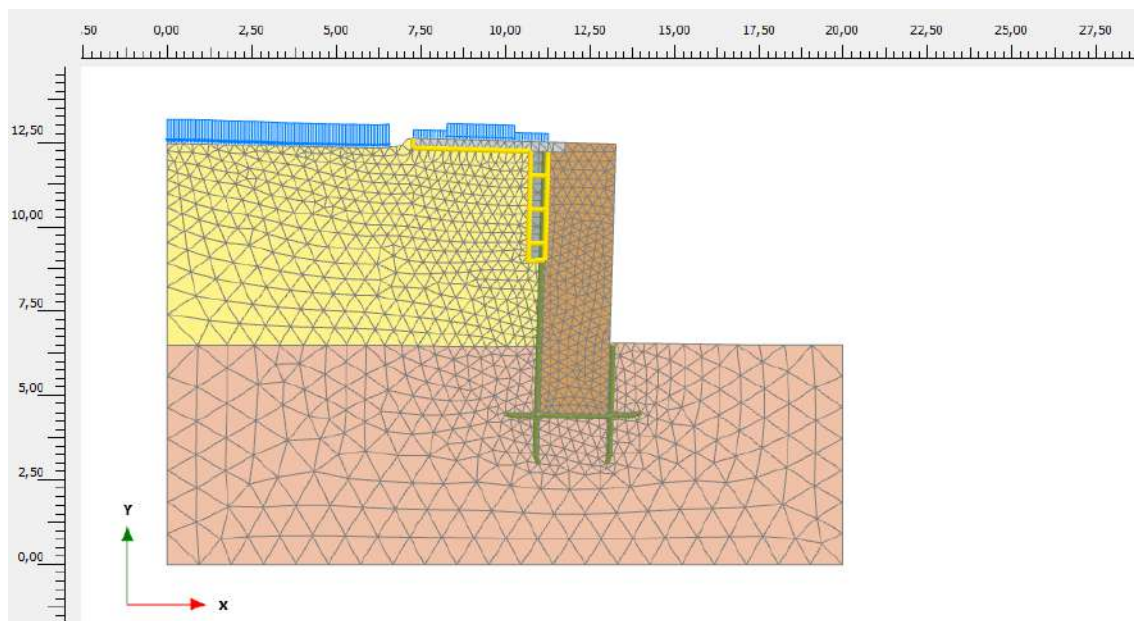


Figura 63. Hipótesis 3.1 con entibación (0,50-3,50 m) relleno con NFU con geotextil

Para la excavación de 6 m de profundidad sin explanada bajo la losa, la colocación del geotextil se considera en la fase 7 cuando finaliza la excavación del relleno localizado, y en las fases 8, 9, 10, 11, 12 y 13 cuando se va incorporando a mitad de la tongada una lámina de geotextil según indica la Figura 64. Por último, se procede a la colocación de un geotextil como elemento separador entre la losa y el terreno existente.

En el caso de contar con una explanada se procede a la colocación del geotextil, en el perímetro de la misma según se indica en la Figura 65.

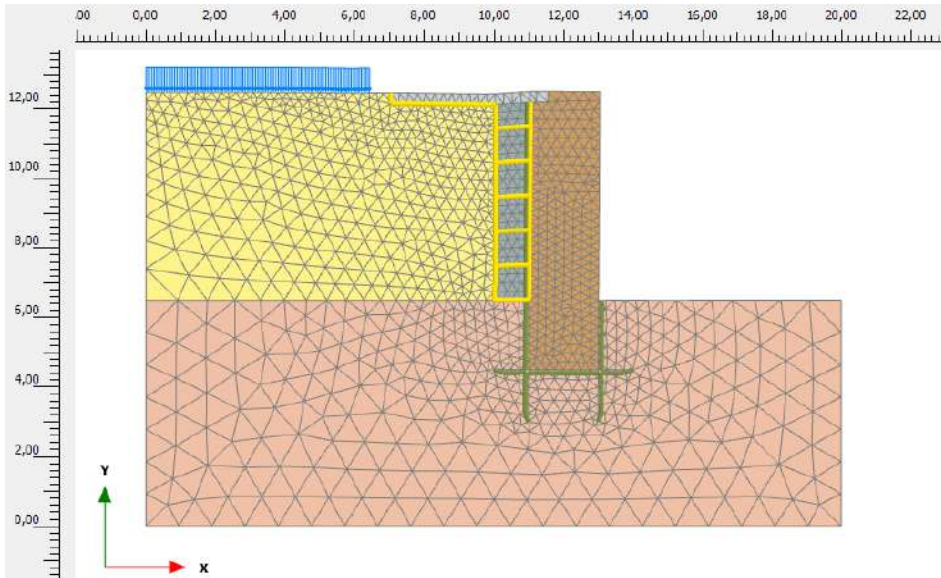


Figura 64. Hipótesis 3.1 con entibación (1·6 m) relleno con NFU con geotextil en fase 15

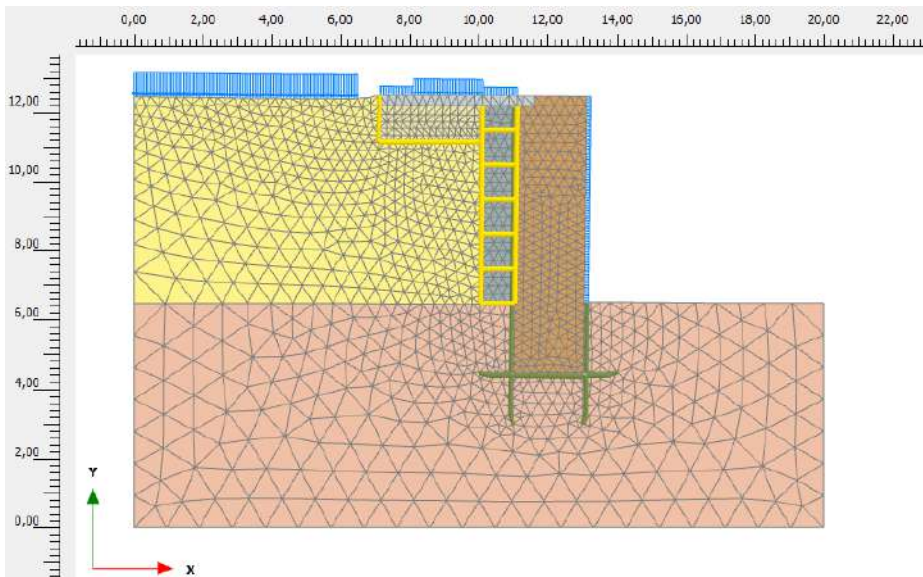


Figura 65. Hipótesis 3.2 con entibación (1,5·6 m) relleno con NFU con geotextil y explanada en fase 27.

Hipótesis 3.1:

Según se observa en la Tabla 68, la incorporación del geotextil en el modelo disminuye la deformación total en aquellas fases en las que se ha contemplado este elemento respecto a la hipótesis 2.1.

Tabla 68. Hipótesis 3.1 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (0,5·3,5 m) con geotextil sin explanada

Sección Muralla de Utrera – hipótesis 3.1 – 3,5 m - G

Fase	Cálculo	Tipo	Intervalo	Desplazamiento total (m)	F.S. Global
0	Procedimiento K0	“Etapa de construcción”	0 días	-	-
1	Seguridad	“Multiplicador incremental”	-	-	1,658
2	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0310	-
3	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0333	-
4	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 día	0,0357	-
5	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	-	-

6	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	-	-
7	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	-	-
8	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	-	-
9	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	-	-
10	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0363	-
11	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0364	-
12	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0364	-
13	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0353	-
14	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0388	-
15	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0392	-
16	Plástico	"Etapa de construcción"	-	0,0387	-
17	Plástico	"Etapa de construcción"	-	0,0381	-
18	Consolidación	Mínima presión intersticial	1 kPa	0,0381	-
19	Seguridad	"Multiplicador incremental"	-	-	1,881

En la Figura 66 se muestran los desplazamientos incrementales, mientras el diagrama de empujes horizontales presenta un empuje horizontal máximo de 94,83 kN/m.

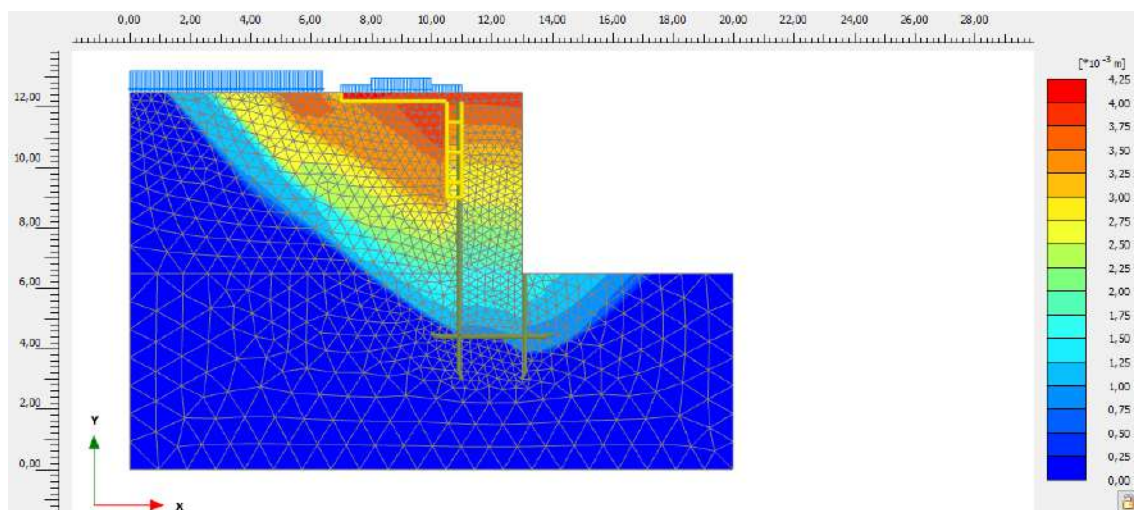


Figura 66. Hipótesis 3.1 Desplazamientos muralla relleno con NFU (0,50-3,5 m) con geotextil en fase 19

En la Tabla 69 para el ancho de entibación de 0,5 m y profundidad de 6 m con la incorporación del geotextil, se incluyen los resultados obtenidos para los desplazamientos totales y el factor de seguridad.

Tabla 69. Hipótesis 3.1 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (0,5-6 m) con geotextil sin explanada

Sección Muralla de Utrera – hipótesis 3.1 – 6 m - G

Fase	Cálculo	Tipo	Intervalo	Desplazamiento total (m)	F.S. Global
0	Procedimiento K0	"Etapa de construcción"	0 días	-	-
1	Seguridad	"Multiplicador incremental"	-	-	1,667
2	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0313	-
3	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0335	-
4	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0368	-
5	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0423	-
6	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0574	-
7	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0672	-
8	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0701	-

9	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0706	-
10	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0716	-
11	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0716	-
12	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0716	-
13	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0759	-
14	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0699	-
15	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0719	-
16	Plástico	“Etapa de construcción”	-	0,0728	-
17	Plástico	“Etapa de construcción”	-	0,0733	-
18	Consolidación	Mínima presión intersticial	1 kPa	0,0733	-
19	Seguridad	“Multiplicador incremental”	-	-	1,879

En la Figura 67 se incluyen los desplazamientos incrementales con la colocación del geotextil, donde el diagrama de **empujes horizontales** muestra un valor equivalente de empuje de **97,74 kN/m**.

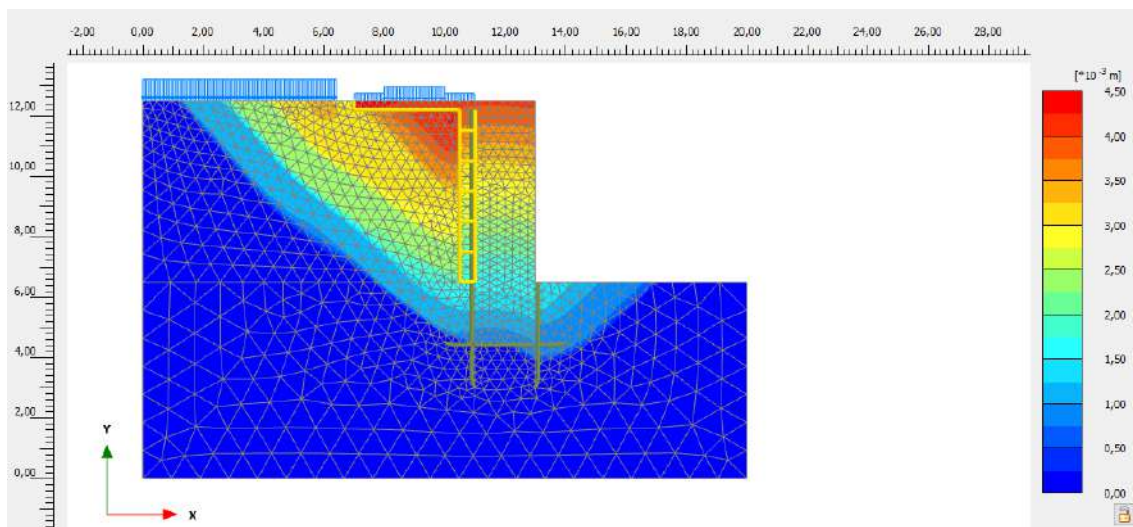


Figura 67. Hipótesis 3.1 Desplazamientos muralla relleno con NFU (0,5-6 m) con geotextil en fase 19

En la Tabla 70 se incluyen los principales resultados para el ancho de entibación de 1 m y 6 m de profundidad, a lo largo de todo el trasdós de la muralla.

Tabla 70. Hipótesis 3.1 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (1-6 m) con geotextil sin explanada

Sección Muralla de Utrera – hipótesis 3.1 – 6 m - G

Fase	Cálculo	Tipo	Intervalo	Desplazamiento total (m)	F.S. Global
0	Procedimiento K0	“Etapa de construcción”	0 días	-	-
1	Seguridad	“Multiplicador incremental”	-	-	1,667
2	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0306	-
3	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0320	-
4	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0348	-
5	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0416	-
6	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0664	-
7	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0808	-
8	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0842	-
9	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0845	-
10	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0861	-
11	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0863	-

12	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0861	-
13	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0844	-
14	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0844	-
15	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0862	-
16	Plástico	“Etapa de construcción”	-	0,0872	-
17	Plástico	“Etapa de construcción”	-	0,0880	-
18	Consolidación	Mínima presión intersticial	1 kPa	0,0880	-
19	Seguridad	“Multiplicador incremental”	-	-	1,909

En la Figura 68 se incluyen los desplazamientos incrementales para la hipótesis indicada , mientras el diagrama de empujes horizontales con un valor máximo de 99,34 kN/m.

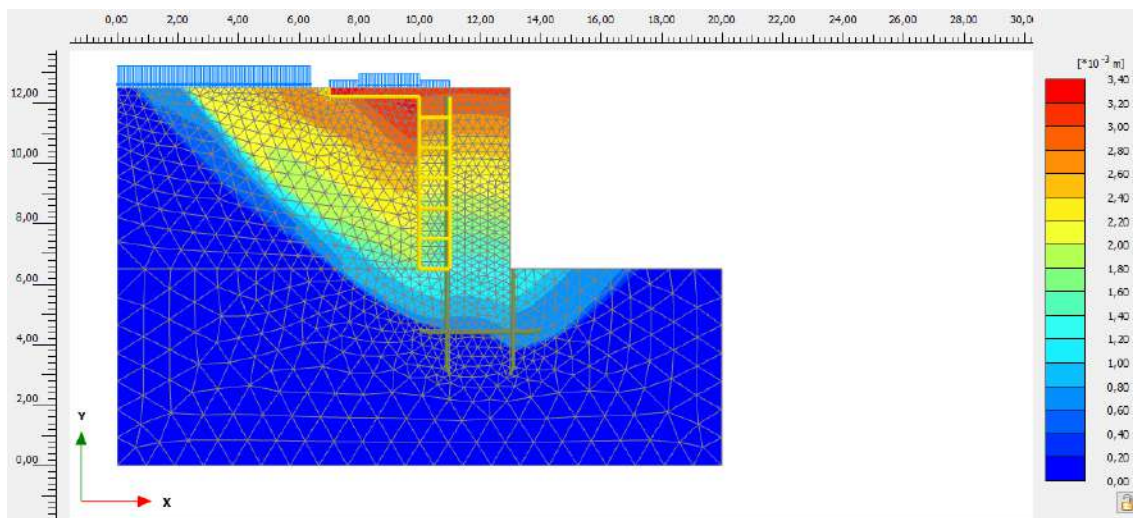


Figura 68. Hipótesis 3.1 Desplazamientos muralla relleno con NFU (1·6 m) con geotextil en fase 19

En la Tabla 71 se indican los resultados obtenidos al considerar el ancho de entibación de 1,50 m para la colocación de relleno de NFU incluyendo el geotextil en las mismas fases indicadas anteriormente.

Tabla 71. Hipótesis 3.1 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (1,5·6 m) con geotextil sin explanada

Sección Muralla de Utrera – hipótesis 3.1 – 6 m - G

Fase	Cálculo	Tipo	Intervalo	Desplazamiento total (m)	F.S. Global
0	Procedimiento K0	“Etapa de construcción”	0 días	-	-
1	Seguridad	“Multiplicador incremental”	-	-	1,675
2	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0300	-
3	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0312	-
4	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0341	-
5	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0455	-
6	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0808	-
7	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0964	-
8	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0991	-
9	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,0991	-
10	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1015	-
11	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1018	-
12	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1095	-
13	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1003	-
14	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1019	-

15	Plástico	"Etapa de construcción"	-	0,1032	-
16	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,1039	-
17	Plástico	"Etapa de construcción"	-	0,1042	-
18	Consolidación	Mínima presión intersticial	1 kPa	0,1043	-
19	Seguridad	"Multiplicador incremental"	-	-	1,928

En la Figura 69 se incluyen los desplazamientos incrementales, mientras que el diagrama de empujes para la sección analizada muestra un valor máximo de empuje horizontal de 103,7 kN/m.

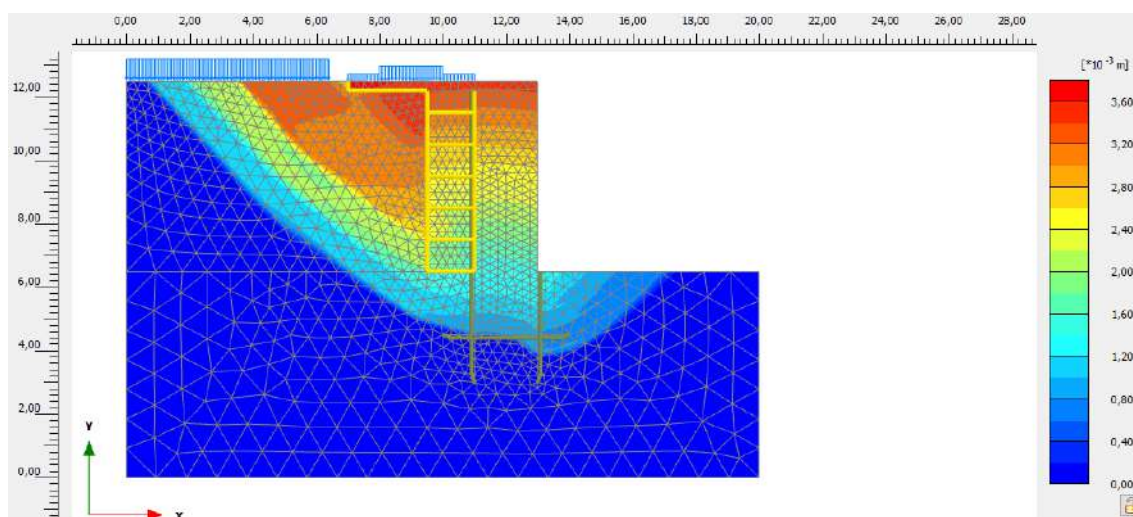


Figura 69. Hipótesis 3.1 Desplazamientos muralla relleno con NFU (1,5·6 m) con geotextil en fase 19

Hipótesis 3.2:

En esta hipótesis se añade el geotextil en el perímetro de la excavación en la fase 20 antes de proceder a la colocación de cada capa de 0,20 m de espesor de suelo adecuado para la formación de la explanada, los resultados indicados en la Tabla 72 muestran una menor deformación al incorporar el geotextil en la sección.

Tabla 72. Hipótesis 3.2 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (0,5·3,5 m) con geotextil y explanada

Sección Muralla de Utrera – hipótesis 3.2 – 3,5 m - GE

Fase	Cálculo	Tipo	Intervalo	Desplazamiento total (m)	F.S. Global
0	Procedimiento K0	"Etapa de construcción"	0 días	-	-
1	Seguridad	"Multiplicador incremental"	-	-	1,673
2	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0279	-
3	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0312	-
4	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0363	-
5	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-
10	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0384	-
11	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0392	-
12	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0379	-
13	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0373	-
14	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0370	-
15	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0369	-

16	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0369	-
17	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0370	-
18	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0382	-
19	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0392	-
20	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0404	-
21	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0421	-
22	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0390	-
23	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0394	-
24	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0397	-
25	Plástico	"Etapa de construcción"	-	0,0403	-
26	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0407	-
27	Plástico	"Etapa de construcción"	-	0,0407	-
28	Consolidación	Mínima presión intersticial	1 kPa	0,0407	-
29	Seguridad	"Multiplicador incremental"	-	-	1,857

En la Figura 70 se incluyen los desplazamientos incrementales de la sección analizada y el **diagrama de empujes**, que presenta un valor máximo de 101,5 kN/m.

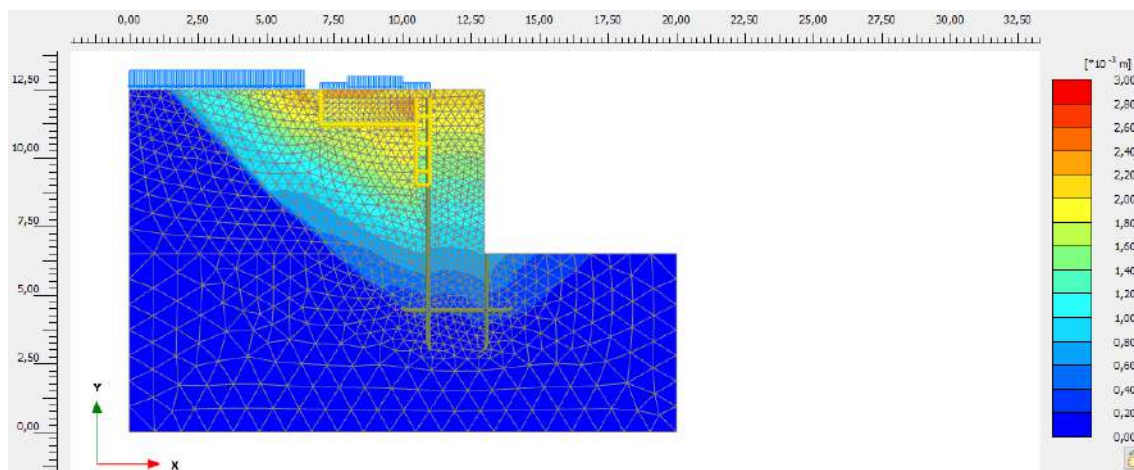


Figura 70. Hipótesis 3.2 Desplazamientos muralla relleno con NFU (0,5-3,5 m) con geotextil y explanada

En la Tabla 73 se incluyen los desplazamientos totales y el factor de seguridad obtenido al considerar un ancho de entibación de 0,5 m y una profundidad de 6 m.

Tabla 73. Hipótesis 3.2 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (0,5-6 m) con geotextil y explanada

Sección Muralla de Utrera – hipótesis 3.2 – 6 m - GE

Fase	Cálculo	Tipo	Intervalo	Desplazamiento total (m)	F.S. Global
0	Procedimiento K0	"Etapa de construcción"	0 días	-	-
1	Seguridad	"Multiplicador incremental"	-	-	1,666
2	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0281	-
3	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0323	-
4	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0374	-
5	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0462	-
6	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0612	-
7	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0741	-
8	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0766	-
9	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0771	-

10	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0778	-
11	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0777	-
12	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0775	-
13	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0755	-
14	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0746	-
15	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0741	-
16	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0741	-
17	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0742	-
18	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0744	-
19	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0756	-
20	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0765	-
21	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0775	-
22	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0789	-
23	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0762	-
24	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0767	-
25	Plástico	"Etapa de construcción"	-	0,0784	-
26	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 día	0,0788	-
27	Plástico	"Etapa de construcción"	-	0,0788	-
28	Consolidación	Mínima presión intersticial	1 kPa	0,0786	-
29	Seguridad	"Multiplicador incremental"	-	-	1,899

En la Figura 71 se incluyen las principales líneas de deslizamiento a partir de los desplazamientos incrementales y el **diagrama de empujes horizontales con un valor máximo de 110,3 kN/m**.

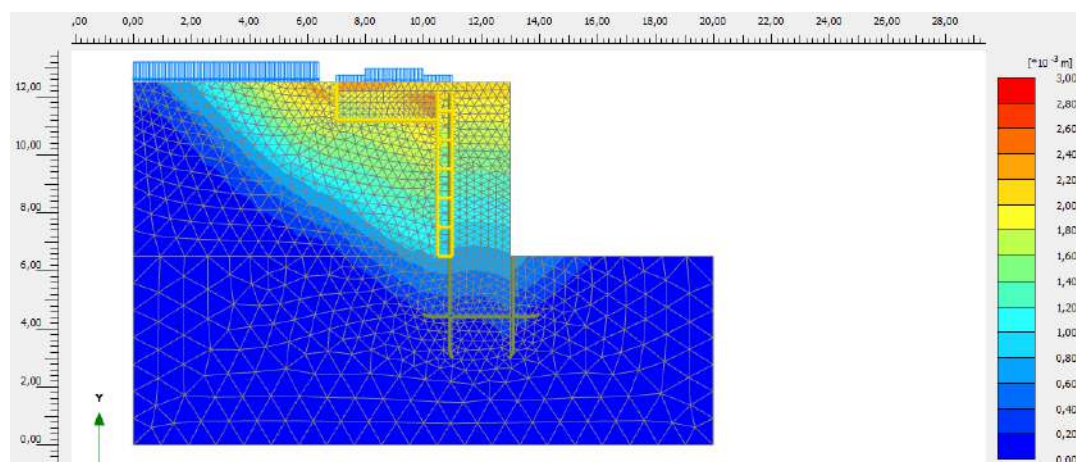


Figura 71. Hipótesis 3.2 Desplazamientos muralla relleno con NFU (0,5-6 m) con geotextil y explanada

En la Tabla 74 se incluyen los desplazamientos totales para cada una de las fases, así como el factor de seguridad al considerar un ancho de entibación de 1 m y profundidad de la excavación de 6 m con explanada bajo la losa, junto con la colocación de un geotextil.

Tabla 74. Hipótesis 3.2 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (1-6 m) con geotextil y explanada

Sección Muralla de Utrera – hipótesis 3.2 – 6 m - GE

Fase	Cálculo	Tipo	Intervalo	Desplazamiento total (m)	F.S. Global
0	Procedimiento K0	"Etapa de construcción"	0 días	-	-
1	Seguridad	"Multiplicador incremental"	-	-	1,666
2	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0274	-
3	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0295	-

4	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0334	-
5	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0422	-
6	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0695	-
7	Consolidación	"Etapa de construcción"	2 días	0,0876	-
8	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 días	0,0900	-
9	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 días	0,0906	-
10	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 días	0,0920	-
11	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 días	0,0913	-
12	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 días	0,0908	-
13	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 días	0,0885	-
14	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 días	0,0872	-
15	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 días	0,0864	-
16	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 días	0,0860	-
17	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 días	0,0860	-
18	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 días	0,0861	-
19	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 días	0,0873	-
20	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 días	0,0881	-
21	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 días	0,0890	-
22	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 días	0,0902	-
23	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 días	0,0883	-
24	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 días	0,0890	-
25	Plástico	"Etapa de construcción"	-	0,0895	-
26	Consolidación	"Etapa de construcción"	1 días	0,0905	-
27	Plástico	"Etapa de construcción"	-	0,0912	-
28	Consolidación	Mínima presión intersticial	1 kPa	0,0911	-
29	Seguridad	"Multiplicador incremental"	-	-	1,925

En la Figura 72 se incluyen los desplazamientos incrementales de la sección considerada, y el diagrama de empujes horizontales con un valor máximo de **empuje equivalente de 110 kN/m**.

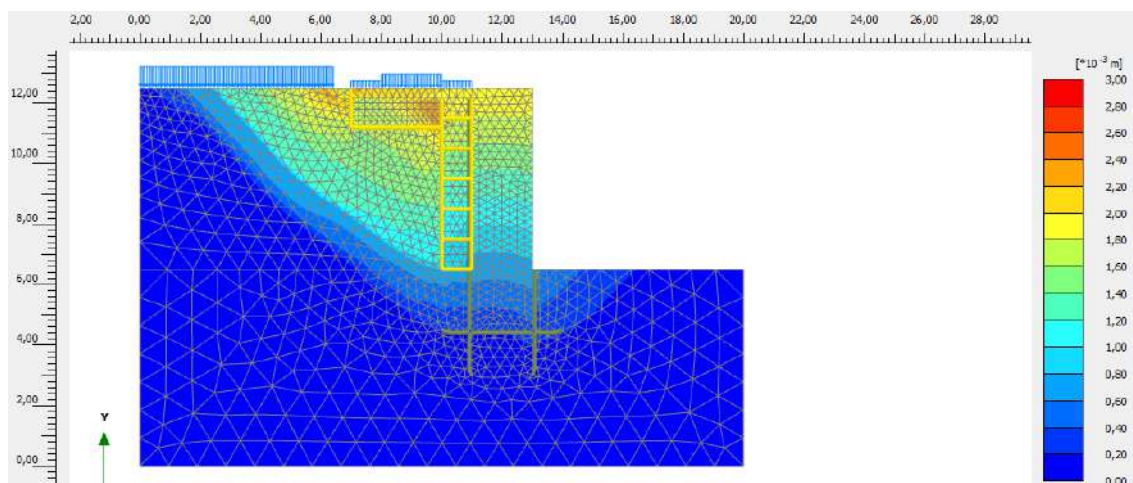


Figura 72. Hipótesis 3.2 Desplazamientos muralla relleno con NFU (1-6m) con geotextil y explanada

En la Tabla 75 se indican los resultados obtenidos al considerar el ancho de entibación de 1,50 m para la colocación de relleno de NFU incluyendo el geotextil en las mismas fases indicadas anteriormente.

Tabla 75. Hipótesis 3.2 Desplazamiento y F.S. relleno con NFU (1,5-6 m) con geotextil y explanada

Sección Muralla de Utrera – hipótesis 3.2 – 6 m- GE

Fase	Cálculo	Tipo	Intervalo	Desplazamiento total (m)	F.S. Global
0	Procedimiento K0	“Etapa de construcción”	0 días	-	-
1	Seguridad	“Multiplicador incremental”	-	-	1,659
2	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0267	-
3	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0286	-
4	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0329	-
5	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0477	-
6	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,0880	-
7	Consolidación	“Etapa de construcción”	2 días	0,1129	-
8	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1060	-
9	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1077	-
10	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1077	-
11	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1074	-
12	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1064	-
13	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1078	-
14	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1048	-
15	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1031	-
16	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1020	-
17	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1009	-
18	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1010	-
19	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1009	-
20	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1021	-
21	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1026	-
22	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1033	-
23	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1044	-
24	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1058	-
25	Plástico	“Etapa de construcción”	-	0,1072	-
26	Consolidación	“Etapa de construcción”	1 día	0,1078	-
27	Plástico	“Etapa de construcción”	-	0,1083	-
28	Consolidación	Mínima presión intersticial	1 kPa	0,1084	-
29	Seguridad	“Multiplicador incremental”	-	-	1,956

En la Figura 73 se incluyen la sección de la muralla mostrando los desplazamientos incrementales mientras que el **empuje horizontal máximo presenta un valor de 105,7 kN/m**.

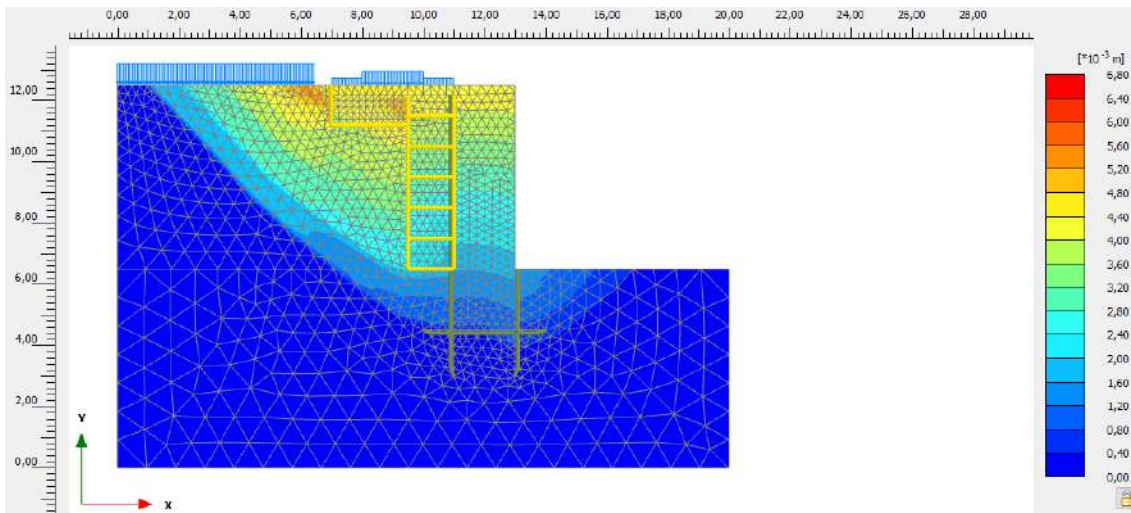


Figura 73. Hipótesis 3.2 Desplazamientos muralla relleno con NFU (1,5·6m) con geotextil y explanada

Por último, en la Tabla 76 se incluyen los desplazamientos verticales de los puntos analizados, así como el valor de los asientos diferenciales obtenidos.

Tabla 76. Desplazamientos verticales (U_y) m puntos A, B y C para hipótesis 3 sección Muralla de Utrera

Hipótesis 3 Muralla de Utrera

Hipótesis	Ancho entibación (m)	Profundidad (m)	Fase	Punto A (7,1 12) (m)	Punto B (8,5 12) (m)	Punto C (6,5 12) (m)	Asiento entre B y C (cm)	Asiento entre A y B (cm)
3.1	0,50	3	18	-0,013	-0,0095	-0,014	0,45	0,35
	0,50		18	-0,021	-0,037	-0,020	1,70	1,60
	1,00	6	18	-0,035	-0,054	-0,035	1,90	1,90
	1,50		18	-0,054	-0,074	-0,051	2,30	2,00
3.2	0,50	3	28	-0,0091	-0,0062	-0,016	0,98	0,29
	0,50		28	-0,023	-0,031	-0,027	0,40	0,80
	1,00	6	28	-0,039	-0,049	-0,045	0,40	1,00
	1,50		28	-0,053	-0,070	-0,062	0,80	1,70

Las hipótesis 3.1 presentan los mismos asientos diferenciales que la hipótesis 2.1 aunque la deformación vertical de los puntos analizados se reduzca entre un 8% y un 18% por el efecto de contención del geotextil. El mayor descenso en los desplazamientos verticales en el punto C se aprecia para el ancho de entibación de 1,50 m y profundidad 6 m.

Para las hipótesis 3.2, al excavar el terreno bajo la losa para la formación de la explanada, las deformaciones verticales en los puntos analizados respecto a las hipótesis 2.2 son menores entre un 17% en caso de la entibación de 1,50 m para el punto A y hasta un 6% para el resto de los puntos.

5.2.8.5 Conclusiones actuaciones sobre la muralla de Utrera, Sevilla.

Los análisis de estabilidad preliminares sobre la estabilidad inicial de una sección del recinto amurallado de Utrera en base a las hipótesis consideradas, permiten extraer las siguientes conclusiones:

- Es necesario considerar en el modelado el sistema de estabilización mediante la entibación del terreno que permita obtener una **deformación moderada de la malla a corto plazo**.
- Los parámetros de resistencia al corte para el terreno existente en el trasdós de la muralla que permiten simular un factor de seguridad mayor a la unidad fueron:
 - Cohesión (c): 5 kPa
 - Ángulo de rozamiento (Φ): 30°
- Debido a la dificultad de compactación como relleno localizado que presenta **el granulado de neumático no se considera como apoyo para la losa**, por lo que las deformaciones verticales en la superficie del NFU no se analizan en los distintos cálculos.
- Al considerar **condiciones a corto plazo, la superficie de deslizamiento disminuye su pendiente – produciéndose mayores deformaciones-** a medida que se aumenta el ancho de excavación para la colocación del relleno localizado mediante NFU, **al igual que ocurre al aumentar la profundidad en la cota de excavación**.

Los análisis de estabilidad de la muralla una vez implementadas la colocación del NFU sobre la sección analizada, muestran los siguientes resultados:

- Se aprecia que el aumento de la deformación de la malla se produce entre los días 7 y 11 cuando se procede a la entibación y excavación desde la cota de 4,50 m hasta el estrato arcilloso. Cuanto mayor es el ancho y profundidad de la excavación en el trasdós de la muralla, mayor es la deformación del modelo.
- La mayor deformación vertical en el punto C –próximo a cimentaciones cercanas- ocurre al considerar un ancho de entibación de 1,50 m, además de la ejecución de la explanada. Mientras que al considerar un ancho de **entibación de 0,50 m y profundidad de 3,50 m** de excavación, **los asentos se reducen en torno a un 70%**.
- **La incorporación de un geotextil** en los modelos con y sin explanada, **permite disminuir la deformación vertical** de los puntos analizados **entre un 8% y un 18%** aunque los asentos se mantengan constantes.
- En el análisis de estados límite últimos, se considera que no pueden producirse los movimientos mínimos necesarios para movilizar el empuje activo, debido a las restricciones impuestas por el sistema de estabilización mediante la entibación del terreno, que limita las deformaciones de las edificaciones cercanas. Por lo que para el cálculo realizado se considera el empuje en reposo K_0 .
- Para una **profundidad de excavación de 6 m considerando la situación a corto plazo**, al colocar NFU -HIPÓTESIS 2.1- y NFU con geotextil -HIPÓTESIS 3.1-, **se produce una reducción de los empujes horizontales entre un 17,72% y un 20,11% respectivamente**, en comparación con la **hipótesis 1.1**. Si se plantea una **situación a largo plazo**, los empujes horizontales se reducen para las mismas hipótesis de cálculo entre un **33% y un 10% respectivamente**.
- En el caso de considerar la implementación de una **explanada bajo la losa, los empujes horizontales** en la HIPÓTESIS 2.2 y 3.2 respecto a la solución que no contempla NFU -HIPÓTESIS 1.2-, son entre un **5,81% y un 6,64% inferiores**. Este hecho puede deberse por no haber considerado en la hipótesis 1.2 la excavación en el trasdós de la muralla hasta 6 m de profundidad, ya que la mejora en el empuje se debe a la reducción de la deformación del terreno **durante el proceso constructivo**.
- Para una profundidad de excavación de 3 m y 0,50 m de ancho – HIPÓTESIS 2.1-, **considerando los resultados a corto plazo, los empujes horizontales** se reducen en un **37,49% respecto a la hipótesis 1.1** al no contemplar explanada bajo la losa, y en un **13,65% respecto a la hipótesis 1.2, que incluye la explanada**. Dichos empujes en el caso de contemplar además la incorporación de un geotextil, se reducen entre un **24,43% y un 12,80% al no considerar explanada y al implementarla respectivamente**, según se muestra en la Figura 74.

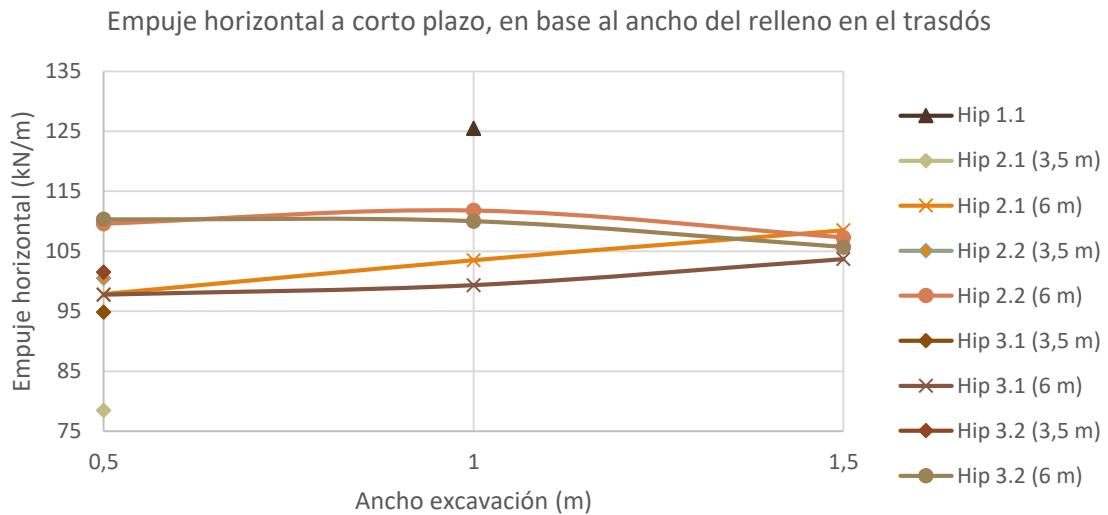


Figura 74. Empuje horizontal a corto plazo en función del ancho del relleno de NFU en el trasdós

- En el caso de analizar los resultados a **largo plazo**, para una **profundidad de excavación de 3 m y 0,50 m de ancho** – HIPÓTESIS 2.1-, **los empujes horizontales se reducen en un 32,96% respecto a la hipótesis 1.1** al no contemplar explanada bajo la losa, y **se incrementan un 13,21% respecto a la hipótesis 1.2, al considerar la explanada**. Por lo que se concluye, que esa sección de menor ancho y profundidad de excavación, **no favorece la reducción de los empujes por el efecto de la explanada**. Dichos empujes en el caso de contemplar además la incorporación de un geotextil, se reducen entre un **1,5% y un 17% al no considerar explanada y al implementarla respectivamente**, según se muestra en la Figura 75.

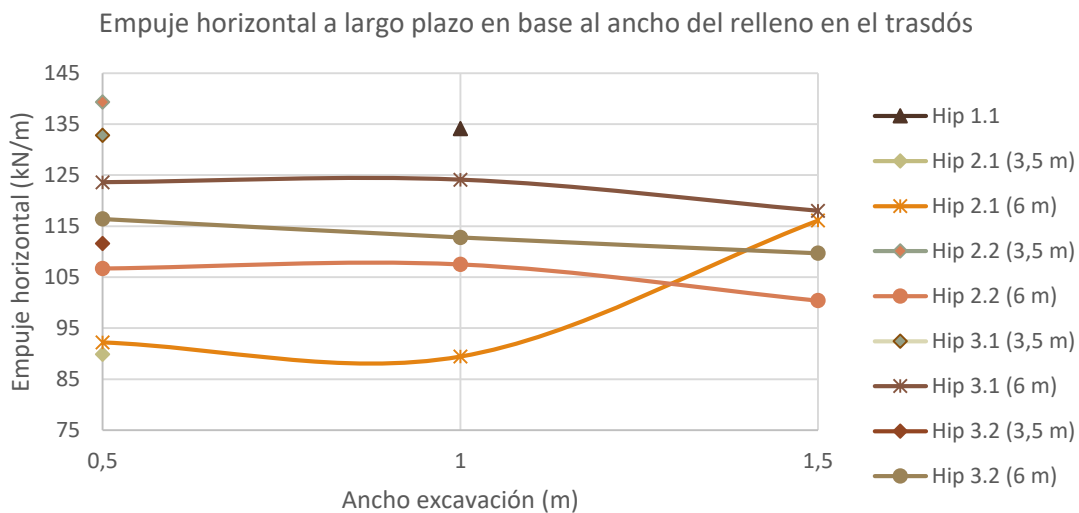


Figura 75. Empuje horizontal a largo plazo en función del ancho del relleno de NFU en el trasdós

- Realizando una **excavación de 3,5 m y ancho 0,5 m sin explanada bajo la losa**, se obtiene la misma **reducción del 33% en los empujes horizontales que excavando 6 m**, si se comparan ambas soluciones con la **hipótesis 1.1**. Mientras que, considerar **mayor ancho de excavación aumenta los empujes** sobre el trasdós, **ante las mayores deformaciones que provoca la ausencia de explanada**. Por lo que se pone de manifiesto la importancia de analizar todas las variables del modelo.

- Las soluciones que incluyen **explanada bajo la losa reducen en un 20% el empuje horizontal, funcionando mejor a mayor ancho de relleno de NFU. No obstante, la diferencia entre el ancho de relleno de 0,5 m y de 1,5 m es del 6,30%.**
- Al realizar las modificaciones indicadas en los modelos de la hipótesis 1, se produce un **descenso en el factor de seguridad de entre el 5,85% (hipótesis 1.1) y el 18% (hipótesis 1.2) respecto a la condición inicial.** En la hipótesis 2 se produce un incremento en el factor de seguridad ascendente a mayor ancho de entibación en todos los cálculos con un máximo del 13%. En el caso de considerar la incorporación de un geotextil, el incremento en el factor de seguridad respecto a la condición inicial alcanza el 15,18% para un ancho de entibación de 1,5 m y ejecución de explanada.

5.3 APLICACIÓN 2: ANÁLISIS COMPARATIVO DEL TERRAPLENADO DE UN VIAL

5.3.1 Consideraciones iniciales para el terraplenado de un vial

En esta aplicación se verifica el potencial de uso del granulado de neumático como relleno en el terraplenado de un vial sobre un terreno arcilloso. Para ello, se realiza un estudio comparativo de la utilización de NFU triturado como material de relleno en un terraplén tipo, frente al tradicional uso de rellenos mediante material granular convencional. La principal ventaja de este material es su bajo peso específico - que no favorece un incremento repentino de las presiones intersticiales del terreno- por lo que es necesario considerar periodos intermedios de consolidación que permitan llevar a cabo la construcción del terraplén de forma segura, como resultado del comportamiento no drenado del terreno de cimentación.

Para el estudio de las hipótesis con el terraplén tipo se empleó el programa de elementos finitos PLAXIS 2D V8 – V20. Las ecuaciones fundamentales con las que calcula la consolidación del terreno se basan en la teoría de Biot; la ley de Darcy para el flujo de fluidos y el comportamiento elástico del esqueleto del terreno. Se debe considerar que el programa de cálculo presenta los esfuerzos a compresión negativos; lo que aplica tanto a las tensiones efectivas como a las presiones intersticiales.

Partiendo de estas premisas, los principales objetivos del presente análisis son obtener resultados comparativos en cuanto a los valores de asentamientos, comportamiento frente al fenómeno de consolidación, y por último, distintos mecanismos de colapso del suelo que arrojen el coeficiente de seguridad para cada una de las secciones del terraplén propuestas. Cada uno de los resultados estará condicionado por el porcentaje en volumen de NFU que se haya considerado en las diferentes secciones.

A diferencia de la aplicación del NFU como relleno localizado, en la presente aplicación se precisan de grandes volúmenes de material por lo que a través del mismo programa de cálculo, se llevará a cabo el análisis del comportamiento térmico frente a variaciones en la temperatura ambiente.

Basados en el conocimiento adquirido, se plantea como conclusión el análisis de estabilidad de una ladera existente en la urbanización Cármenes del Mar, Almuñecar (Granada). Para ello, se parte de una sección tipo del terreno y se proponen tres hipótesis de actuaciones para mejorar la estabilidad de la ladera, en donde se incluye el uso de NFU como material de relleno en viales de tráfico interior de dicha urbanización.

5.3.2 Esquema conceptual de etapas terraplénado de un vial

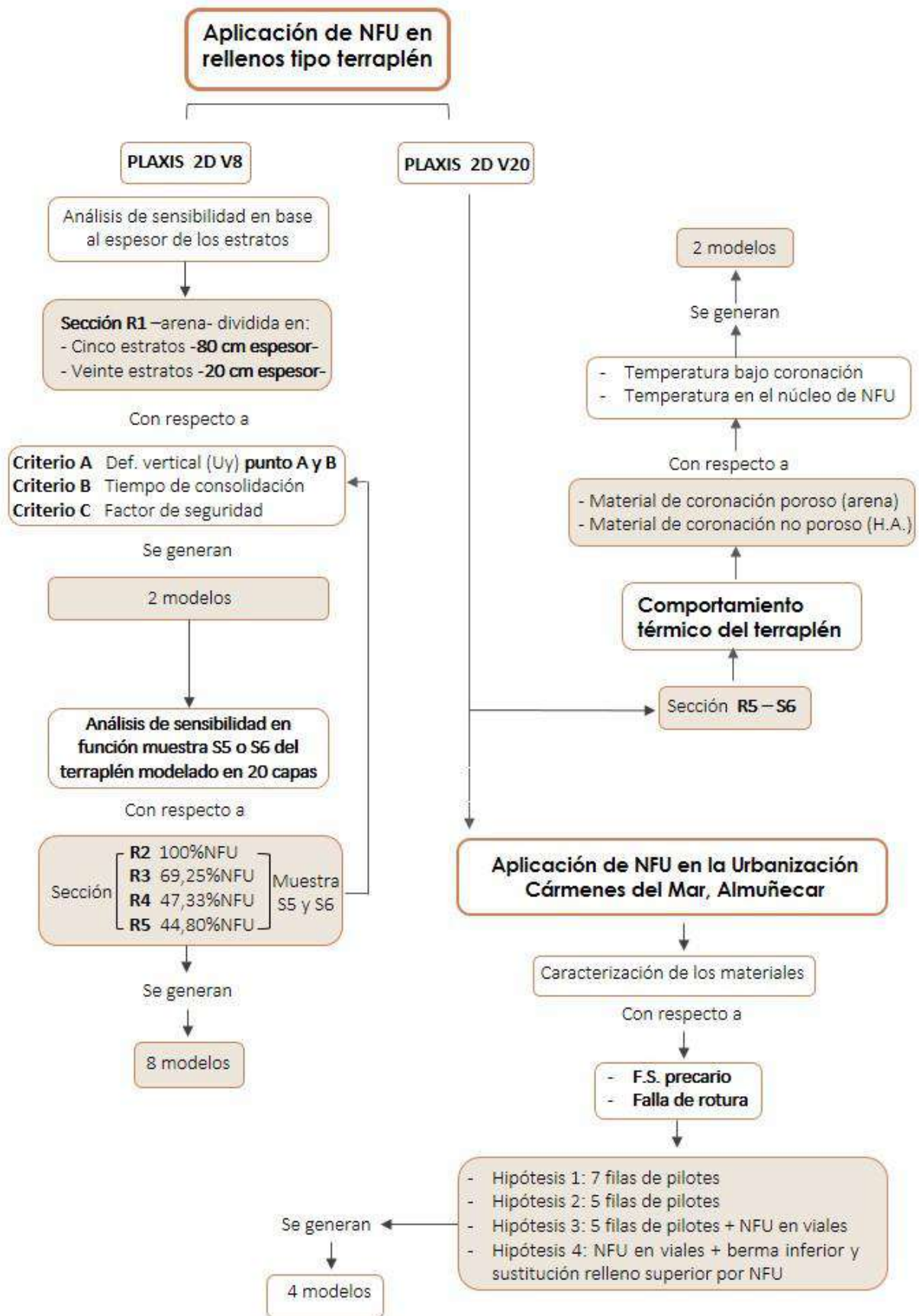


Figura 76. Esquema conceptual de etapas para el terraplenado de un vial.

5.3.3 Características de los materiales para rellenos tipo terraplén (PG-3)

Los materiales que podrán emplearse en rellenos tipo terraplén serán con carácter general suelos locales de las excavaciones realizadas en obras o bien préstamos definidos en el Proyecto, no haciéndose mención al empleo de materiales reciclados según indica el PG3-P3 artículo 330. Se analizan las propiedades de los suelos de forma que estos puedan calificarse en seleccionados, adecuados, tolerables y marginales. En la Tabla 77 se indican las zonas de un terraplén en las que se pueden emplear los distintos tipos de materiales marginales.

Tabla 77. Parámetros geotécnicos de los materiales según artículo 330 PG-3

PARÁMETRO		SELECCIONADOS	ADECUADOS	TOLERABLES	MARGINALES
<i>Aplicación</i>		Coronación Cimientos Núcleo	Coronación Cimientos Núcleo	Cimientos Núcleo	Núcleo
<i>Materia orgánica UNE 103204</i>		< 0,2%	< 0,1%	< 0,2%	< 5%
<i>Sales solubles NLT 114</i>	Yeso	< 0,2%	< 0,2%	< 5%	-
	Otras			< 1%	-
<i>Hinchamiento libre UNE 103061 y UNE 103500</i>				< 3%	< 5%
<i>Asiento en ensayo de colapso NLT-254 y UNE 103500</i>				< 1%	
<i>Granulometría</i>	Tamaño máximo (mm)	≤100	≤100		
	Otras condiciones	#0,4<15%(*) #2<80% #0,4<75%	#2<80%		
	Finos (#0,08mm)	<25%	<35%		
<i>Plasticidad UNE 103103 y UNE 103104</i>		Según especificaciones			

Nota: Adaptado de Pliego de prescripciones técnicas general para obras de carreteras y puentes (PG3-P3) (Ministerio de Fomento, 2015)

Respecto al grado de compactación, en el PG 3-P3 se indica la necesidad de especificar si se empleará el procedimiento según Próctor Normal o el Próctor Modificado. En caso de omisión de dicho dato en el proyecto, se deberá emplear como referencia el Próctor modificado.

En cuanto al contenido de humedad se deberá tener en cuenta múltiples factores como la necesidad de obtener la densidad óptima según ensayo Próctor, el comportamiento del material a largo plazo ante posibles cambios de dicha humedad, la evolución de la humedad de los materiales excavados y su evolución durante la puesta en obra. En los ensayos llevados a cabo con NFU se concluyó que con un contenido de agua del 10% era suficiente para alcanzar el valor máximo de densidad seca.

Cuando lo indique el Proyecto se extenderán capas de materiales granulares o láminas geotextiles que faciliten la puesta en obra de las primeras tongadas de relleno. Esta prescripción es obligatoria para separar el granulado de NFU respecto al terreno existente.

El peso específico alcanzado en obra no solo depende de los métodos de compactación, sino también del espesor de la capa que debe ser compactada y el número de pasadas que realice el equipo de compactación. En el PG-3 se especifica que el espesor de cada tongada será como máximo de 0,30 m, siendo en todo caso superior a tres medios ($3/2$) del tamaño máximo del material a utilizar.

Las prácticas de compactación con NFU sugieren que capas de 2 m de espesor como mínimo y 3 m de espesor como máximo se compacten al menos con tres pasadas (GeoSyntec Consultants, 2008). En otras puestas en obra, se indicó que con un tamaño de partícula de 0,15 m es preciso compactar en capas de 0,30 m de espesor en 6 pasadas con rodillo vibratorio con un mínimo de 10 toneladas de peso por pasada (Meles, 2014).

El análisis mediante elementos finitos indica que los asientos del terraplén de NFU pueden ser calculados con una aproximación razonable y puede alcanzarse un diseño satisfactorio usando el material con los parámetros obtenidos en el ensayo de compresión unidimensional. No obstante, el modelo puede subestimar el asiento de campo si se usa el NFU como material de relleno en condiciones no confinadas (Meles, 2014). Sin embargo, en muchas de las aplicaciones es una práctica habitual cubrir los lados y la cubierta del NFU con árido convencional para separarlo de las inmediaciones y reducir la compresibilidad.

En cuanto al uso de materiales marginales se deberán contemplar los siguientes aspectos:

- Valoración de las propiedades que confieren al suelo su carácter marginal.
- Influencia de dichas características en los diferentes usos del suelo dentro de la obra.
- Posible influencia en el comportamiento o evolución de otras zonas u elementos de la obra.
- Estudio pormenorizado donde se indiquen las características resistentes del material y los asientos totales y diferenciales esperados, así como la evolución futura de estos.
- Disposiciones constructivas y prescripciones técnicas a adoptar para los diferentes usos del suelo dentro de la obra.

El laboratorio de CEDEX redactó una “Guía para el proyecto y ejecución de rellenos viarios con NFU troceados” para la dirección general del Ministerio de Fomento, los cuales se clasifican como material marginal (“Obras de tierra y terraplenes | CEDEX,” n.d.).

Las observaciones para la puesta en obra de estos materiales marginales tipo residuo se resumen en:

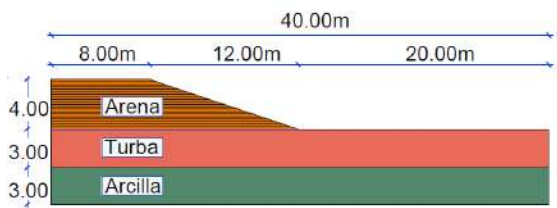
- Las piezas de NFU solo se pueden colocar en el núcleo de los rellenos.
- Las capas de NFU han de colocarse por encima del N.F. esperable y de la cota de inundación prevista en la zona de implantación.
- La cara inferior de las capas de NFU debe estar situada, al menos, a 1 m por encima de la cota superior del terreno natural.
- La cara superior de la capa de NFU de mayor cota debe estar, como mínimo, a 1 m de la cara superior de la coronación del terraplén.
- El espesor de las capas de NFU no debe ser mayor de 3 m.
- Las capas de NFU han de envolverse en geotextiles para evitar la percolación de partículas de suelo entre las tiras de NFU.
- La distribución de tamaños y contenido de alambres expuestos del material NFU serán los de un material Tipo B (Clase II).
- Para una mezcla de relleno NFU-suelo, con las mejores características mecánicas posibles, lo más idóneo es fabricarla al 50% en volumen en ambos materiales.
- Las capas intermedias de material térreo que hacen refuerzo estructural deben tener un espesor mínimo de 1 m y estar exentas de materia orgánica.
- Los espaldones del relleno deben asegurar la impermeabilidad ante el agua o aire, y tener anchura suficiente para su adecuada compactación.

- La capa de coronación ha de minimizar la infiltración del agua de lluvia hacia las capas de NFU, drenándola con una ligera pendiente lejos de la estructura.

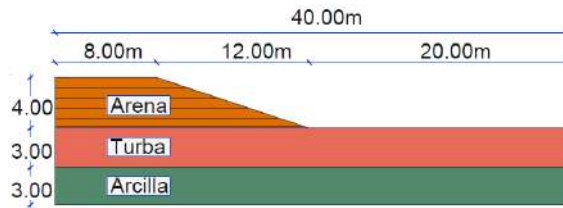
En cuanto a estas prescripciones indicadas por CEDEX, sólo se realizará un modelo que considere el total de los guiones indicados -sección R5-, mientras que el resto de los modelos propuestos sólo tendrán en cuenta la ubicación del N.F. en el pie del terraplén, de forma que el relleno de NFU se encuentre por encima de este.

5.3.4 Caracterización e hipótesis de cálculo en PLAXIS 2D V8 – V20

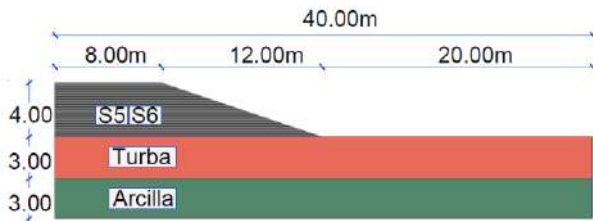
Los parámetros geotécnicos y las hipótesis de cálculo se consideran la base para la generación de los datos de entrada de PLAXIS. Las estratigrafías propuestas, según la Figura 77 consideran la misma geometría del terraplén, modificando la composición de los estratos que lo componen y el espesor de las capas en las que se dispone el material, que se define para la sección R1 en dos modelos, uno de ellos compuesto por 5 capas y otro por 20 capas.



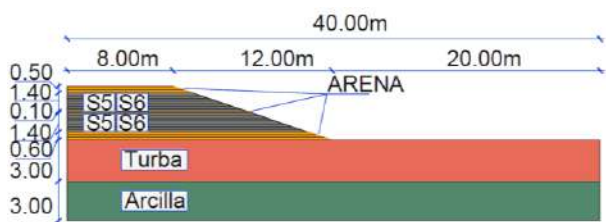
Sección R1 - (20C) 20 CAPAS – 0% NFU



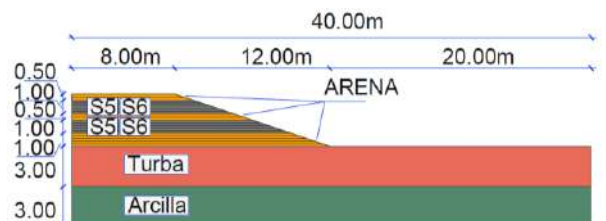
Sección R1 - (5C) 5 CAPAS - 0% NFU



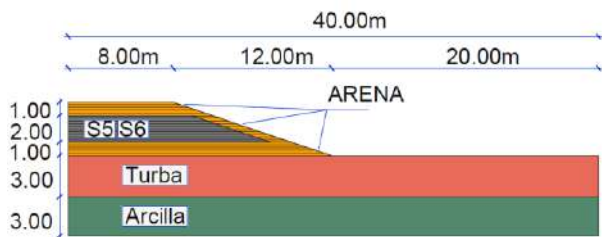
Sección R2 20 ESTRATOS (20C) – 100% NFU



Sección R3 20 ESTRATOS (20C) – 69% NFU



Sección R4 19 ESTRATOS (19C) – 47% NFU



Sección R5 20 ESTRATOS (20C) – 44 % NFU

Figura 77. Hipótesis de cálculo secciones terraplén de un vial

Se establece que el nivel freático se encuentra en la cota $\pm 0,00$ m y se generan las presiones iniciales intersticiales. A partir del procedimiento K0, se generan los esfuerzos iniciales en base al coeficiente de empuje, ya que la superficie de cálculo es horizontal. En este cálculo no se considera la sobreconsolidación de ningún estrato, ya que una sobrecarga previa resultaría en asentos y tiempo de consolidación menores. Respecto a las condiciones de borde para el análisis de consolidación el contorno vertical izquierdo se considera cerrado al tratarse del eje de simetría, así como, el contorno vertical derecho para el flujo de agua y la disipación de los excesos de presión intersticial. El contorno de la superficie y el contorno inferior se definen abiertos para el flujo de agua y la disipación de las presiones intersticiales.

Los puntos de interés para el análisis de todas las secciones propuestas en esta aplicación según se indica en la Figura 78 son:

Punto A en el pie del terraplén.

Punto B en el centro del estrato de apoyo.

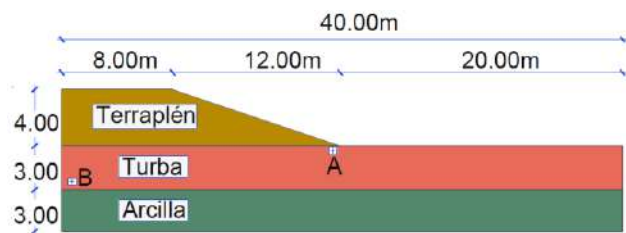


Figura 78. Ubicación puntos A y B análisis del terraplén de un vial

Como argumento de aplicación de NFU sobre terrenos con poca capacidad portante, una vez definidas las fases, se analizan los resultados conforme a los siguientes criterios:

- **Criterio 1: Deformación vertical en el punto A y B.**
- **Criterio 2: Tiempo total hasta que finaliza el proceso de consolidación primaria.**
- **Criterio 3: Factor de seguridad obtenido.**

5.3.4.1 Influencia de las fases constructivas en la ejecución del terraplén según sección R1

Con el fin de analizar la influencia que el espesor de las capas del terraplén tiene en los resultados obtenidos durante el proceso de ejecución, se analizan dos hipótesis para la sección R1, constituida en su totalidad por material convencional tipo arena.

En la primera hipótesis, se sintetiza la construcción de cada estrato en una fase, sin dividirse en capas de menor espesor. La construcción de los estratos se realiza en 5 fases, cada una en un intervalo de tiempo de 12 días, que se asimilaría a un comportamiento bajo condiciones no drenadas. Después de cada fase de

construcción se introduce una fase de consolidación que se desarrolla en un periodo de 16 días para que se establezca el aumento de la presión intersticial y así verificar la viabilidad de continuar con la ejecución del mismo. La última fase constituye un análisis de consolidación que se considera finalizado cuando se alcanza un valor de 1 kN/m² de presión intersticial, según se indica en la Tabla 78.

Tabla 78. Fases de cálculo para sección R1 ejecutado en 5 capas.

Sección R1 – 5 capas

Fase	Tipo de cálculo	Número de capas del terraplén	Tipo de carga	Tiempo [días]	Tiempo acumulado [días]
1	"Consolidación"	1	"Etapa de construcción"	12	12
2		1		16	28
3		2		12	40
4		2		16	56
5		3		12	68
6		3		16	84
7		4		12	96
8		4		16	112
9		5		14	126
10	"Consolidación"	5	"Mínima presión intersticial"	-	612

En una segunda hipótesis, las fases de cálculo constan de la fase inicial y 40 fases constructivas que corresponden a un cálculo de tipo análisis de consolidación en capas de 0,20 m de espesor. Se considera al igual que la hipótesis anterior un análisis de consolidación por cada una de las capas. La última fase constituye un análisis de consolidación que se considera finalizado cuando se alcanza un valor de 1 kN/m² de presión intersticial, según se indica en la Tabla 79.

Tabla 79. Fases de cálculo para sección R1 ejecutado en 20 capas

Sección R1 – 20 capas

Fase	Tipo de cálculo	Número de capas del terraplén	Tipo de carga	Tiempo [días]	Tiempo acumulado [días]
1	"Consolidación"	1	"Etapa de construcción"	3	3
2		1		4	7
3		2		3	10
4		2		4	14
5		3		3	17
6		3		4	21
7		4		3	24
8		4		4	28
...					
39	"Consolidación"	20	"Etapa de construcción"	5	138
40	"Consolidación"	20	"Mínima presión intersticial"	-	591

En el caso de considerar la construcción en 5 capas, la diferencia de desplazamientos verticales en cada fase respecto a la fase anterior va aumentando conforme se produce la construcción del terraplén. Esto es debido al exceso de presiones intersticiales, que causa la consolidación total del terreno.

En la deformación vertical del terraplén en base a las dos hipótesis de construcción para la sección R1, la diferencia en la deformación para el punto B es de un 24,7%. Mientras en el punto A se produce un levantamiento del pie del terraplén debido al incremento de las presiones sobre el terreno, siendo un 90% inferior si se considera el terraplén ejecutado en capas de 0,2 m capas de espesor, según se indica en la Figura 79.

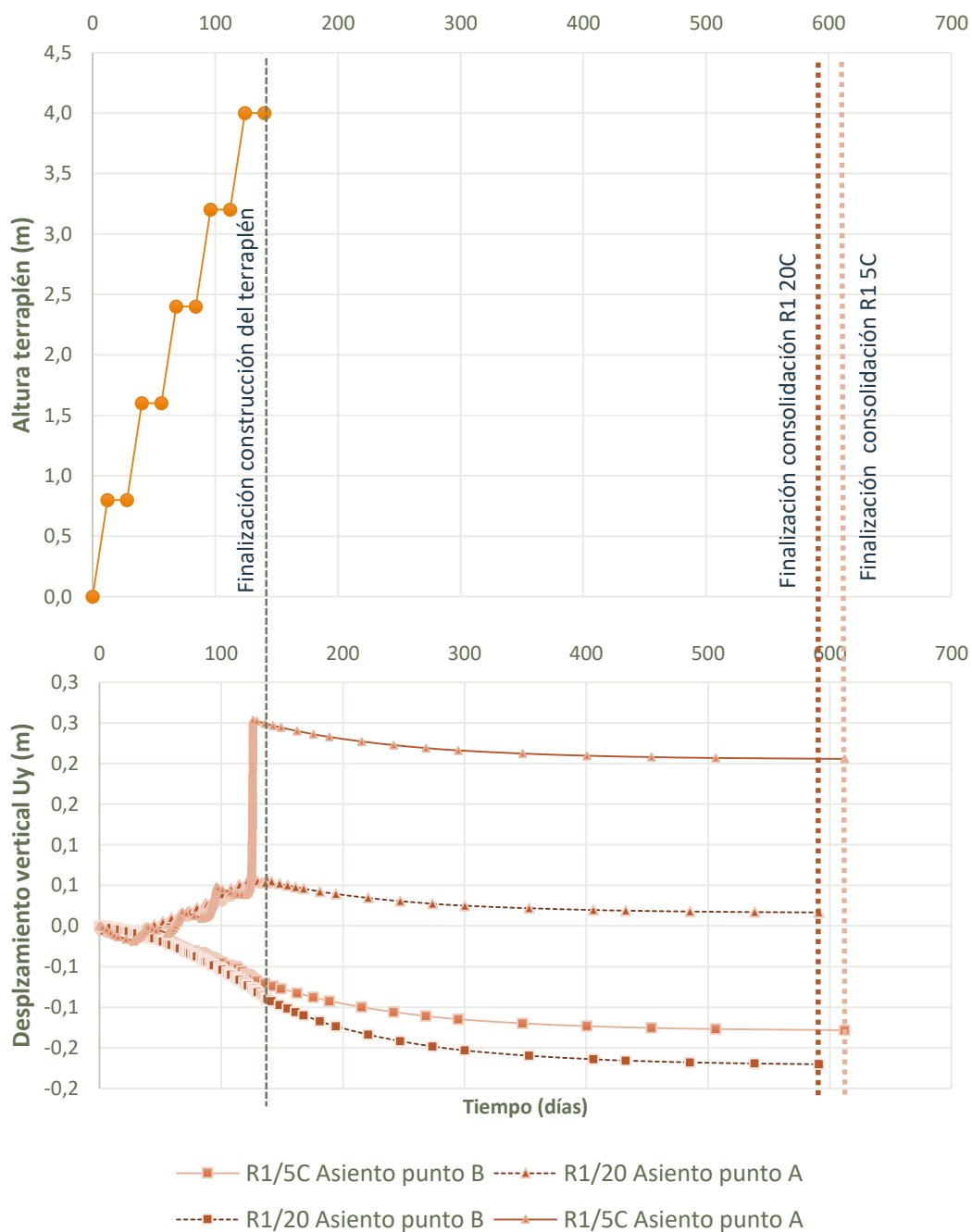


Figura 79. Diferencias en la consolidación del terraplén ejecutado en 5 capas y en 20 capas (R1)

Si se considera la construcción del terraplén en 20 capas, las fases 7, 15, 23, 31 y 39 se refieren a la deformación desarrollada por la construcción del terraplén sin considerar drenaje. Mientras que las fases 8, 16, 24, 32 consideran las deformaciones del terraplén a los 4 días de ejecutar cada una de las capas de 0,20 m de espesor. La fase 40 considera la consolidación total del terraplén cuando las presiones intersticiales son menores a 1 kN/m², según indica la Tabla 80.

Tabla 80. Deformación de la malla en función del espesor de las capas que conforma el terraplén

H (m)	Deformación (5 capas) (0,8m espesor por capa)			Deformación (20 capas) (0,2m espesor por capa)		
	Fase	R1 (m)	Deformación (%)	Fase	R1 (m)	Deformación (%)
0,80	1	0,058	-	7	0,06	-
	2	0,066	12,12	8	0,062	3,23
1,60	3	0,144	54,17	15	0,144	59,94
	4	0,156	7,69	16	0,148	2,70
2,40	5	0,259	39,77	23	0,251	41,04
	6	0,275	5,82	24	0,255	1,57
3,20	7	0,455	39,56	31	0,407	37,35
	8	0,475	4,21	32	0,412	1,21
4,00	9	1,48	67,91	39	0,547	24,68
	10	1,6	7,50	40	0,665	17,74

La diferencia entre considerar la construcción del terraplén en capas de pequeño espesor y capas de mayor tamaño presenta una diferencia del 43,23% en la deformación de la malla al alcanzar la cota de coronación. No existe una diferencia significativa entre la deformación desarrollada durante la construcción de cada capa del terraplén y la consolidación parcial, ya que el tiempo de consolidación considerado no permite la disipación de las presiones intersticiales, generadas en la fase de construcción, como muestra la Tabla 80.

La deformación vertical a una profundidad de 3 m -Punto B- en función de los dos modelos analizados no presentan diferencias relevantes, salvo cuando el terraplén alcanza una altura de 4 m al ejecutarse en 5 capas, incrementándose el desplazamiento vertical un 84% según se observa en la Figura 80.

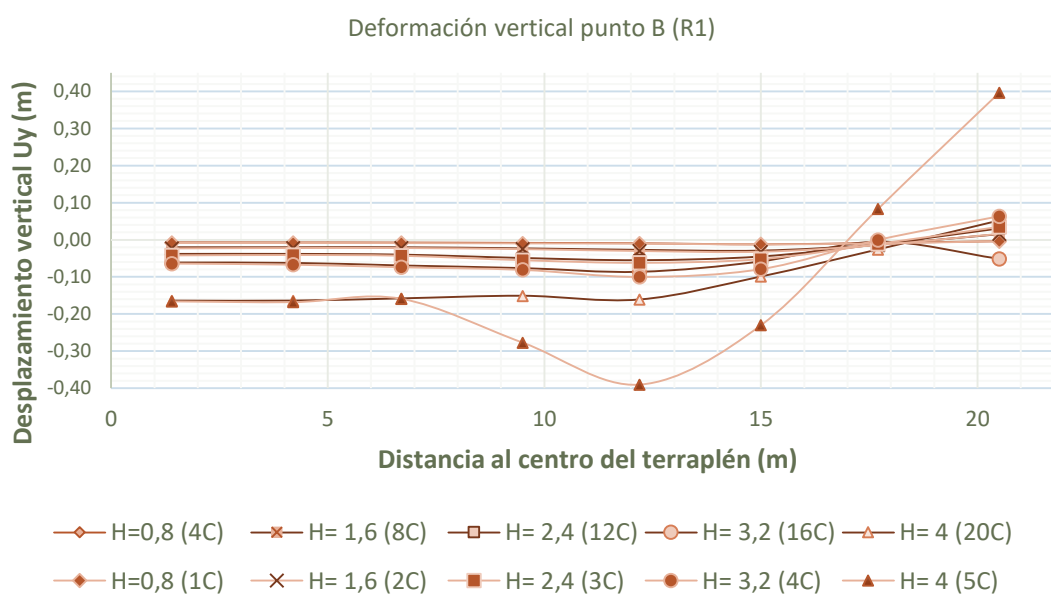


Figura 80. Diferencias en la deformación vertical en el Punto B en base a la altura del terraplén R1

Al considerarse la construcción del terraplén en capas de 0,20 m de espesor, las deformaciones se mantienen estables en la superficie de coronación, y no presentan desplazamientos bruscos como ocurre en el modelo ejecutado en 5 capas según se observa en la Figura 81 para la sección R1. El desplazamiento vertical en la coronación del terraplén a una altura de 4,00 m aumenta en dirección al espaldón, de forma que en el centro del terraplén es de -0,4m y en lado opuesto de -0,50m.

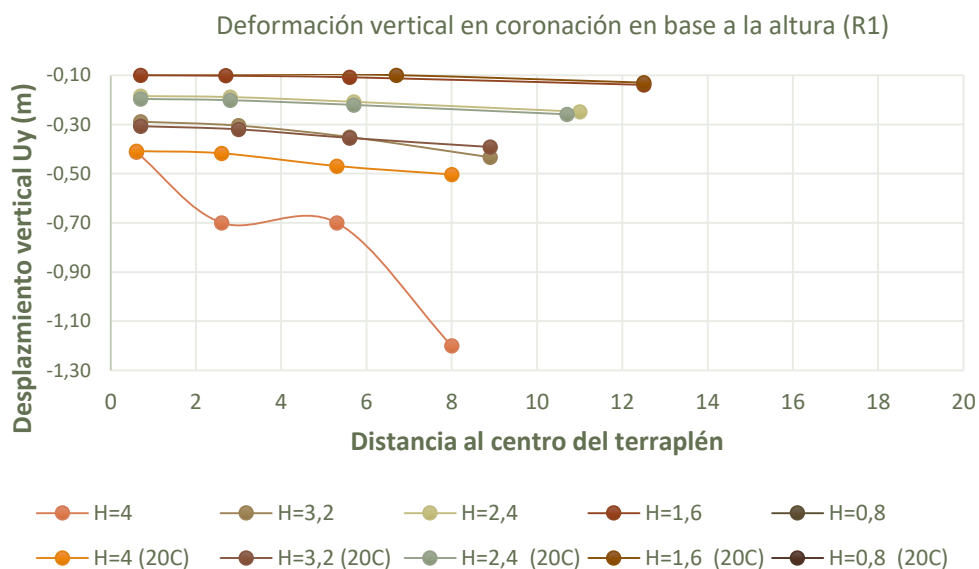


Figura 81. Deformación vertical en el terraplén R1 en 5 y 20 capas, a distintas alturas

En la Figura 82 se consideran los **desplazamientos verticales en el caso de que la construcción del terraplén sea en su totalidad de NFU**. Al igual que en el caso del terraplén ejecutado con arena, la sección en 5 capas presenta mayores desplazamientos verticales en la coronación del terraplén que la sección ejecutada en estratos de 0,20 m de espesor.

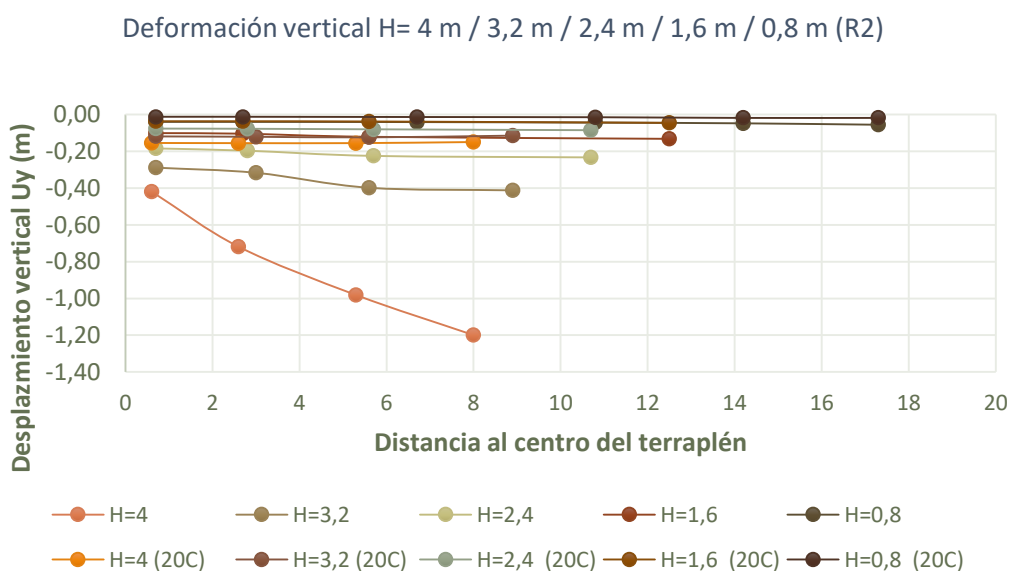


Figura 82. Deformación vertical en el terraplén R2 en 5 y 20 capas, a distintas alturas

Respecto al exceso de presión intersticial generado por la construcción del terraplén, en la Figura 83 se observa que, el exceso de presión intersticial se reduce en torno a un 8,20% a la finalización de la construcción en el caso de considerar capas de 0,20 m de espesor. El tiempo de consolidación total (1 kN/m²) se reduce igualmente un 3,45%.

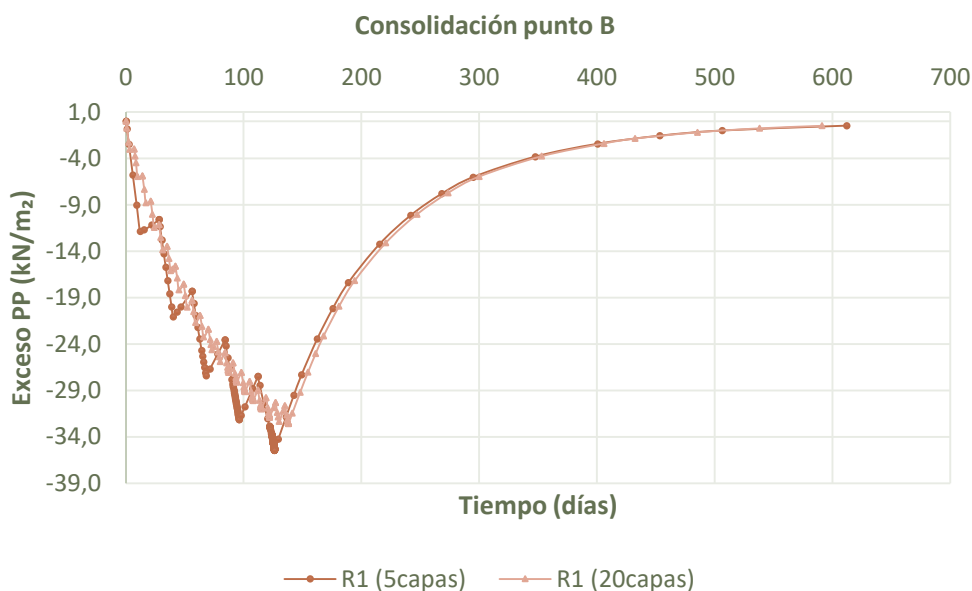


Figura 83 . Consolidación del terraplén en la sección R1 según modelo en 5 y 20 capas

En el caso de considerar la disipación del exceso de presión intersticial del terraplén en base a las dos hipótesis de construcción para la sección R1, el exceso de presión intersticial en las fases de consolidación, no supera los 2,25 kN/m² al suponer la construcción del terraplén en 20 estratos, mientras que suponiendo la ejecución en 5 estratos, se alcanzan valores de 9,11 kN/m², según se indica en la Tabla 81.

Tabla 81. Presión intersticial en función del espesor de las capas que conforma el terraplén R1

Exceso de presión intersticial (5 capas)				Exceso de presión intersticial (20 capas)		
<i>H (m)</i>	Fase	Punto B (Kn/m ²)	Dif. (%)	Fase	Punto B (Kn/m ²)	Dif. (%)
0.80	1	-11,93	-	7	-11,87	-
	2	-11,69	2,01	8	-11,82	0,42
1.60	3	-22,84	48,82	15	-22,51	47,49
	4	-21,60	5,43	16	-22,20	1,38
2.40	5	-32,04	32,58	23	-30,83	27,99
	6	-29,21	8,83	24	-30,25	1,88
3.20	7	-38,98	25,06	31	-37,30	18,90
	8	-35,43	9,11	32	-36,46	2,25
4.00	9	-44,01	19,50	39	-41,66	12,48
	10	-0,887	97,98	40	-0,935	97,76

Por último, se analizan los desplazamientos incrementales los cuales, son generados durante el cálculo “Phi-c-reduction”. Estos desplazamientos totales no tienen un significado físico, pero representan la superficie de deslizamiento crítica o de falla, según se aprecia en la Figura 84 y en la Figura 85. Además, se obtiene el

Factor de Seguridad considerando la aplicación de una sobrecarga actuando sobre la coronación del terraplén de 6,13 kN/m².

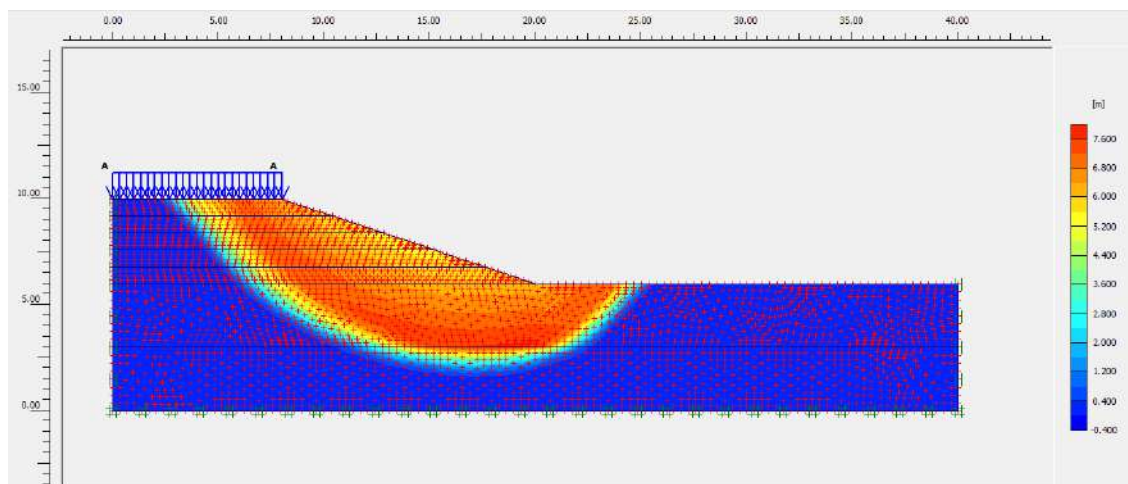


Figura 84. Desplazamiento incremental R1 (5 capas) fase 11 considerando S.C. (6,13 kN/m²)

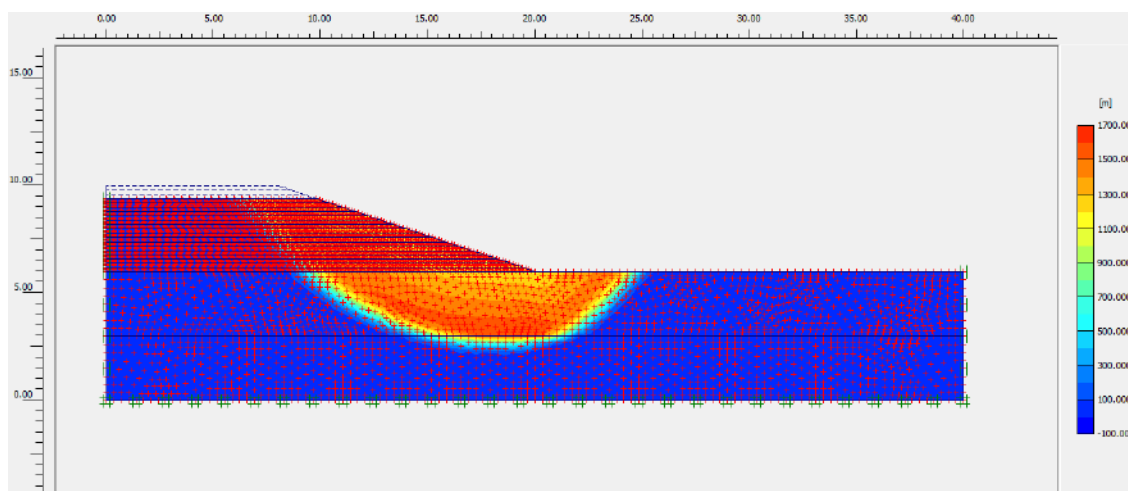


Figura 85. Desplazamiento incremental R1 (20 capas) fase 40

Se puede observar que para todas las curvas se obtiene un valor más o menos constante para el factor de seguridad, según la Tabla 82.

Tabla 82. F.S. global en función del espesor de las capas que conforma el terraplén R1

Sección	R1-5C		R1-20C		DIF. (%)
	Fase	F.S.	Fase	F.S.	
<i>H (m)</i>					
4	9	1,00	39	1,02	1,96
	10	1,38	40	1,38	0
<i>SC = 6,13 kN/m</i>	11	1,27	41	1,26	0,78

Generalmente un valor de 1,5 para el factor de seguridad es aceptable para el diseño de terraplenes. La diferencia entre los dos factores de seguridad obtenidos es menor al 2% considerando la consolidación del terraplén al completo para la última fase.

En base a los resultados obtenidos en el apartado anterior, según el número de capas considerado en el análisis del terraplén, se concluye que en el resto de secciones se contemplará el modelado del terraplén en

capas de 0,20 m de espesor, ya que existen diferencias en el exceso de presiones intersticiales en el punto B y las deformaciones verticales. Por lo tanto, el cálculo constará de la fase inicial y 40 fases constructivas que corresponden a un cálculo de tipo análisis de consolidación en capas de 0,20 m de espesor como máximo en los estratos de NFU y de espesor que puede oscilar entre los 0,10 m y 1 m para los estratos de arena.

En cada una de las secciones se emplearán las muestras de NFU S5 y S6 por separado, como análisis de sensibilidad que permita concluir las diferencias en los asentamientos producidos y el desarrollo de las presiones intersticiales; así como en el factor de seguridad final obtenido.

5.3.4.2 Sección R2 terraplén

En la sección R2 se contempla la construcción del terraplén sólo con NFU en capas de 0,20 m de espesor. Esta sección no podría ejecutarse según los parámetros geotécnicos obtenidos en el laboratorio y las prescripciones establecidas por CEDEX, pero sustentan el análisis que indican la viabilidad de este material en construcciones sobre terrenos con poca capacidad portante.

En el análisis de deformación de la malla para la sección R2, se determina que no influye de forma relevante considerar la muestra S5 o S6 de NFU, según se indica en la Tabla 83.

Tabla 83. Deformación de la malla según muestra S5 o S6 en el terraplén R2

H (m)	Sección R2-Muestra S5			Sección R2-Muestra S6	
	Fase	Deformación (m)	Incremento (%)	Deformación (m)	Incremento (%)
0,80	7	-0,023	-	-0,022	-
	8	-0,023	0,00	-0,023	4,35
1,60	15	-0,05	54,00	-0,049	53,06
	16	-0,052	3,85	-0,05	2,00
2,40	25	-0,09	42,22	-0,089	43,82
	26	-0,092	2,17	-0,091	2,20
3,20	33	-0,127	27,56	-0,126	27,78
	34	-0,129	1,55	-0,128	1,56
4,00	39	-0,158	18,35	-0,158	18,99
	40	-0,215	26,51	-0,212	25,47

La deformación vertical desarrollada en el pie del terraplén y el centro del mismo a una profundidad de -3 m, se indican en la Figura 86.

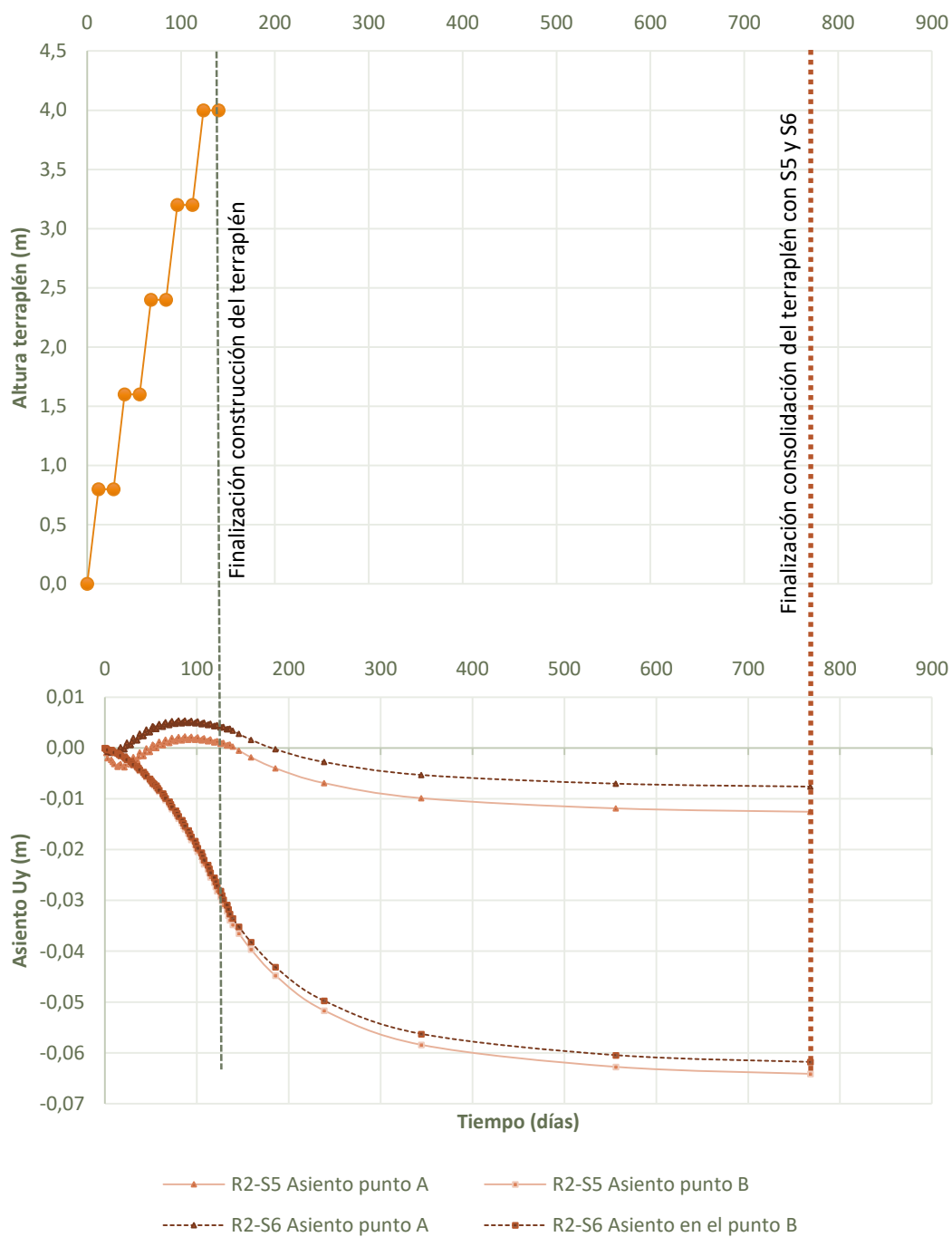


Figura 86 . Diferencias en la consolidación del terraplén ejecutado R2 con la muestra S5 y S6

Desde que se concluye la construcción del terraplén a los 136 días, el tiempo estimado para la consolidación del terreno alcanza los 767 días para la sección R2, por lo que se produce un incremento del 82,26% del tiempo. Los desplazamientos verticales en el punto B del estrato de cimentación no superan los 0,07 m.

Respecto al exceso de presión intersticial generado por la construcción del terraplén, en la Tabla 84 y en la Figura 87 se observa que para la sección R2, el incremento de presión intersticial en el caso de emplear las muestras de NFU S5 y S6, no constituyen variaciones relevantes.

Tabla 84. Exceso de presión intersticial durante la construcción del terraplén según sección R2

Altura H (m)	Sección R2-Muestra S5			Sección R2-Muestra S6	
	Fase	Exceso presión intersticial (kN/m ²)	Dif. (%)	Exceso presión intersticial (kN/m ²)	Dif. (%)
0,80	7	-4,38	-	-4,22	-
	8	-4,36	0,46	-4,20	0,47
1,60	15	-8,29	47,41	-7,99	47,43
	16	-8,18	1,33	-7,89	1,25
2,30	25	-12,10	32,40	-11,65	32,27
	26	-11,87	1,90	-11,43	1,89
3,30	33	-14,31	17,05	-13,75	16,87
	34	-14,00	2,17	-13,45	2,18
4,00	39	-15,44	9,33	-14,82	9,24
	40	-0,36	97,67	-0,349	97,65

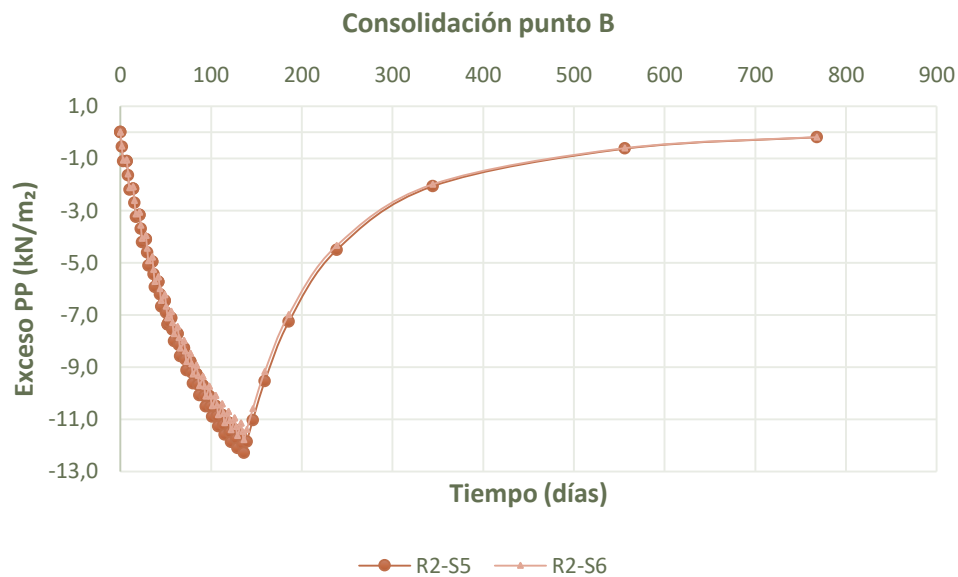


Figura 87. Consolidación del terraplén en la sección R2 según la muestra S5 y S6

Por último, se obtiene el factor de seguridad en las condiciones hasta ahora desarrolladas, y posteriormente, se obtiene el F.S. considerando la aplicación de una sobrecarga en la coronación del terraplén de 6,13 kN/m².

El máximo desplazamiento representado en la Figura 88 no es relevante, se representa la línea de deslizamiento del volumen de NFU.

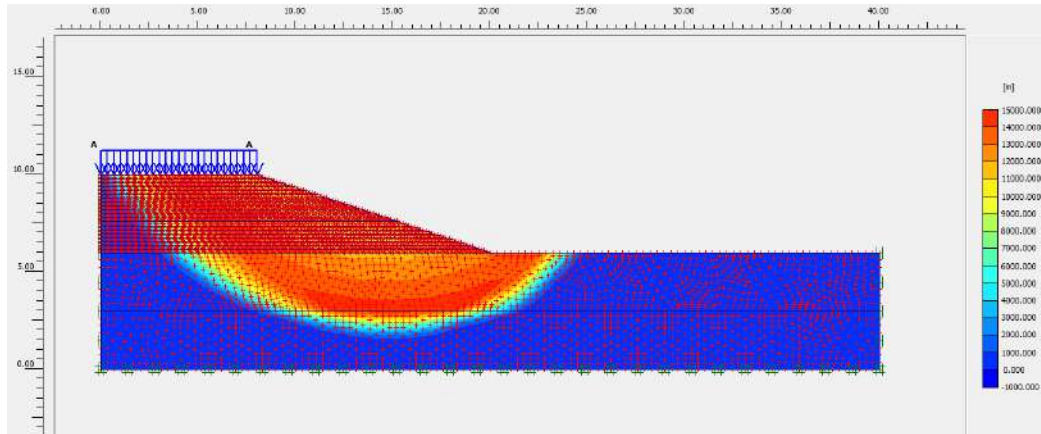


Figura 88. Desplazamiento incremental sección R2 según muestra S5 - Fase 41

Se puede observar según la Tabla 85, que para todas las curvas se obtiene un valor más o menos constante para el factor de seguridad.

Tabla 85. F.S. global en función del espesor de las capas que conforma el terraplén R2

Sección Muestra	Fase	R2-S5	R2-S6	DIF. (%)
<i>H (m)</i>		F.S.	F.S.	
4,00	39	2,04	2,19	6,84
	40	2,57	2,78	7,55
<i>SC = 6,13 kN/m²</i>	41	2,00	2,16	7,40

La diferencia entre los dos factores de seguridad obtenidos es inferior al 8% considerando la consolidación del terraplén al completo para la última fase.

5.3.4.3 Sección R3 terraplén

La sección R3 está constituida por un 69% de NFU, siendo el porcentaje restante material convencional tipo arena. En dicha sección, el análisis de la deformación de la malla determina que no influye de forma relevante considerar la muestra S5 o S6, según se indica en la Tabla 86.

Tabla 86. Deformación de la malla según la muestra S5 o S6 en el terraplén R3

Altura H (m)	Sección R3-Muestra S5			Sección R3-Muestra S6	
	Fase	Deform. (m)	Asiento (%)	Deform. (m)	Asiento (%)
0,80	7	-0,051	-	-0,052	-
	8	-0,053	3,41	-0,058	10,34
1,60	15	-0,081	34,49	-0,080	27,50
	16	-0,082	2,66	-0,082	2,44
2,30	25	-0,118	29,83	-0,117	29,91
	26	-0,120	1,67	-0,119	1,68
3,30	33	-0,155	22,58	-0,154	22,73
	34	-0,158	1,90	-0,157	1,91
4,00	39	-0,221	28,51	-0,224	29,91
	40	-0,318	30,50	-0,317	29,34

Los asientos desarrollados en el pie del terraplén (punto A) y el centro del terraplén (punto B) a una profundidad de -3 m, se indican en la Figura 89.

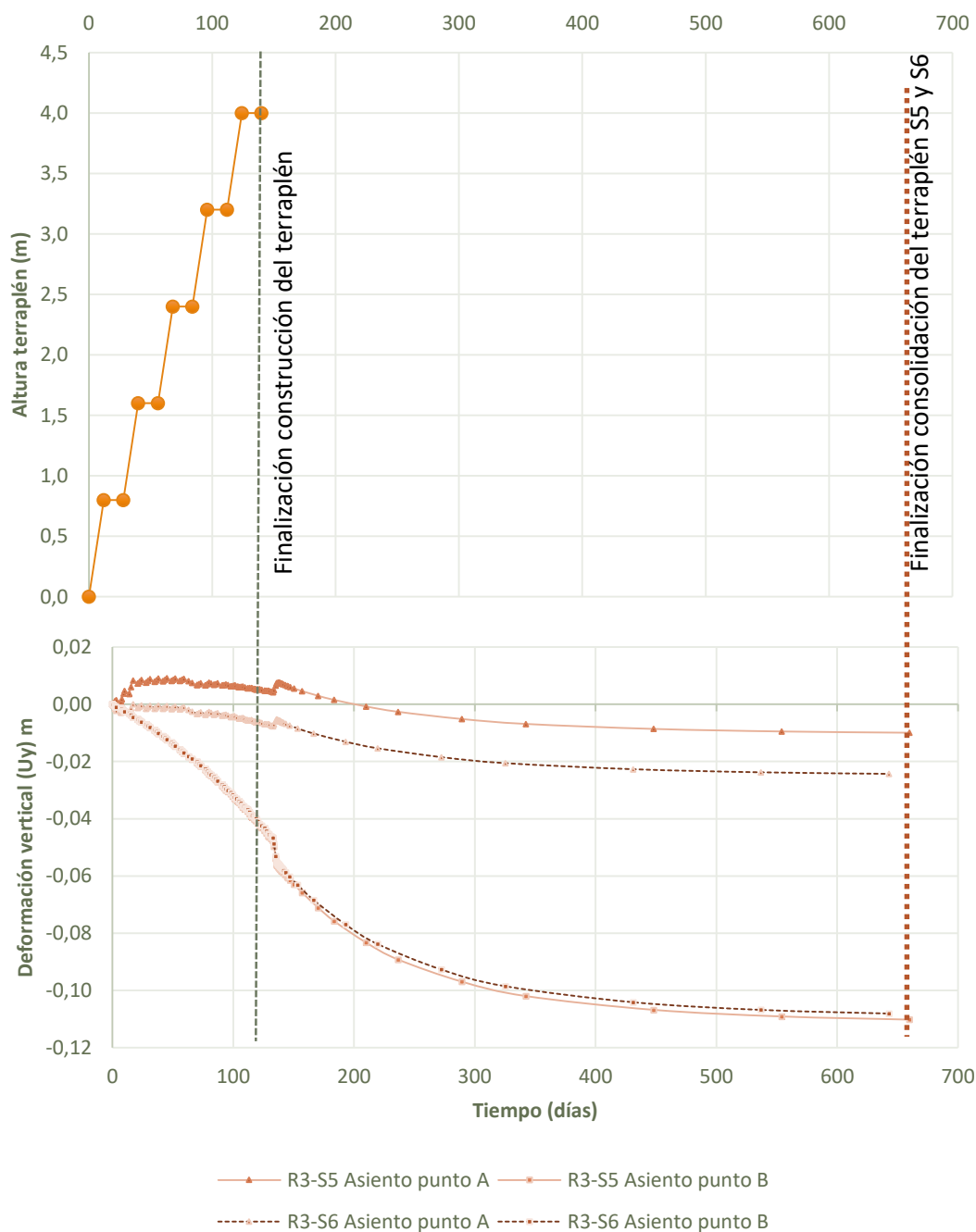


Figura 89. Diferencias en la consolidación del terraplén ejecutado R3 con la muestra S5 y S6

Una vez finaliza la construcción del terraplén a los 136 días, el tiempo necesario para que se produzca una presión intersticial menor a 1 kN/m² es de 642 días, es decir un 78,81% más de tiempo. Los asientos producidos en el punto B del estrato de cimentación alcanzan 0,11 m.

Respecto al exceso de presión intersticial generado por la construcción del terraplén, se observa que para la sección R3, el incremento de presión intersticial en el caso de emplear las muestras de NFU S5 y S6, no constituyen variaciones relevantes según la Tabla 87 y la Figura 90.

Tabla 87. Exceso de presión intersticial durante la construcción del terraplén según sección R3

Altura H (m)	Sección R3-Muestra S5			Sección R3-Muestra S6	
	Fase	Exceso presión intersticial (kN/m ²)	Dif. (%)	Exceso presión intersticial (kN/m ²)	Dif. (%)
0,80	7	-10,01	-	-9,91	-
	8	-9,95	0,60	-10,91	-10,09
1,60	15	-13,37	25,58	-13,18	17,22
	16	-13,13	1,80	-12,93	1,82
2,30	25	-15,37	14,57	-15,09	14,25
	26	-15,02	2,28	-14,74	2,32
3,30	33	-16,92	11,23	-16,51	10,72
	34	-16,52	2,36	-16,11	2,42
4,00	39	-23,23	28,89	-22,70	29,03
	40	-0,521	97,76	-0,606	97,33

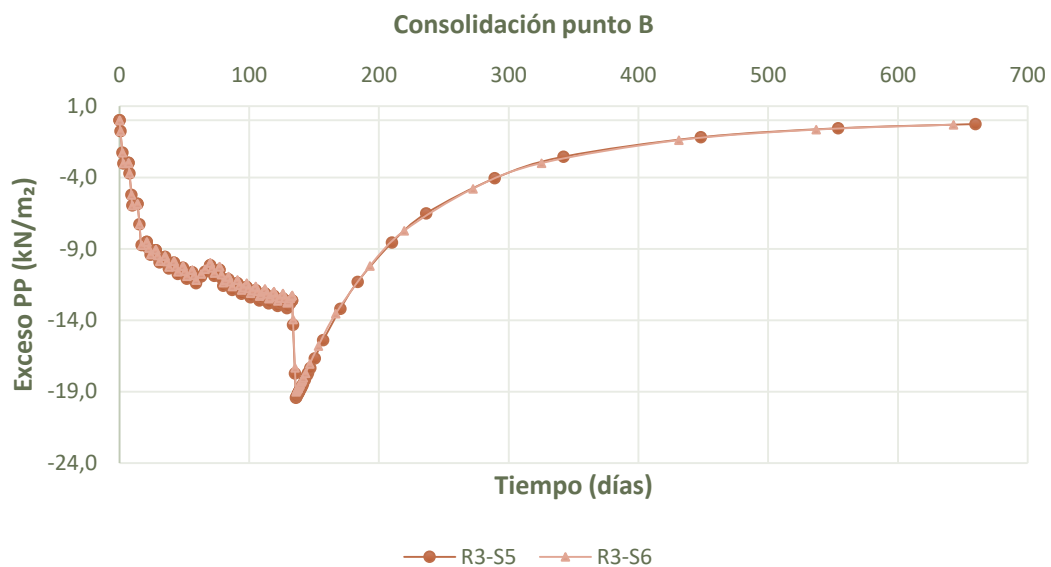


Figura 90. Consolidación del terraplén en la sección R3 según la muestra S5 y S6

En primer lugar se obtiene el factor de seguridad en las condiciones hasta ahora desarrolladas, y en segundo lugar, se obtiene el F.S. considerando la aplicación de una sobrecarga sobre la coronación del terraplén de 6,13 kN/m², la principal línea de rotura se presenta según la Figura 91.

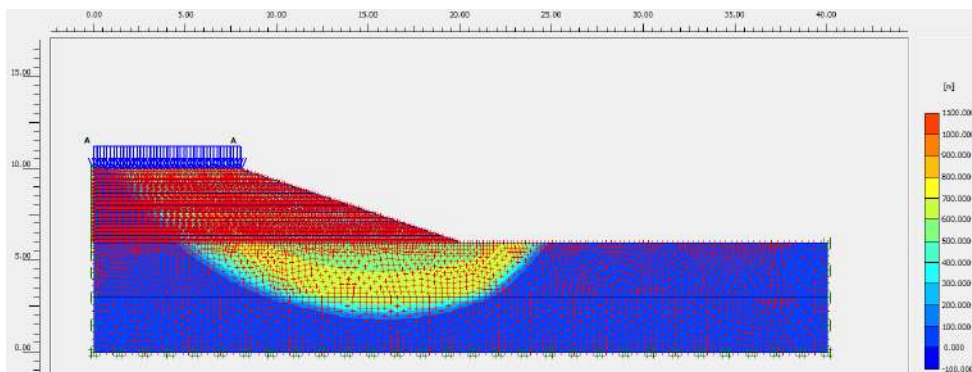


Figura 91. Desplazamiento incremental R3-S5 - Fase 41

Se puede observar que para ambas muestras presentan un valor más o menos constante para el factor de seguridad, según la Tabla 88.

Tabla 88. F.S. global en función del espesor de las capas que conforma el terraplén R3

Sección-Muestra	Fase	R3-S5	R3-S6	DIF. (%)
<i>Altura H (m)</i>		F.S.	F.S.	
4,00	39	1,56	1,61	3,10
	40	2,08	2,19	5,00
<i>SC = 6,13 kN/m²</i>	41	1,69	1,78	5,00

La diferencia entre los dos factores de seguridad obtenidos es menor o igual al 5% considerando la consolidación del terraplén al completo para la última fase.

5.3.4.4 Sección R4 terraplén

La sección R4 está constituida por un 47% por NFU, siendo el porcentaje restante material convencional tipo arena. El perfil se ha dividido en 19 capas, por lo que el tiempo final acumulado de ejecución se ha reducido a 129 días. El análisis de la deformación de la malla determina que no influye de forma relevante considerar la muestra S5 o S6, según se indica en la Tabla 89.

Tabla 89. Deformación de la malla según la muestra S5 o S6 en el terraplén R4

Altura H (m)	Sección R4-Muestra S5			Sección R4-Muestra S6	
	Fase	Deform. (m)	Asiento (%)	Deform. (m)	Asiento (%)
1,00	9	-0,078	-	-0,078	-
	10	-0,081	3,70	-0,081	3,70
2,00	19	-0,120	32,50	-0,119	31,93
	20	-0,123	2,44	-0,122	2,46
2,50	23	-0,168	26,79	-0,168	27,38
	24	-0,173	2,89	-0,172	2,33
3,50	33	-0,222	22,07	-0,222	22,52
	34	-0,226	1,77	-0,225	1,33
4,00	37	-0,274	17,52	-0,276	18,48
	38	-0,382	28,27	-0,383	27,94

Las deformaciones verticales desarrolladas en el pie del terraplén y el centro del terraplén a una profundidad de -3 m, se indican en la Figura 92.

Finalizada la construcción del terraplén a los 129 días, el tiempo necesario para que se produzca la consolidación con la muestra S6 es de 667 días, es decir un 80,65% más de tiempo. En el caso de la muestra S5 la consolidación finaliza a los 612 días. Los desplazamientos producidos en el punto B del estrato de cimentación alcanzan los 0,11 m aproximadamente.

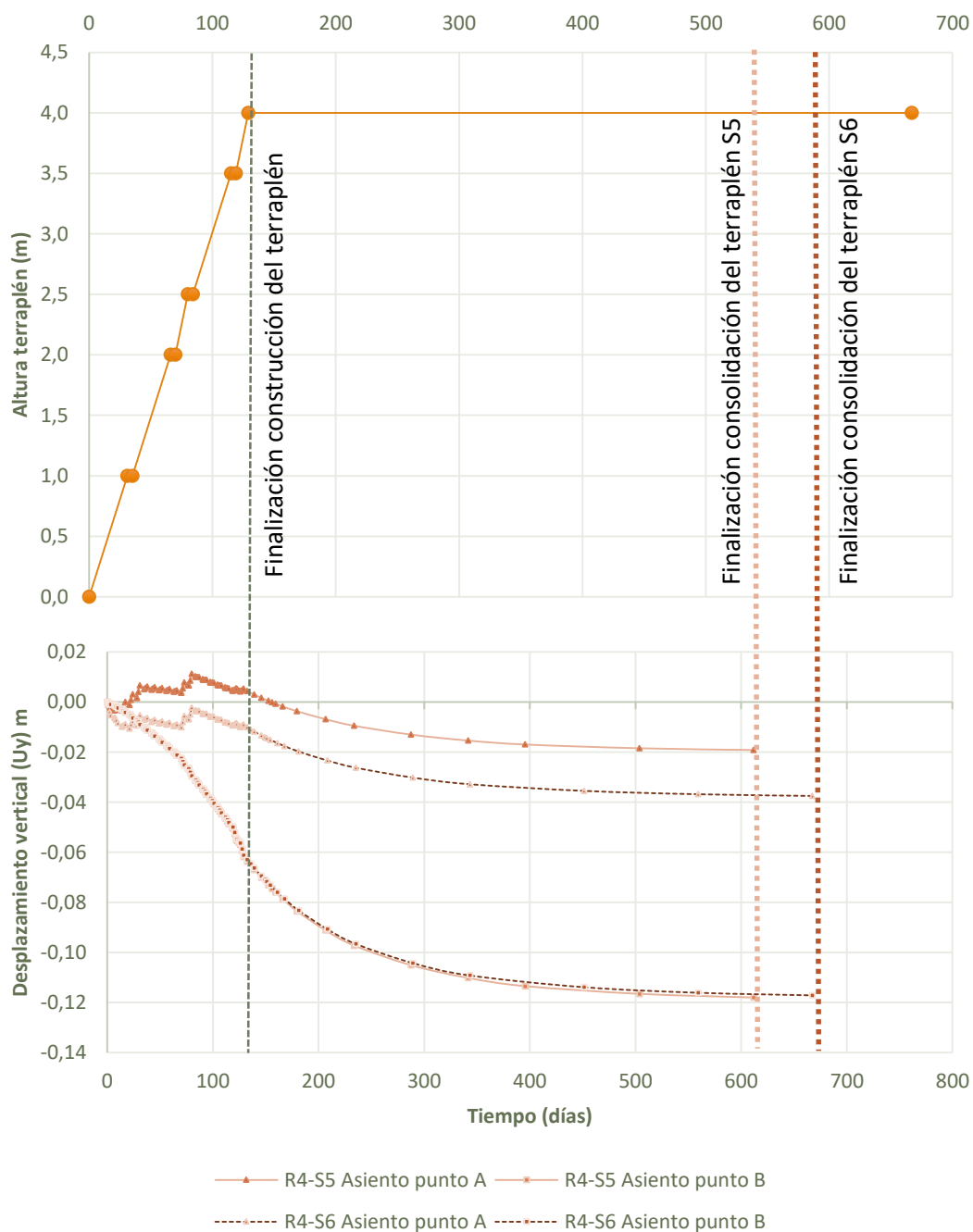


Figura 92. Diferencias en la consolidación del terraplén R4 con la muestra S5 y S6

Respecto al exceso de presión intersticial generado por la construcción del terraplén, en la Figura 93 y en la Tabla 90 se observa que para la sección R4, el incremento de presión intersticial en el caso de emplear las muestras de NFU S5 y S6, no hay variaciones relevantes.

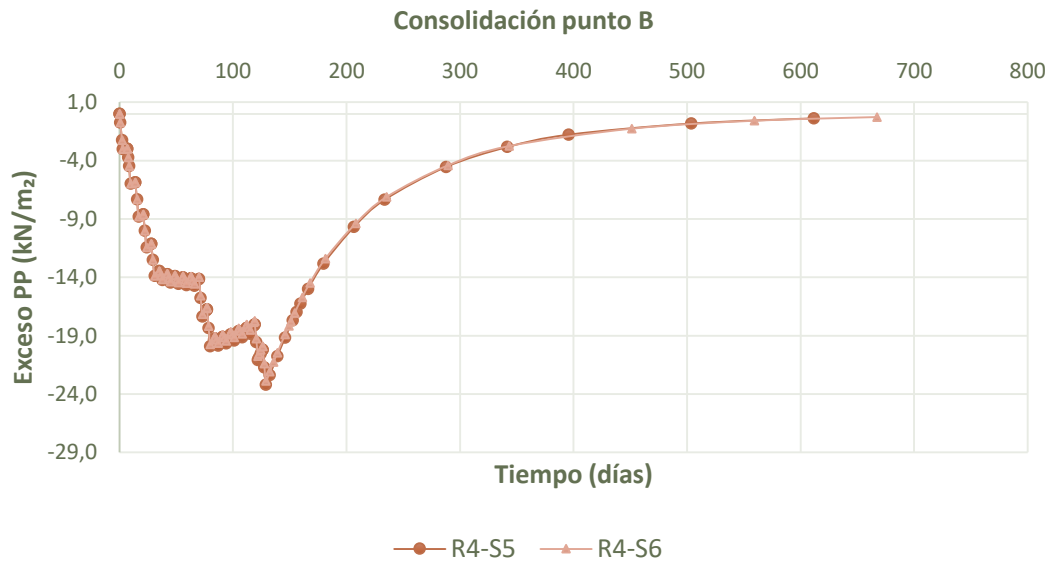


Figura 93. Consolidación del terraplén en la sección R4 según la muestra S5 y S6

Tabla 90. Exceso de presión intersticial durante la construcción del terraplén según sección R4

Altura H (m)	Sección R4-Muestra S5			Sección R4-Muestra S6	
	Fase	Exceso presión intersticial (kN/m ²)	Dif. (%)	Exceso presión intersticial (kN/m ²)	Dif. (%)
1,00	9	-14,71	-	-14,71	-
	10	-14,61	0,68	-14,61	0,68
2,00	19	-18,01	18,88	-17,82	18,01
	20	-17,63	2,11	-17,44	2,13
2,50	23	-23,67	25,52	-23,47	25,69
	24	-23,26	1,73	-23,06	1,75
3,50	33	-24,36	4,52	-23,99	3,88
	34	-23,75	2,50	-23,38	2,54
4,00	37	-28,72	17,31	-28,32	17,44
	38	-0,742	97,42	-0,503	98,22

Se obtiene el factor de seguridad en las condiciones hasta ahora desarrolladas, y posteriormente, se obtiene el F.S. considerando la aplicación de una sobrecarga sobre la coronación del terraplén de 6,13 kN/m², la principal falla de deslizamiento se aprecia en la Figura 94.

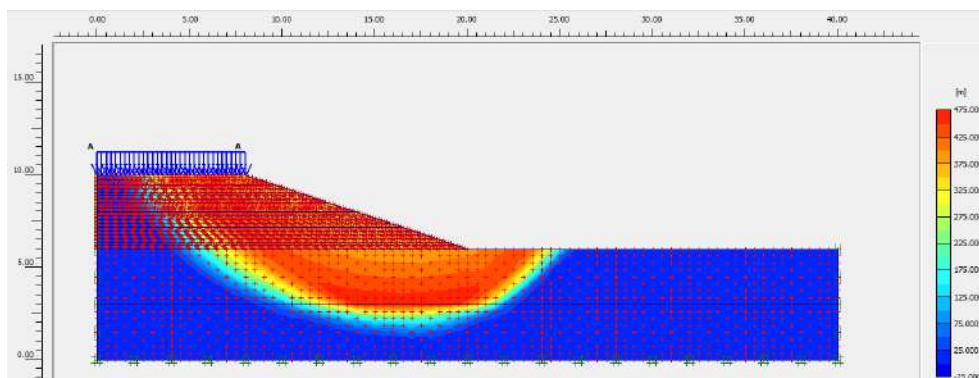


Figura 94. Desplazamiento incremental sección R4 muestra S6 - Fase 39

Se puede observar que para ambas muestras de NFU, se obtiene un valor más o menos constante para el factor de seguridad, según la Tabla 91.

Tabla 91. F.S. global en función del espesor de las capas que conforma el terraplén R4

Sección-Muestra	Fase	R4-S5	R4-S6	DIF. (%)
<i>H (m)</i>		F.S.	F.S.	
4,00	37	1,35	1,38	2,17
	38	1,80	1,85	2,70
<i>SC = 6,13 kN/m²</i>	39	1,55	1,59	2,50

La diferencia entre los dos factores de seguridad obtenidos es menor al 3% considerando la consolidación del terraplén al completo para la última fase.

5.3.4.5 Sección R5 terraplén

Por último, la sección R5 contiene un 44% de NFU y el porcentaje restante, al igual que en las secciones anteriores, está constituido por arena. El análisis de la deformación de la malla determina que no influye considerar la muestra S5 o S6, según se indica en la Tabla 92.

Tabla 92. Deformación de la malla según la muestra S5 o S6 en el terraplén R5

Altura H (m)	Sección R5-Muestra S5			Sección R5-Muestra S6	
	Fase	Deform. (m)	Asiento (%)	Deform. (m)	Asiento (%)
0,80	7	-0,0608	-	-0,060	-
	8	-0,0628	3,18	-0,062	3,23
1,60	15	-0,12	47,67	-0,120	48,33
	16	-0,123	2,44	-0,123	2,44
2,40	23	-0,167	26,35	-0,167	26,35
	24	-0,17	1,76	-0,169	1,18
3,20	31	-0,204	16,67	-0,205	17,56
	32	-0,28	27,14	-0,208	1,44
4,00	39	-0,269	-4,09	-0,272	23,53
	40	-0,381	29,40	-0,381	28,61

Los asientos desarrollados en el pie del terraplén y el centro del terraplén a una profundidad de -3 m, se indican en la Figura 95.

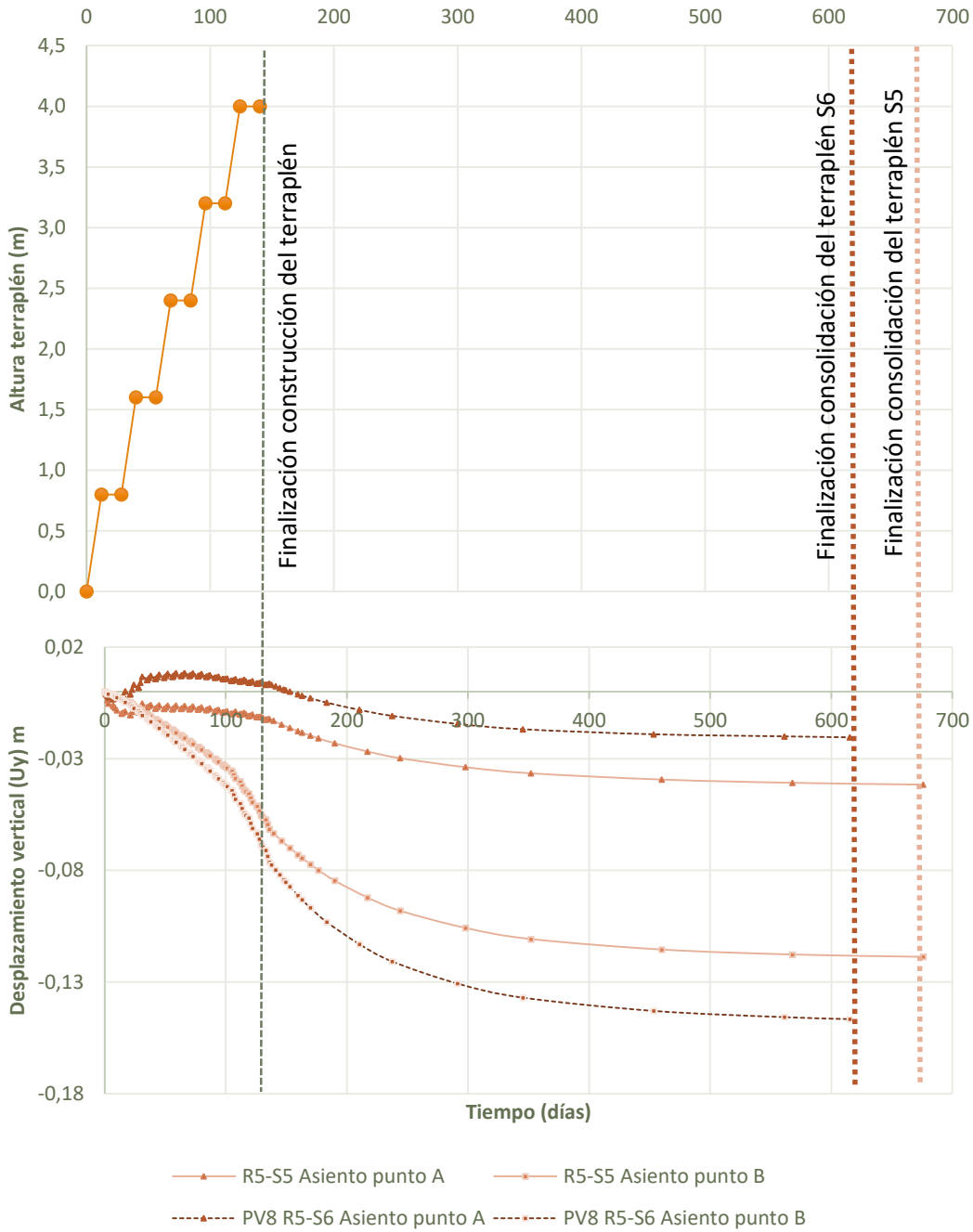


Figura 95. Diferencias en la consolidación del terraplén R5 con la muestra S5 y S6

Una vez finaliza la construcción del terraplén a los 136 días, el tiempo necesario para que se produzca la consolidación oscila entre 675 y 615 días, para la muestra S5 y S6 respectivamente, es decir un 79% de media para que el exceso de presión intersticial no supere 1 kN/m². Los desplazamientos verticales producidos en el punto B del estrato de cimentación alcanzan los 0,14 m.

Respecto al exceso de presión intersticial generado por la construcción del terraplén, en la Figura 96 y en la Tabla 93 se observa que para la sección R5, el incremento de presión intersticial en el caso de emplear las

muestras de NFU S5 y S6, no constituye variaciones relevantes salvo en el último estrato que se incluye la capa de arena superior.

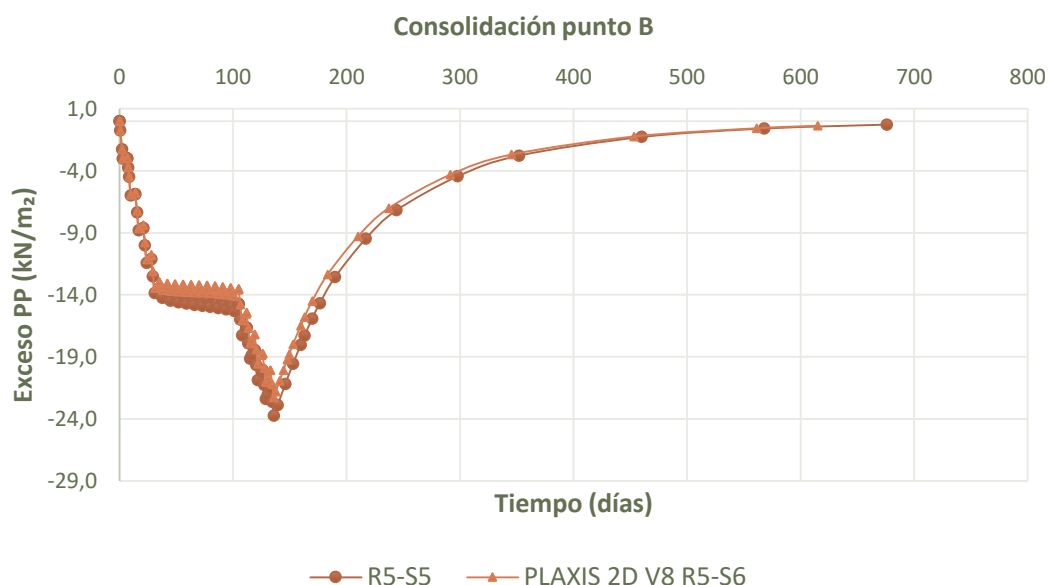


Figura 96. Consolidación del terraplén en la sección R5 según la muestra S5 y S6.

Tabla 93. Exceso de presión intersticial durante la construcción del terraplén según sección R5

Altura H (m)	Sección R5-Muestra S5			Sección R5-Muestra S6	
	Fase	Exceso presión intersticial (kN/m ²)	Dif. (%)	Exceso presión intersticial (kN/m ²)	Dif. (%)
0,80	7	-11,89	-	-11,89	-
	8	-11,82	0,59	-11,82	0,59
1,60	15	-17,08	30,38	-16,96	30,31
	16	-16,79	1,70	-16,68	1,65
2,40	23	-18,91	11,21	-18,66	10,61
	24	-18,48	2,27	-18,23	2,30
3,20	31	-21,74	15,00	-21,38	14,73
	32	-21,25	2,25	-20,90	2,25
4,00	39	-28,79	26,19	-28,42	24,46
	40	-0,53	98,16	-0,764	97,31

Por último se obtiene el factor de seguridad en las condiciones hasta ahora desarrolladas, y en segundo lugar, considerando la aplicación de una sobrecarga de 6,13 kN/m². La línea de falla es similar a las obtenidas en las secciones anteriores para las distintas muestras de NFU, según se observa en la Figura 97.

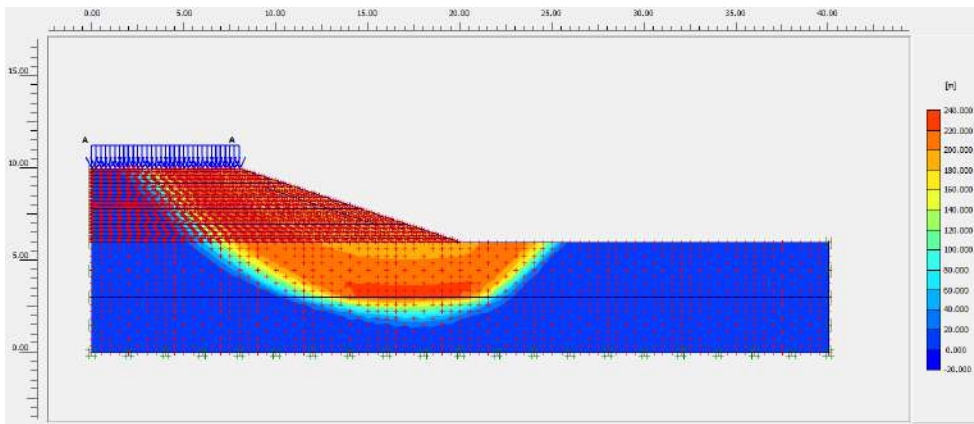


Figura 97. Desplazamiento incremental sección R5-S6 - Fase 41

Para todas las curvas se obtiene un valor más o menos constante para el factor de seguridad, según se observa en la Tabla 94.

Tabla 94. F.S. global en función del espesor de las capas que conforma el terraplén R5

Sección-Muestra	<i>Fase</i>	<i>R5-S5</i>	<i>R5-S6</i>	<i>DIF. (%)</i>
<i>H (m)</i>		F.S.	F.S.	
4,00	39	1,35	1,38	2,17
	40	1,77	1,83	3,27
<i>SC = 6,13 kN/m</i>	41	1,54	1,59	3,14

La diferencia entre los dos factores de seguridad obtenidos es menor al 4% considerando la consolidación del terraplén al completo para la última fase.

5.3.5 Comportamiento térmico del terraplén R5-S6

La granulometría analizada no presenta filamentos de acero expuesto, por lo que no es necesario calcular el calor generado por la oxidación de este material. De esta forma, el riesgo por autocombustión se reduce, evitándose una generación de calor que puede prolongarse en el tiempo desde el primer año de puesta en obra hasta seis años después, dependiendo del diámetro del acero, según indican estudios realizados (Arroyo et al., 2011).

A partir de las propiedades térmicas del NFU, se comprueba el efecto que la temperatura exterior ejerce sobre las secciones del terraplén que contienen este granulado y la influencia de las capas de cubrición del núcleo de NFU. Para ello, se considera en una primera hipótesis que el material de coronación es arena y en una segunda hipótesis hormigón.

Las propiedades de los estratos del terreno base se suponen en condiciones drenadas, ya que en caso contrario, el cálculo no finaliza al suponer en el estrato superior del terraplén una losa de hormigón.

Podemos concluir que las propiedades térmicas del granulado de NFU se basan en la bibliografía analizada, como queda recogido en la Tabla 36, ya que no se han realizado pruebas de laboratorio que puedan fundamentar el análisis realizado. Las capas de material convencional se basan en valores usuales igualmente en la bibliografía disponible.

PLAXIS 2D V20 programa de elementos finitos, está desarrollado para resolver problemas de análisis térmico a través de herramientas como "Gradiente del terreno"; que permite simular el gradiente térmico del

terreno en base a una temperatura de referencia activando en las condiciones del modelo la opción “Flujo térmico”; la herramienta “Flujo térmico en estado estacionario” está basado en las condiciones de permeabilidad del terreno, puede considerarse como una situación donde el flujo térmico con el tiempo tiende al infinito; por último, “Empleo de las temperatura de la fase anterior” permite considerar en una fase de cálculo, las condiciones térmicas alcanzadas en una fase posterior.

Previo al tipo de cálculo se deben definir las condiciones de contorno del modelo. En el contorno de simetría no se permite ni el flujo de calor ni de fluidos, por lo que se definen como “Cerrado”, al igual que en el contorno derecho. Además, no se modifica la temperatura inicial en el relleno, ya que no se producen reacciones exotérmicas debido a la oxidación de filamentos de acero.

El contorno inferior del modelo se define como temperatura constante en el tiempo, de forma que pueda valorarse el gradiente térmico del terreno.

Las distintas fases que componen el cálculo se definen a continuación:

- En la fase inicial se considera un cálculo térmico de tipo “Gradiente del terreno”, sin considerar la construcción del terraplén, la temperatura en el límite inferior viene dada por la temperatura atmosférica media (15°C) incrementada por un gradiente geotérmico de 3°C/100m.
- En fase 1 se considera el tipo de cálculo térmico “Flujo térmico en estado estacionario” y en las condiciones de modelo se considera una temperatura contante en el tiempo de 15°C.
- En la fase 2 partiendo de la temperatura de la fase anterior, se aplica una oscilación de temperatura cíclica para simular las condiciones atmosféricas. Se genera una onda sinusoidal en un periodo de 1 año, lo que supone un pico de 30 grados en Julio y un promedio de 15 grados durante todo el año. La simulación comienza en el pico de temperatura del ciclo, que representa una sección del terraplén construida rápidamente durante la primavera y principios de verano. En contraste, en el análisis transitorio, el flujo de calor cambia con respecto al tiempo. Estas modificaciones son normalmente provocadas por un cambio en las condiciones de contorno con respecto al tiempo, que deben considerarse a partir del cálculo “Deformación del flujo completamente acoplado” que considera el análisis dependiente del tiempo de las deformaciones y presiones intersticiales (totales) del agua.

La sección R5 representa el modelo geométrico desarrollado para el análisis paramétrico descrito anteriormente, la simetría respecto al eje vertical se sigue empleando para reducir la extensión del modelo. Un estrato de NFU de 2 m de espesor constituye el núcleo del terraplén y se encuentra rodeado por una capa superior e inferior de 1 m de espesor de material convencional tipo arena y 0,50 m en el lateral (resultando en 1,50 m de espesor horizontal). Esta disposición es de acuerdo a la “Guía para el proyecto y ejecución de rellenos viarios con NFU troceados” para la dirección general del Ministerio de Fomento. La sección del terraplén se encuentra sobre un terreno de 6 m de profundidad.

En la fase inicial puede observarse la distribución de temperatura inicial, que es obtenida de la temperatura de referencia en el contorno inferior del terreno y el gradiente del terreno. Obteniéndose una temperatura de 42°C en la base del terreno y de 15 °C en la capa superficial, en consonancia con la temperatura exterior, según se observa en la Figura 98.

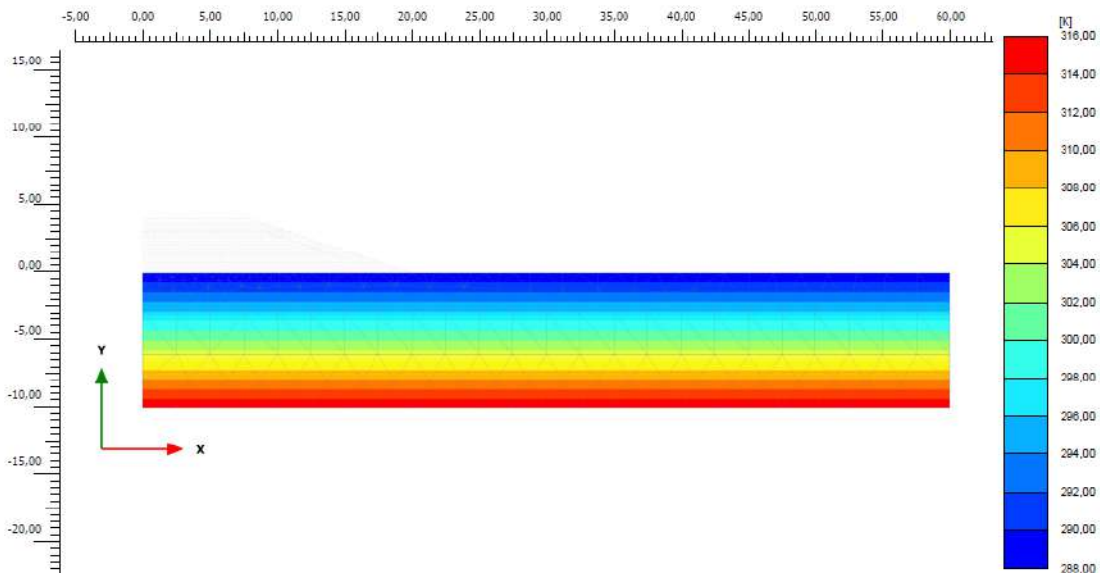


Figura 98. Distribución de la temperatura inicial en los sustratos de apoyo

En la fase 1 las temperaturas en las caras superior e inferior son iguales a las temperaturas obtenidas en la fase inicial; sin embargo, debido a que la temperatura en las caras superiores se ha definido en términos de condiciones climáticas (temperatura del aire), esta temperatura se aplica también en las caras del terraplén y afecta a la distribución de la temperatura en estas capas, según se observa en la Figura 99.

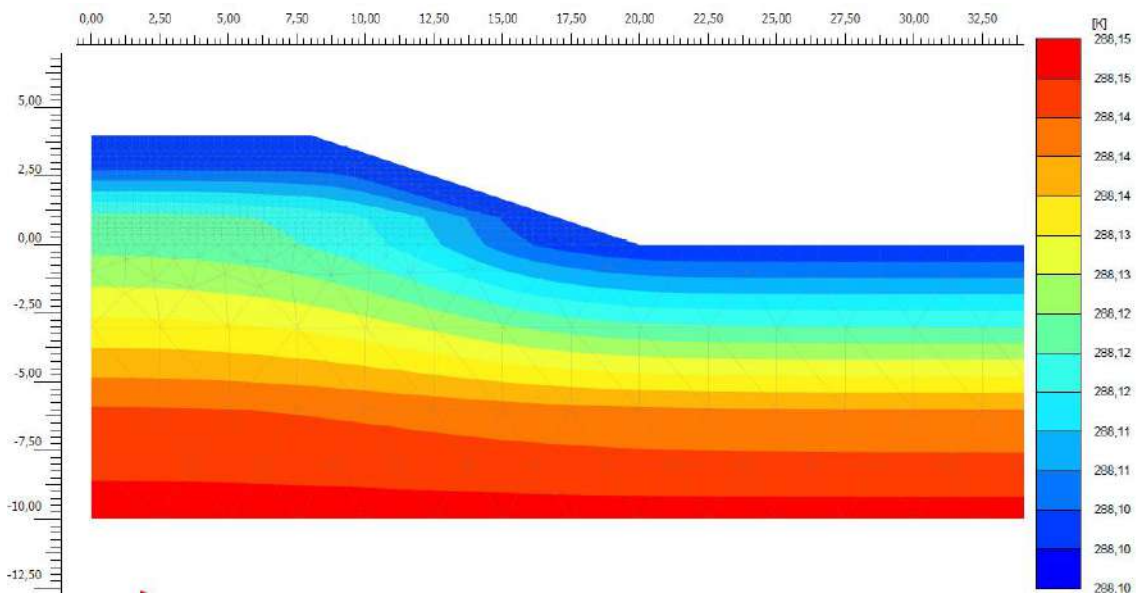


Figura 99. Distribución de la temperatura ambiente en el conjunto de la sección del terraplén R5

En la fase 2 se observa como la temperatura del aire aumenta 30°C. Se observa que las primeras capas en la coronación del terraplén compuesto por material convencional alcanza la temperatura exterior de 45°C hasta 1,20 m cuando se alcanzan los estratos superiores de NFU, según se observa en la Figura 100.

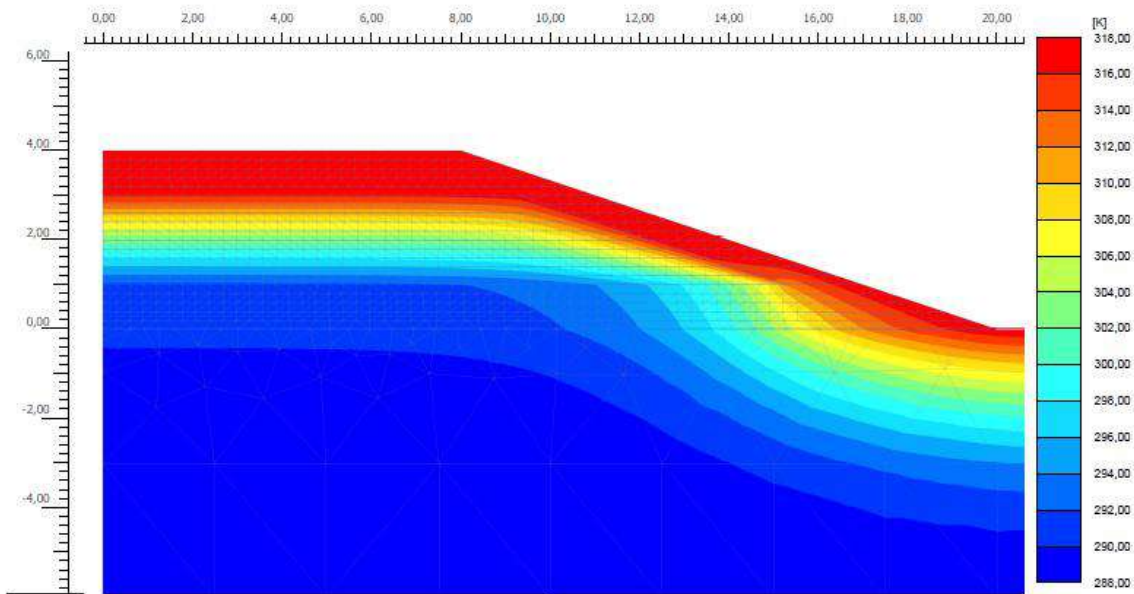


Figura 100. Oscilación térmica dependiente del tiempo en el conjunto de la sección del terraplén R5

Suponiendo que en la última capa de coronación del terraplén incluimos una capa de hormigón de 0,20 m de espesor, la diferencia de temperatura que se observa en un punto situado en la mitad del estrato de NFU próximo al eje de simetría (0,2 35), se indica en la Figura 101. Dicha diferencia de temperatura no supera el grado centígrado.

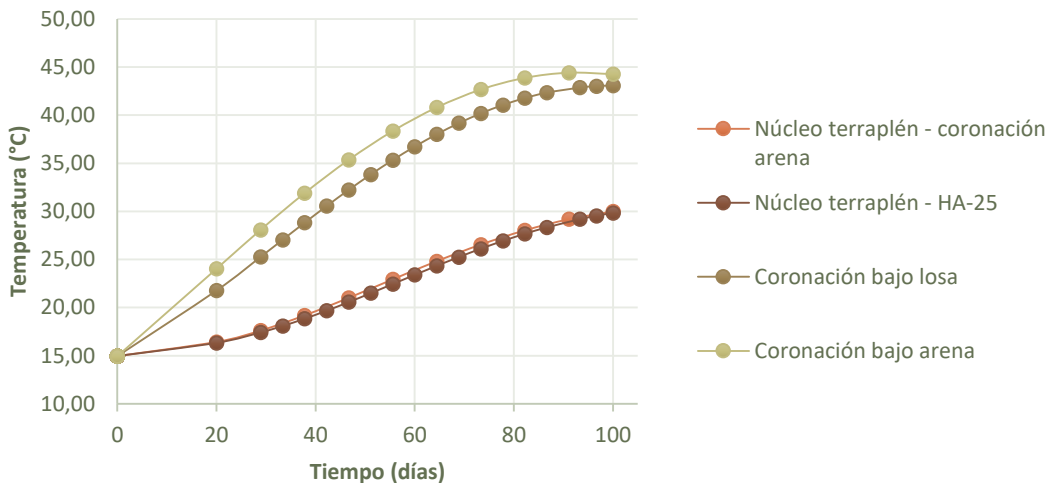


Figura 101. Distribución de la temperatura en el punto bajo la losa y en el centro del terraplén

Finalmente, se aprecia que los materiales tipo NFU sin contenido de acero expuesto pueden emplearse en capas con un espesor por encima de los 3 m, sin aumentar el riesgo de auto combustión, incluso en entorno muy corrosivos (Arroyo et al., 2011).

5.3.6 Análisis sección P.K. 0+040 Cerro O, Cármenes del Mar, Almuñecar

5.3.6.1 Introducción y antecedentes de la urbanización

La urbanización Cármenes del Mar se sitúa en Almuñecar (Granada), el marco geológico local corresponde con la vertiente oriental de la Punta del Cerro Gordo, en la ladera en declive hacia la bahía de la Herradura, se caracteriza por rasgos morfológicos dominados por importantes resaltes de masas de mármoles compactos y roca mecanizada a diferentes rangos de profundidad que indican que la zona está afectada por una serie de procesos de deslizamiento muy complejos. A esta situación se suma que dicho perfil fue modificado para la construcción de la urbanización del área residencial, que incluyó el escalonamiento de la ladera a partir de grandes volúmenes de relleno.

Los trabajos de urbanización y construcción de edificaciones en dicha ladera comenzaron hacia 1988. Los primeros movimientos se observaron antes de completarse la edificación, pero se aisló a problemas locales derivados de la escarpada topografía de la ladera. Dichos movimientos provocaron roturas de infraestructuras que incrementaron los daños sumados al deslizamiento de la ladera.

Los cálculos efectuados para el análisis de estabilidad del perfil geológico de la sección P.K. 0+040, cuya localización se marca en la Figura 102, se han realizado en primer lugar empleando el programa de elementos finitos PLAXIS 2D V8 y en segundo lugar PLAXIS 2D V20. Finalmente sólo se incluyen las figuras obtenidas en la versión 20 de dicho software.

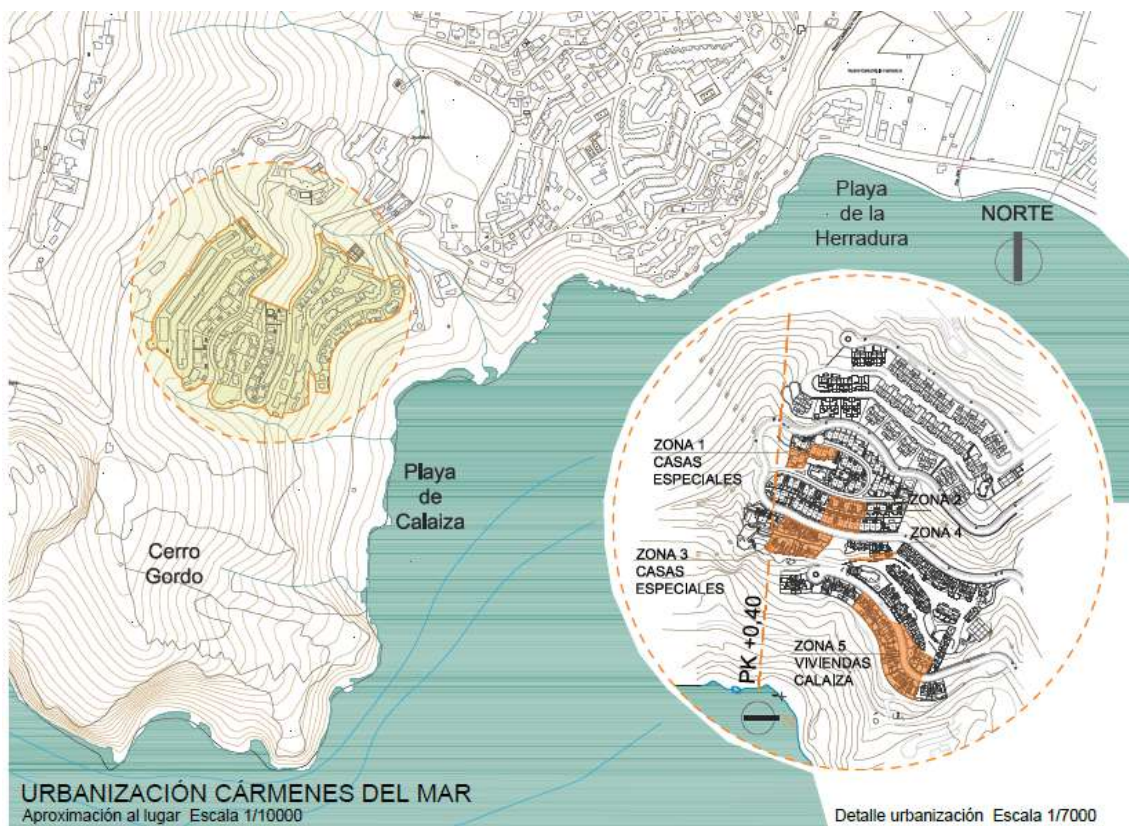


Figura 102. Aproximación a la Urbanización Cármenes del Mar, Almuñecar

5.3.6.2 Aspectos geológicos locales

La Figura 103 se corresponde con la sección geotécnica PK 0+040, la cual se encuentra en la zona sur de la ladera. Se han detectado una serie de procesos de inestabilidad, tipo deslizamientos a profundidades comprendidas entre los 30 y 40 m, según muestran las líneas de deslizamiento estudiadas (COMAREX, n.d.).

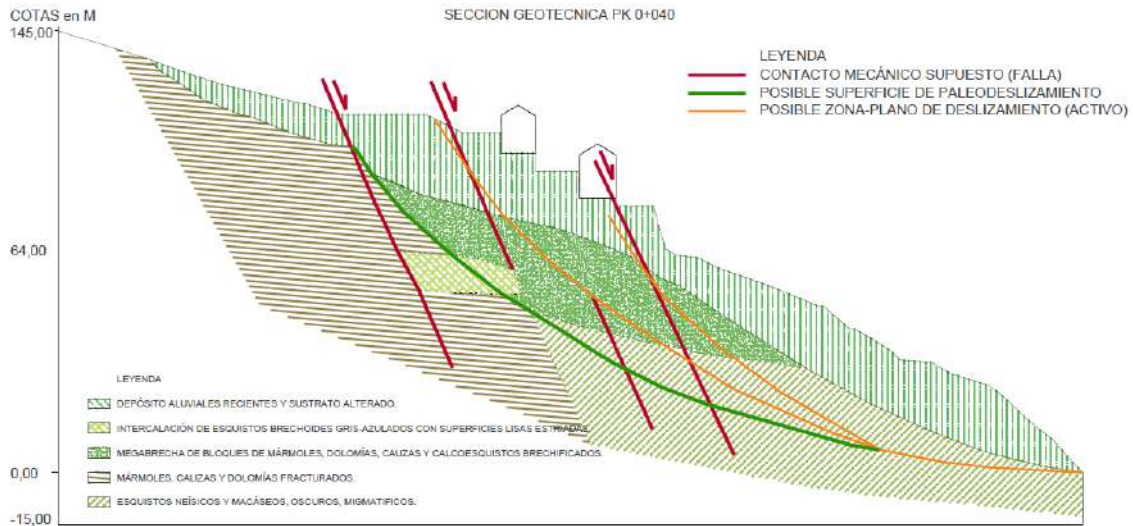


Figura 103. Perfil geológico correspondiente a la sección PK 0+040

Con el fin de obtener una superficie de rotura similar a la que se está produciendo en la ladera, se simplifica el modelo informático suponiendo sólo dos tipos de estratos, según muestra la Figura 104, cuyos parámetros geotécnicos se incluyen en los siguientes apartados ajustados según la información disponible sobre el proceso de inestabilidad de la ladera (COMAREX, n.d.).

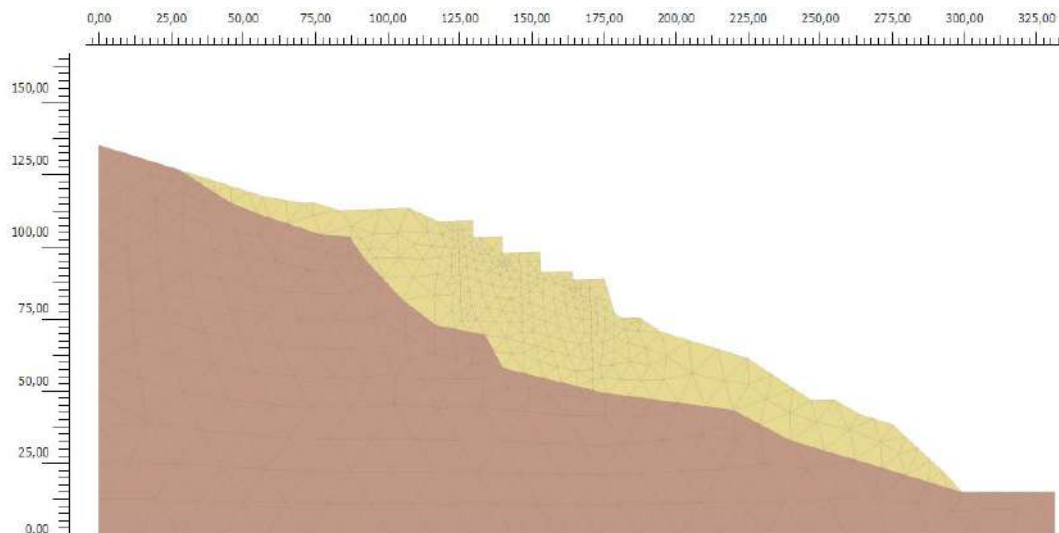


Figura 104. Perfil geológico simplificado a efectos de modelados de la sección PK 0+400

5.3.6.3 Argumentación de las hipótesis planteadas

Para argumentar las propuestas de mejora en la estabilidad del talud, se realiza un análisis ajustando parámetros geotécnicos hasta justificar que el coeficiente de seguridad de la ladera respecto a la rotura es

ligeramente superior a la unidad y suponiendo la posible superficie de rotura que se incluye en la Figura 105, obtenida en la fase de condiciones iniciales.

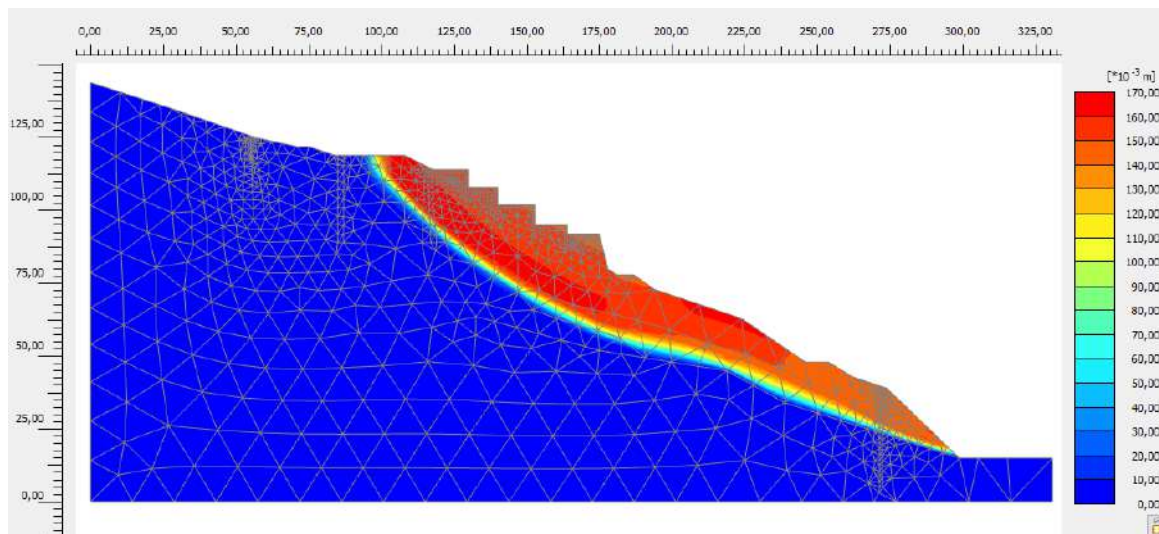


Figura 105. Desplazamientos incrementales en la fase inicial del terraplén

Los cálculos se han realizado empleándose el método de reducción progresiva de la cohesión y la tangente del ángulo de rozamiento. Los modelos generados consideran el efecto de la escala del conjunto en dos dimensiones, de ahí que se ajusten los valores característicos del terreno considerado. Además, estos modelos permiten conocer de forma aproximada la eficacia de las medidas de estabilización propuestas.

En el estado definitivo se cuenta con poder alcanzar un factor de seguridad superior a 1,25, el cual puede considerarse como suficiente en estos casos de deslizamientos de grandes dimensiones, aunque el factor de seguridad debería alcanzar un valor mínimo de 1,50. La implementación de las medidas que se han considerado permite mejorar levemente el factor de seguridad en aquellas hipótesis que plantean el uso de pilotes, en base a la geometría y parámetros geotécnicos considerados.

Como medida de refuerzo se propone la ejecución de filas de pilotes in situ dispuestos en los viales de la urbanización debido a la elevada profundidad del estrato sano, de forma que no interfieran en las viviendas existentes del conjunto residencial y conectado mediante un encepado.

La separación de los pilotes en cada una de las filas es de 2,5 m entre ejes, y la profundidad de los pilotes es escalonada en función de la ubicación del sustrato sano esperado y la superficie de deslizamiento propuesta, esperándose que el empotramiento sea al menos en ese estrato de cinco metros de profundidad, aunque según el perfil geotécnico modelado esta condición no se cumple finalmente.

Como medida complementaria, se consideró la sustitución de parte del relleno convencional bajo los viales por NFU en masas de 3 m de espesor, cubiertas por 1 m de material convencional tipo arena. De forma que la profundidad total de la excavación alcanzó los 4 m. Para el modelado de la capa de NFU no se consideraron capas de espesor inferior a 0,25 m, aunque es indispensable en caso de considerar la puesta en obra del material. Además, es necesario considerar el uso de geotextiles que rigidicen estas masas de granulado de NFU de forma que se mejore el módulo edométrico del conjunto, el cual fue modificado al alza para poder obtener resultados coherentes que mostrasen la situación de la ladera.

Por último en otra de las hipótesis, se propone la colocación de una berma en la base de la ladera y la sustitución del material de relleno en los viales de la urbanización de la misma forma que se planteó anteriormente; así como de la parte superior de la ladera, de forma que se reduzca el peso actual de los esquistos fracturados y se modifique la superficie de rotura existente.

En base a ello, las propuestas de mejora proyectadas pueden describirse como sigue:

a) **Hipótesis 1:** Se supuso la ejecución de siete filas de pilotes de distinto diámetro y profundidad, de forma que la sección de la ladera se encuentre completamente reforzada, según la Figura 106 y Figura 107 que se corresponde con la malla generada en PLAXIS 2D V20.

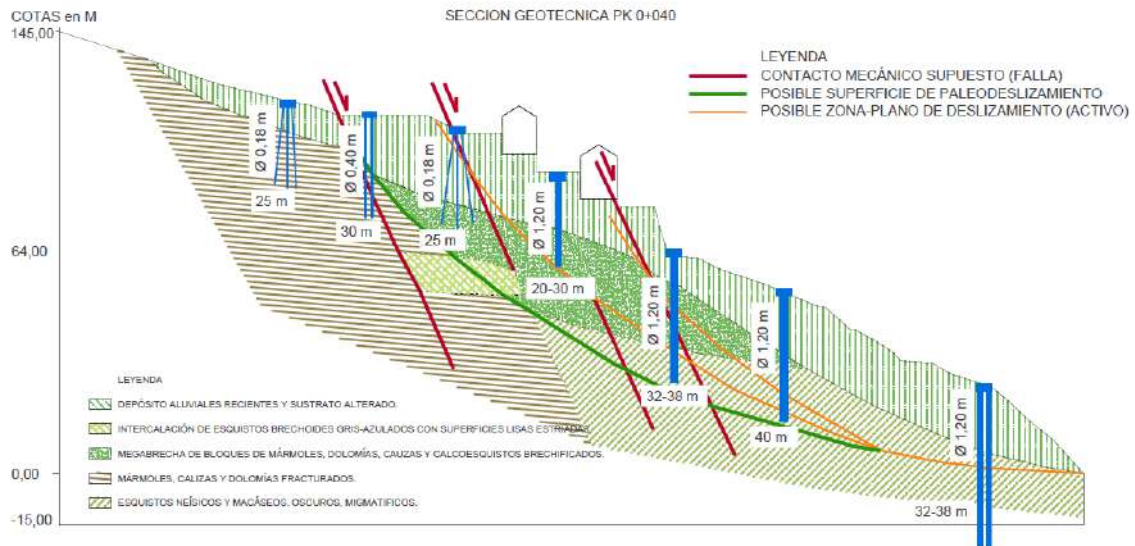


Figura 106. Perfil de actuaciones para las hipótesis de refuerzo en la sección PK 0+040

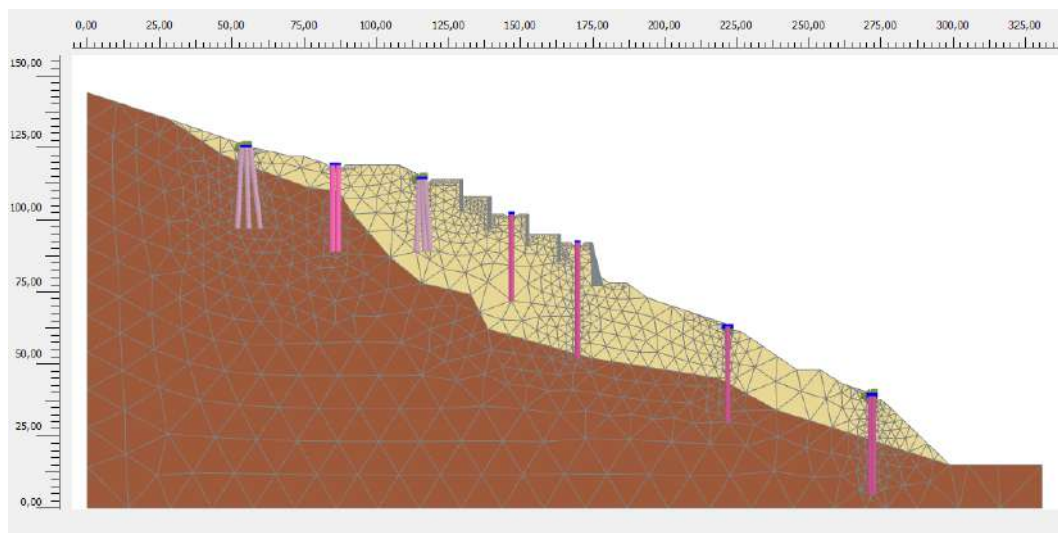


Figura 107. Mallado hipótesis 1 sistema de refuerzo mediante 7 filas de pilotes in situ en PK 0+040

b) **Hipótesis 2:** Se consideró la ejecución de cuatro filas de pilotes en la zona superior de la ladera y una última fila de pilotes junto a la playa de la Calaiza, suponiendo la misma geometría que en la hipótesis 1, según muestra la Figura 108.

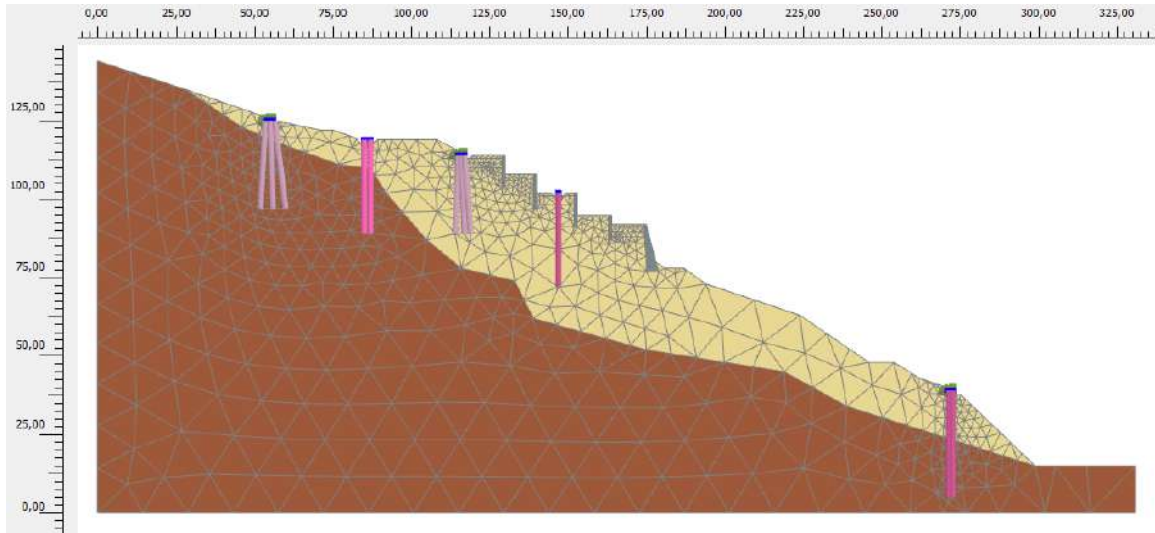


Figura 108. Mallado hipótesis 2: Sistema de refuerzo mediante 5 filas de pilotes en la sección PK 0+040

c) **Hipótesis 3:** Partiendo de la hipótesis 2, se considera la mejora resultado de suponer la sustitución del relleno de viales existente por NFU, según muestra la Figura 109 y la Figura 110.

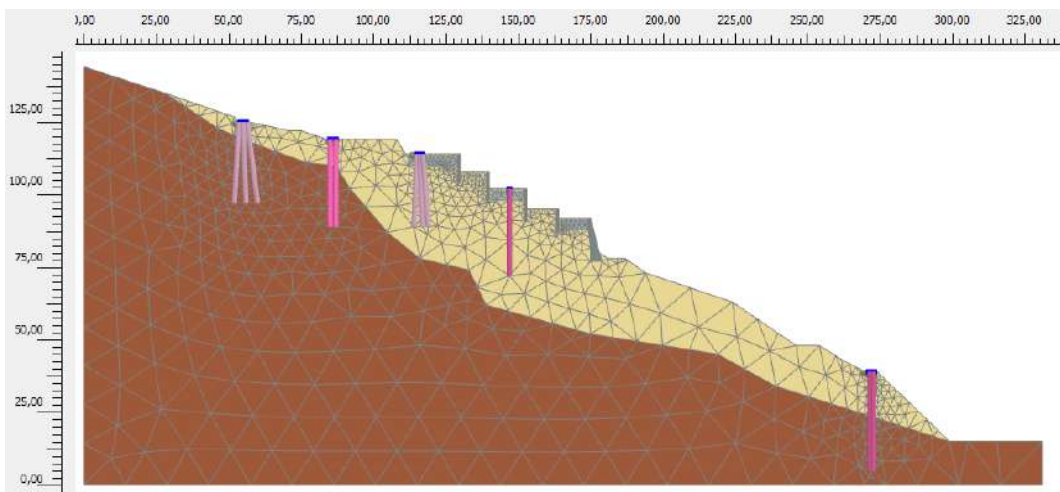


Figura 109. Mallado hipótesis 3: sistema de mejora del terreno en la sección PK 0+40

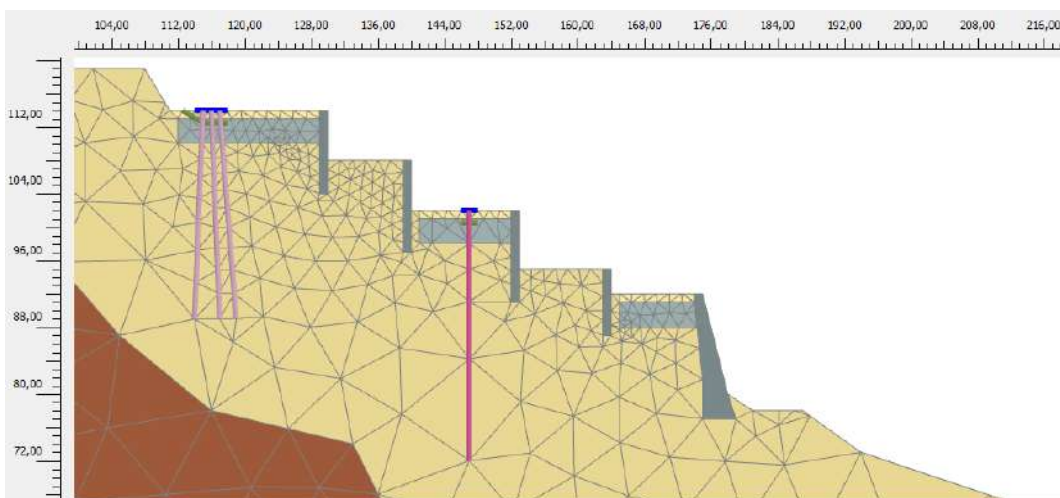


Figura 110. Mallado hipótesis 3: sustitución material relleno en viales por NFU en la sección PK 0+400

d) **Hipótesis 4:** Se modela una berma de 25 m de altura en la parte inferior de la ladera y además de sustituirse el relleno por granulado de NFU en los viales de la urbanización, se excava la zona superior de la ladera y se rellena mediante NFU para reducir el peso en esta zona de la con la intención de modificar la superficie de deslizamiento existente, como indica la Figura 111.

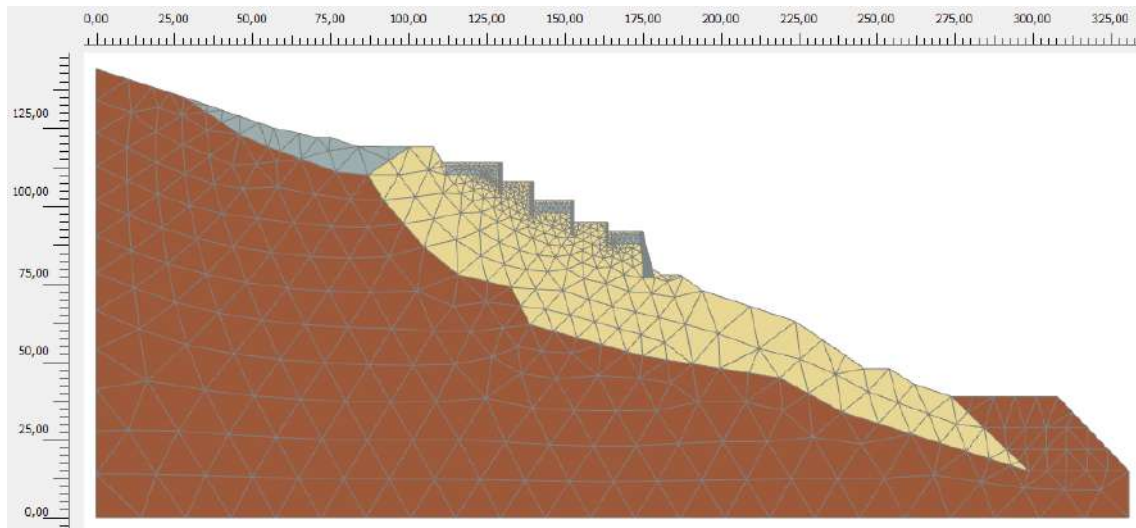


Figura 111. Mallado hipótesis 4: Sistema de mejora del terreno en la sección PK 0+0400

5.3.6.4 Condiciones de contorno y fases de cálculo ladera Urbanización Cármenes del Mar

La malla de cálculo tiene una longitud máxima de 350 m y una altura máxima de 145 m. El modelo está constituido por 7.768 nodos que han permitido definir 926 elementos.

Se definieron cada uno de los sólidos poligonales necesarios que constituyen la ladera y se obviaron las sobrecargas lineales que simulan las viviendas existentes, ya que a efectos de cálculo no presentan relevancia. Posteriormente se definió el mallado del modelo y por último, en las condiciones de flujo se supuso el nivel freático en el pie de la ladera y que el contorno inferior del modelo no permitía ningún flujo.

Como se ha indicado, en una primera fase de estudio se esquematiza la sección en sólo dos materiales, esquistos sanos y esquistos fracturados. Para reproducir el comportamiento inicial del terreno se ha empleado el modelo constitutivo elasto-plástico de Mohr-Coulomb. Las propiedades geotécnicas indicadas en la Tabla 95 han sido determinadas imponiendo que en el estado inicial, el talud esté en condiciones de equilibrio precario, con un factor de seguridad ligeramente superior a la unidad, y unos movimientos del terreno elevados aún para la posición del N.F. más baja posible.

Tabla 95. Parámetros característicos considerados para el modelado de la ladera de Almuñécar

Propiedades materiales	ID	Modelo	γ (kN/m³)	C' (kN/m²)	Φ' (°)	E' (kN/m²)	Tipo	ν
<i>Esq. alterados</i>		Mohr Coulomb	22,00	50	21,00	10 ⁶	Drenado	0,30
<i>Esq. sanos</i>			25,00	100	35,00	4·10 ⁶	Drenado	0,30
<i>NFU - S6</i>			5,72	14,00	23,50	10 ⁶	Drenado	0,30
<i>HA 17.5</i>		Lineal elástico	25,00	-	-	20 ⁶	No poroso	0,20

Las propuestas de mejora incluyen la sustitución de relleno convencional en el escalonado de la urbanización por relleno tipo NFU y, la implementación de pilotes de gran profundidad según las características que se indican en la Tabla 96.

Tabla 96. Parámetros considerados para la definición de los pilotes

Parámetro	Cimentación por pilotes
<i>Tipo de material</i>	Elástico
<i>Rigidez</i>	$35 \cdot 10^6$ kN/m ²
<i>Peso específico</i>	25 kN/m ³
<i>Tipo de viga</i>	Predefinido
<i>Tipo de viga predefinido</i>	Viga circular maciza
<i>Diámetros</i>	0,4 / 0,8 / 1,2 m
<i>Espaciado de pilote</i>	2,5 m

En función de la hipótesis considerada, el proyecto consta de diferentes fases, las cuales se indican a continuación:

a) Hipótesis 1: consta de 11 fases.

- Fase inicial: Se considera el estado actual de la sección de la ladera, con el escalonamiento realizado para la construcción de la urbanización. Al no contar con un perfil del terreno horizontal, se deben realizar los cálculos mediante la opción “Carga por gravedad”. En “Tipo de carga” se selecciona “Construcción por etapas” y finalmente en “Presión intersticial” se elige la opción “Freático”.

- Fase 1: Consiste en obtener el factor de seguridad del terraplén en condiciones iniciales, antes de proceder a la implementación de las medidas de mejora. Se selecciona como tipo de cálculo “Seguridad” y en “Tipo de carga” se elige la opción “Multiplicadores incrementales”. Además en los parámetros de control de deformaciones se marca “Puesta a cero de los desplazamientos”, de forma que los desplazamientos de la fase anterior no distorsionen el F.S. obtenido.

- Fase 2: Se procede a la construcción y trabajos de excavación de la primera fila de pilotes superior. Se activan y desactivan los elementos correspondientes y se indica como tipo de cálculo “Consolidación”. En “Tipo de carga” se selecciona “Construcción por etapas” y en “Presión intersticial” se elige la opción “Freático”. En el intervalo de tiempo se especifica 12 días.

- Fase 3 a Fase 8: Se lleva a cabo la construcción de la siguiente fila de pilotes conforme al procedimiento de la fase 2. En el intervalo de tiempo se especifica 10 días.

- Fase 9: Fase final de consolidación. Como tipo de cálculo elegimos “Consolidación” y en “Tipo de carga” se selecciona la opción “Mínima presión intersticial”. En el apartado “Presión intersticial” se elige “Freático” y en “P-paro” se especifica 1 kPa.

- Fase 10: sigue el mismo procedimiento que la Fase 1 para calcular el factor de seguridad de la ladera una vez se considera por finalizada la consolidación de esta.

b) Hipótesis 2: consta de 9 fases de cálculo.

- Fase inicial a Fase 6: siguen el mismo procedimiento que las fases indicadas en la hipótesis 1.

- Fase 7 y 8: sigue el mismo procedimiento que la Fase 9 y 10 respectivamente de la hipótesis 1.

c) Hipótesis 3: consta de 14 fases de cálculo.

- Fase inicial a fase 3: siguen el procedimiento de cálculo que la hipótesis 1.
- Fase 4, Fase 7 y Fase 10: Se lleva a cabo la excavación de 4 m de profundidad del vial en la parte superior de la urbanización. Para ello, se desactivan los polígonos afectados y se considera la misma definición de cálculo de la fase 2 de la hipótesis 1.
- Fase 5, Fase 8 y Fase 11: Se dispone el relleno de 3 m de espesor de NFU. En este caso se activan los polígonos correspondientes y se considera la misma definición de cálculo que en la fase 2 de la hipótesis 1.
- Fase 6, Fase 9: Se ejecuta la construcción del pilote correspondiente y se dispone la capa superior de arena sobre el relleno de NFU de la fase anterior. Se activan de nuevo todos los elementos necesarios y se consideran los parámetros de cálculo de la fase 2 de la hipótesis 1.
- Fase 12: Se lleva a cabo la construcción de la fila inferior de pilotes. Para lo que se sigue el mismo procedimiento de cálculo desarrollado en la fase 2 de la hipótesis 1.
- Fase 13 y 14: se lleva a cabo el mismo procedimiento 9 y 10 de la hipótesis 1.

d) Hipótesis 4: consta de 16 fases de cálculo.

- Fase inicial y Fase 1: Misma consideración que la fase inicial y Fase 1 de la hipótesis 1.
- Fase 2, Fase 4 y Fase 6: Misma consideración que la Fase 4, Fase 7 y Fase 10 de la hipótesis 3.
- Fase 3, Fase 5 y Fase 7: Misma consideración que la Fase 5, Fase 8 y Fase 11 de la hipótesis 3.
- Fase 8 y Fase 9: Se lleva a cabo el mismo procedimiento que la fase 9 y 10 de la hipótesis 1.
- Fase 10, Fase 13 y Fase 14: Considera la construcción de las tres capas de la berma en la base del terraplén. Se activan los elementos y se indica como tipo de cálculo "Consolidación". En "Tipo de carga" se selecciona "Construcción por etapas" y en "Presión intersticial" se elige la opción "Freático". En el intervalo de tiempo se especifica 20 días por cada una de las tres capas.
- Fase 11 y Fase 12: Se lleva a cabo la excavación de la zona superior de la ladera y relleno mediante NFU. Se sigue el mismo procedimiento de cálculo que las tres fases anteriores.
- Fase 15 y Fase 16: Se lleva a cabo el mismo procedimiento que la fase 9 y 10 de la hipótesis 1.

5.3.6.5 Presentación de resultados Urbanización Cármenes del Mar

Una vez indicadas las fases de ejecución para cada una de las hipótesis propuestas y los parámetros característicos considerados para reducir los deslizamientos del terraplén, se obtienen los desplazamientos totales y el factor de seguridad en la condición inicial y en la condición final.

a) **Hipótesis 1:** Ejecutando 7 filas de pilotes a lo largo de toda la sección del terraplén, se consiguen reducir los desplazamientos en la última fase de cálculo a un valor casi nulo. Mientras el factor de seguridad global del terraplén se incrementa en un 8,31%, según indica la Tabla 97. La línea de deslizamiento principal en la ladera se muestra en la Figura 112.

Tabla 97. Desplazamientos y F.S. Global suponiendo hipótesis 1 de mejora en PK 0+40

Sección PK 0+040					
<i>Fase</i>	Cálculo	Tipo	Intervalo	Desplazamiento total IUI (m)	F.S. Global
0	Carga por gravedad	Etapas de construcción	0 días	0,0435	-

1	Seguridad	Multiplicador incremental	-	-	1,133
2	Consolidación	Etapa de construcción	12 días	$0,1218 \cdot 10^{-3}$	-
3	Consolidación		10 días	$0,1346 \cdot 10^{-3}$	-
4	Consolidación		10 días	$0,1346 \cdot 10^{-3}$	-
5	Consolidación		10 días	$0,1404 \cdot 10^{-3}$	-
6	Consolidación		10 días	$0,1910 \cdot 10^{-3}$	-
7	Consolidación		10 días	$0,2138 \cdot 10^{-3}$	-
8	Consolidación	10 días	$0,2229 \cdot 10^{-3}$	-	
9	Consolidación	Mínima presión intersticial	1 kPa	$0,2236 \cdot 10^{-3}$	-
10	Seguridad	Multiplicador incremental	-	-	1,235

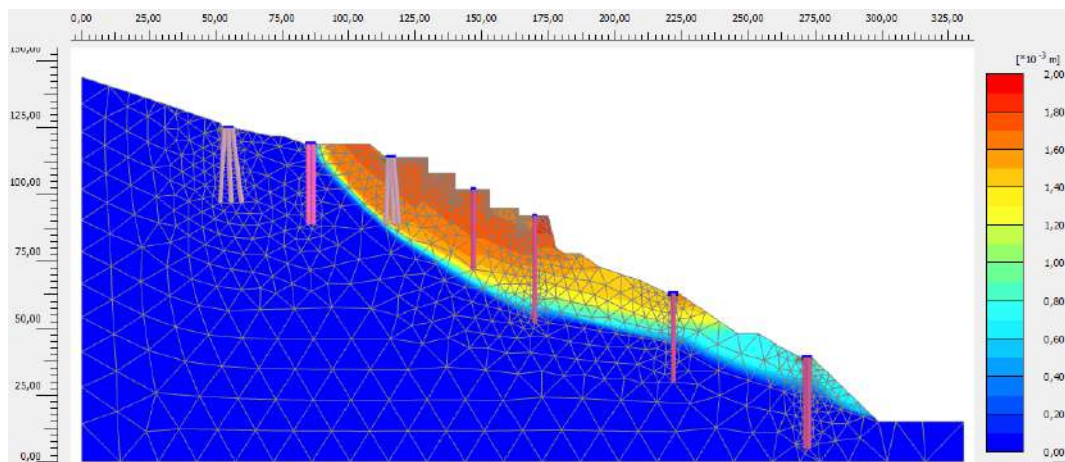


Figura 112. Desplazamientos incrementales (m) en la fase 10 según hipótesis 1

b) **Hipótesis 2:** Ejecutando cuatro filas de pilotes en la parte superior y una última fila en el pie de la ladera, se reducen los desplazamientos a un valor casi nulo. El valor del factor de seguridad se incrementa en un 6,16% respecto al valor obtenido en la condición inicial como muestran los valores de la Tabla 98. La línea de deslizamiento principal en la última fase de cálculo se representa en la Figura 113.

Tabla 98. Desplazamientos y F.S. Global suponiendo hipótesis 2 de mejora en PK 0+40

Sección PK 0+40

Fase	Cálculo	Tipo	Intervalo	Desplazamiento total IUI (m)	F.S. Global
0	Carga por gravedad	Etapa de construcción	0 días	-	-
1	Seguridad	Multiplicador incremental	-	-	1,142
2	Consolidación	Etapa de construcción	12 días	$0,1760 \cdot 10^{-3}$	-
3	Consolidación		10 días	$0,1970 \cdot 10^{-3}$	-
4	Consolidación		10 días	$0,2108 \cdot 10^{-3}$	-
5	Consolidación		10 días	$0,2308 \cdot 10^{-3}$	-
6	Consolidación		10 días	$0,2960 \cdot 10^{-3}$	-
7	Consolidación	Mínima presión intersticial	1 kPa	$0,4268 \cdot 10^{-3}$	-
8	Seguridad	Multiplicador incremental	-	-	1,217

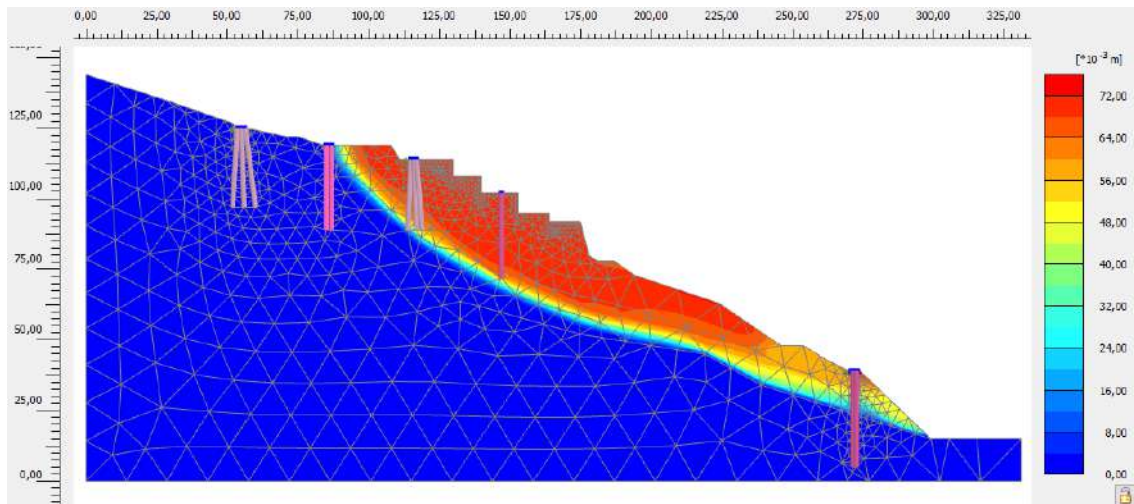


Figura 113. Desplazamientos incrementales (m) en la fase 8 según hipótesis 2

c) **Hipótesis 3:** Se parte de la segunda hipótesis y se contempla la sustitución de material de relleno por NFU. Se incrementa el número de fases debido a los trabajos de excavación y sustitución del material de relleno existente. Los desplazamientos se mantienen similares respecto a la hipótesis anterior. El valor del factor de seguridad se incrementa en un 7,30% respecto al valor obtenido en la condición inicial, como indican los resultados de la Tabla 99.

Tabla 99. Desplazamientos y F.S. Global suponiendo hipótesis 3 de mejora en PK 0+40

Sección PK 0+40

Fase	Cálculo	Tipo	Intervalo	Desplazamiento total IUI (m)	F.S. Global
0	Carga por gravedad	Etapas de construcción	0 días	0,0435	-
1	Seguridad	Multiplicador incremental	-	-	1,142
2	Consolidación	Etapas de construcción	12 días	$0,1198 \cdot 10^{-3}$	-
3	Consolidación		10 días	$0,1970 \cdot 10^{-3}$	-
4	Consolidación		10 días	$0,3799 \cdot 10^{-3}$	-
5	Consolidación		10 días	$0,3393 \cdot 10^{-3}$	-
6	Consolidación		10 días	$0,2542 \cdot 10^{-3}$	-
7	Consolidación		10 días	$0,4020 \cdot 10^{-3}$	-
8	Consolidación		10 días	$0,3778 \cdot 10^{-3}$	-
9	Consolidación		10 días	$0,2739 \cdot 10^{-3}$	-
10	Consolidación		10 días	$0,3293 \cdot 10^{-3}$	-
11	Consolidación		10 días	$0,3092 \cdot 10^{-3}$	-
12	Consolidación		10 días	$0,3081 \cdot 10^{-3}$	-
13	Consolidación		Mínima presión intersticial	1 kPa	$0,3574 \cdot 10^{-3}$
14	Seguridad	Multiplicador incremental	-	-	1,232

La Figura 114 indica la principal línea de deslizamiento de la ladera en la última fase de cálculo según las medidas de mejora implementadas.

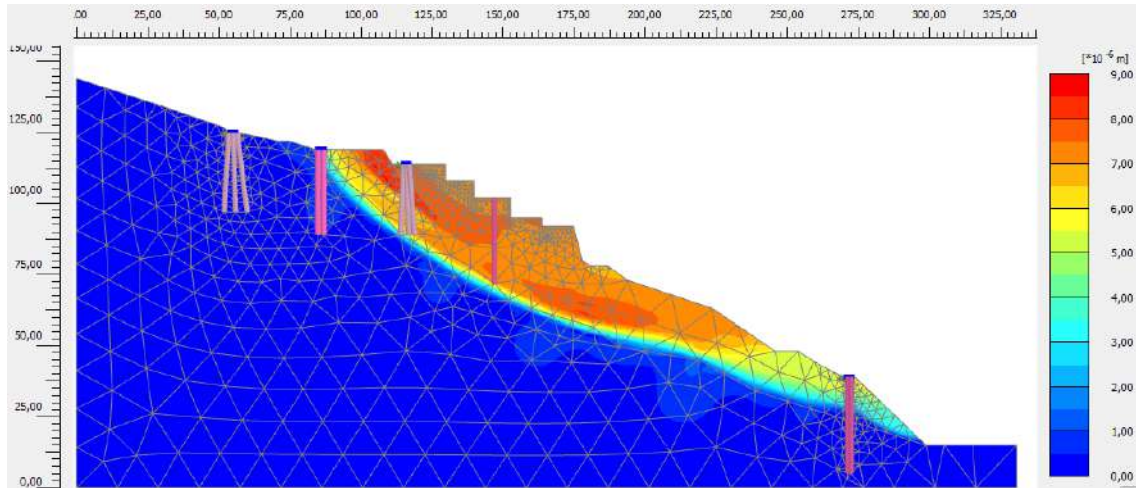


Figura 114. Desplazamientos incrementales (m) en la fase 14 de la hipótesis 3

d) **Hipótesis 4:** Se procede a la colocación de una berma en la parte inferior del terraplén y a la sustitución de material de relleno en los viales por NFU; así como parte del sustrato de esquistos fracturados en la zona superior de la ladera.

Los desplazamientos son similares a las hipótesis anteriores hasta la fase 7 en la que finaliza la sustitución por NFU del relleno de los viales de la urbanización.

El factor de seguridad se incrementa en un 3,45% respecto al valor obtenido en la condición inicial si sólo se consideran las actuaciones en el escalonado de la urbanización, mientras que si suponemos la colocación de una berma en la base de la ladera y la sustitución de parte del esquisto fracturado en la zona superior de la ladera por NFU, el factor de seguridad se incrementa un 10,43%. Los resultados y el procedimiento realizado se indican en la Tabla 100.

Tabla 100. Desplazamientos y F.S. Global suponiendo hipótesis 4 de mejora en PK 0+40

Sección PK 0+400

Fase	Cálculo	Tipo	Intervalo	Desplazamiento total IUI (m)	F.S. Global
0	Carga por gravedad	Etapas de construcción	0 días	0,0435	-
1	Seguridad	Multiplicador incremental	-	-	1,064
2	Consolidación	Etapas de construcción	10 días	$0,4052 \cdot 10^{-3}$	-
3	Consolidación		10 días	$0,3043 \cdot 10^{-3}$	-
4	Consolidación		10 días	$0,4300 \cdot 10^{-3}$	-
5	Consolidación		10 días	$0,3619 \cdot 10^{-3}$	-
6	Consolidación		10 días	$0,4247 \cdot 10^{-3}$	-
7	Consolidación		10 días	$0,4062 \cdot 10^{-3}$	-
8	Consolidación	Mínima presión intersticial	1 kPa	$0,4062 \cdot 10^{-3}$	-
9	Seguridad	Multiplicador incremental	-	-	1,102
10	Consolidación	Etapas de construcción	20 días	$0,589 \cdot 10^{-3}$	-
11	Consolidación		20 días	$2,035 \cdot 10^{-3}$	-
12	Consolidación		20 días	$1,679 \cdot 10^{-3}$	-
13	Consolidación		20 días	$1,715 \cdot 10^{-3}$	-
14	Consolidación		20 días	$2,441 \cdot 10^{-3}$	-

13	Consolidación	Mínima presión intersticial	1 kPa	$2,552 \cdot 10^{-3}$	-
14	Seguridad	Multiplicador incremental	-	-	1,188

La Figura 115 muestra los desplazamientos incrementales según la fase de cálculo del factor de seguridad, una vez sustituido parte del relleno existente en los viales de la urbanización por NFU. En la Figura 116 se muestra la línea de deslizamiento principal cuando además se procede a la colocación de una berma en la parte inferior de la ladera y a la sustitución de parte del relleno fracturado por NFU en la zona superior de la ladera.

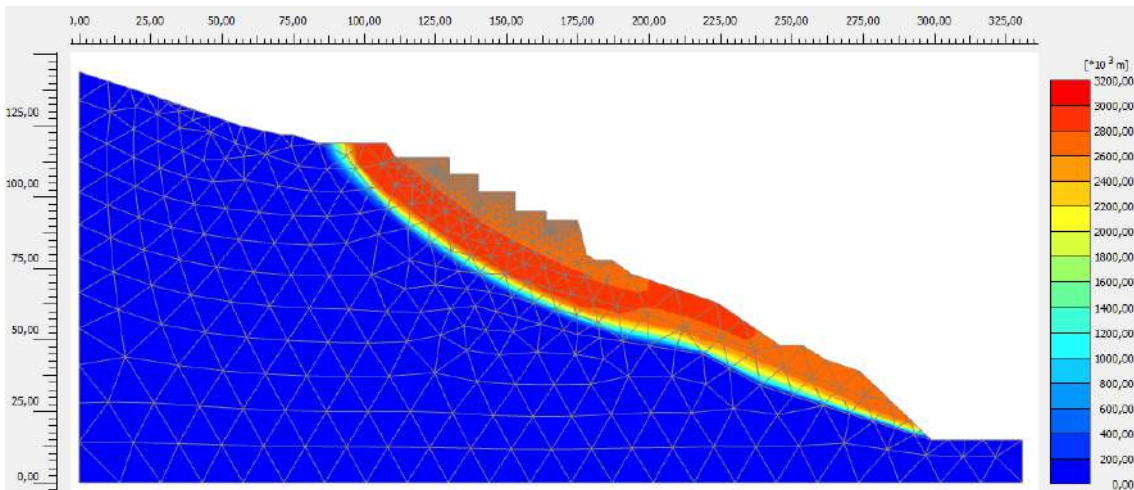


Figura 115. Desplazamientos incrementales (m) en la fase 9 según hipótesis 4

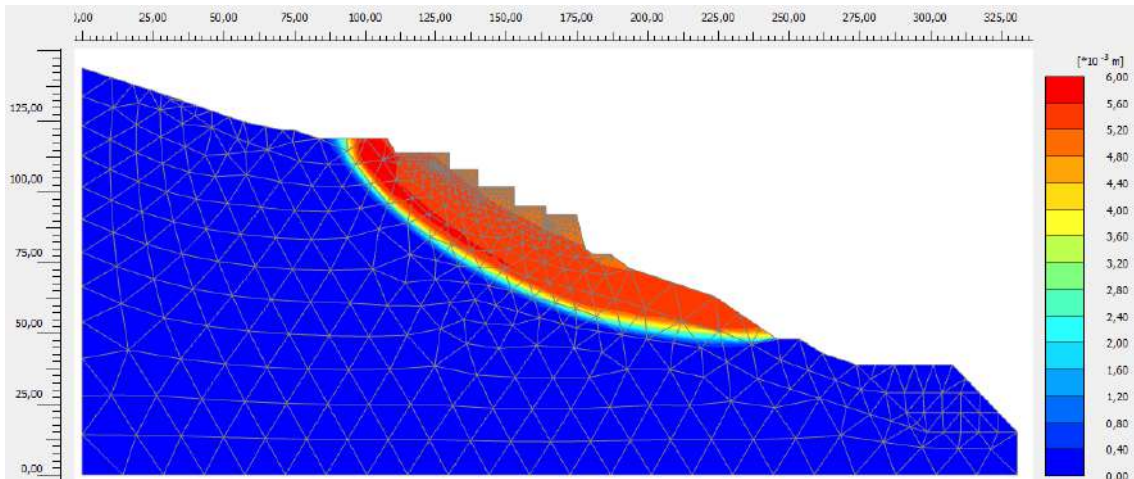


Figura 116. Desplazamientos incrementales (m) en la fase 14 según hipótesis 4

5.3.6.6 Conclusiones sección PK 0+40 Cármenes del Mar, Almuñécar

El análisis de estabilidad preliminar sobre la estabilidad inicial de la ladera en base a las hipótesis consideradas, permiten extraer las siguientes conclusiones:

- El desarrollo de los estados de inestabilidad de la ladera PK0+40 parecen producirse debido al sustrato de esquistos fracturados.

- Los parámetros de resistencia al corte para la masa de esquistos fracturados que permiten simular un factor de seguridad próximo a la unidad fueron:
 - Cohesión (c): 50 kPa
 - Ángulo de rozamiento (Φ): 21°

Siendo estos valores muy superiores a los parámetros reales del sustrato existente.

- El módulo edométrico del granulado de neumático tuvo que equipararse a valores similares a los esquistos fracturados debido a la falta de coherencia en los resultados obtenidos, ya que las mayores deformaciones se focalizaban en los rellenos de NFU debido a su bajo módulo elástico a la finalización de los cálculos.
- La falla de deslizamiento muestra una grieta de rotura desde el extremo superior del modelo hasta la zona inferior, próxima a la playa de la Calaiza. Por ello, las principales medidas de mejora se analizaron a lo largo de toda la ladera.

Los análisis de estabilidad de la ladera una vez implementadas las medidas de mejora sobre la sección analizada, muestran los siguientes resultados:

- La implementación de medidas de refuerzo mediante pilotes permite reducir los desplazamientos de forma generalizada en la ladera. Los desplazamientos obtenidos arrojan menor estabilidad en las dos últimas hipótesis, al no considerarse la ejecución de dos filas de pilotes en la zona inferior de la ladera, siendo la mayor **diferencia** en estos **deslizamientos** con un **47% al comparar la hipótesis 1 y 2**, y del **38% al comparar la hipótesis 1 y 3**, la cual incorpora **relleno de NFU** en la zona de viales. **Los desplazamientos en la hipótesis 4 se incrementan respecto a la hipótesis 1.**
- Los deslizamientos obtenidos en la hipótesis 4 indican que estos se mantienen elevados respecto a la hipótesis 1, debido a que no se considera la ejecución de ninguna fila de pilotes y solamente se contempla la sustitución del material existente por NFU y la implementación de una berma en la base de la ladera.
- **La superficie de deslizamiento es similar** a la condición inicial planteada en las **hipótesis 1, 2 y 3**, lo que indica la **continuidad de la inestabilidad** a pesar de las medidas de mejora propuestas.
- La superficie de rotura en la hipótesis 4 se reduce debido a la formación de la berma en la base del terraplén de 25 m de altura aproximada, propuesta que se considera improbable debido a las limitaciones medioambientales de la zona.
- **El incremento** más significativo del **factor de seguridad** respecto a la condición inicial planteada se obtiene en la **hipótesis 4** y a continuación en la **hipótesis 1** con un **10,43%** y un **8,31%** respectivamente. Respecto a las **hipótesis 2 y 3** se observa que **considerar el empleo de NFU** incrementa un **1,14%** el **factor de seguridad**, ya que se obtiene un incremento en el factor de seguridad de un 6,16% y 7,30% respectivamente.
- No se alcanza en ninguna de las hipótesis planteadas el factor de seguridad óptimo de 1,5. Las medidas de estabilización mediante la colocación de pilotes no son suficientes para mejorar de forma significativa la estabilidad de la ladera, por lo que tendría que modificarse la geometría de los pilotes y su ubicación, lo que conllevaría a un incremento significativo de los costes y empleo de recursos materiales.

5.4 APLICACIÓN 3: EXPLANADAS SOBRE NFU PARA EJECUCIÓN DE FIRMES

5.4.1 Consideraciones iniciales en la ejecución de firmes para pavimentos sobre NFU

Pueden ocurrir deformaciones significativas debido a la compresión del granulado de neumático, por ello, el diseño de las estructuras en las que se incluya este material deben incluir una estimación de las deformaciones y una evaluación de la influencia de las mismas en los componentes estructurales y no estructurales alrededor del relleno de NFU.

Para reducir los asentos, una capa de árido convencional con espesor suficiente en función del uso del firme superior, se considera suficiente para evitar deformaciones inesperadas. La norma americana (*ASTM D 1621*, n.d.) indica que como mínimo, debe disponerse una capa de 0,80 m para pavimentos con una carga de tráfico baja. Para viales con tráfico intenso, se precisan 1 m o 2 m de terrero convencional sobre el NFU. Mientras que para aplicaciones no pavimentadas, una capa de entre 0,30 a 0,50 m de terreno puede ser suficiente.

Este hecho ha sido ampliamente estudiado para distintos pavimentos, como por ejemplo el asfalto con un módulo elevado de elasticidad (6.890 MPa), para el que se recomienda una explanada de protección con un espesor entre 0,91 m a 1,21 m. Para pavimentos de hormigón con un módulo de elasticidad menor (pavimentos flexibles, con módulo de elasticidad aproximadamente 275,6 MPa), se recomienda un espesor mínimo de 0,61 m. Por último, para pavimentos con un módulo de elasticidad bajo, se recomienda un espesor menor de 0,46 m (GeoSyntec Consultants, 2008).

En esta aplicación se parte de **distintas composiciones de explanadas para firmes**, que permiten obtener las tensiones y deformaciones producidas en **distintas secciones de terraplén**, en base a las solicitaciones de tráfico estimadas. Posteriormente las tensiones y deformaciones obtenidas se comparan con los valores límite para determinar la viabilidad de la propuesta sobre los rellenos de NFU.

Se considerarán los materiales y prescripciones que pueden formar parte de las explanadas donde asienta el firme, en base al PG-3, según la Orden Fom/3460/2003, de 28 de noviembre y la Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía.

Al igual que en capítulos anteriores se emplea el programa de cálculo PLAXIS 2D V20 para analizar la deformación vertical de la explanada sobre la que se colocará el firme, en las secciones del terraplén con altura de coronación de 4 m que se plantearon en la “Aplicación 2”.

Otras investigaciones se han centrado en monitorizar construcciones in situ con diferentes secciones de firme, donde se han mezclado NFU con materiales ligantes para mejorar la rigidez de estos pavimentos permeables (Raeesi et al., 2020). En la línea de esta investigación se encuentra la evaluación de pavimentos permeables bajo cargas cíclicas, compuestos de NFU y compuestos ligantes (Disfani, Mohammadinia, Narsilio, & Aye, 2020), donde bajo las condiciones analizadas se verifican secciones de firme sometidas a bajas cargas cíclicas, donde se alcanza menos del 2 % de deformación. Uno de los problemas más extendidos en los pavimentos se produce por las cargas de tráfico repetidas. La compresibilidad y los asentos verticales en el caso de los terraplenes realizados con NFU presentan un gran impacto en las posibles afecciones que pueden sufrir los pavimentos, para lo que es necesario evaluar las deformaciones por tracción en la capa inferior del pavimento final, o lo que es lo mismo, en un punto próximo al centro de la coronación del terraplén.

5.4.2 Esquema conceptual explanadas sobre NFU para ejecución de firmes

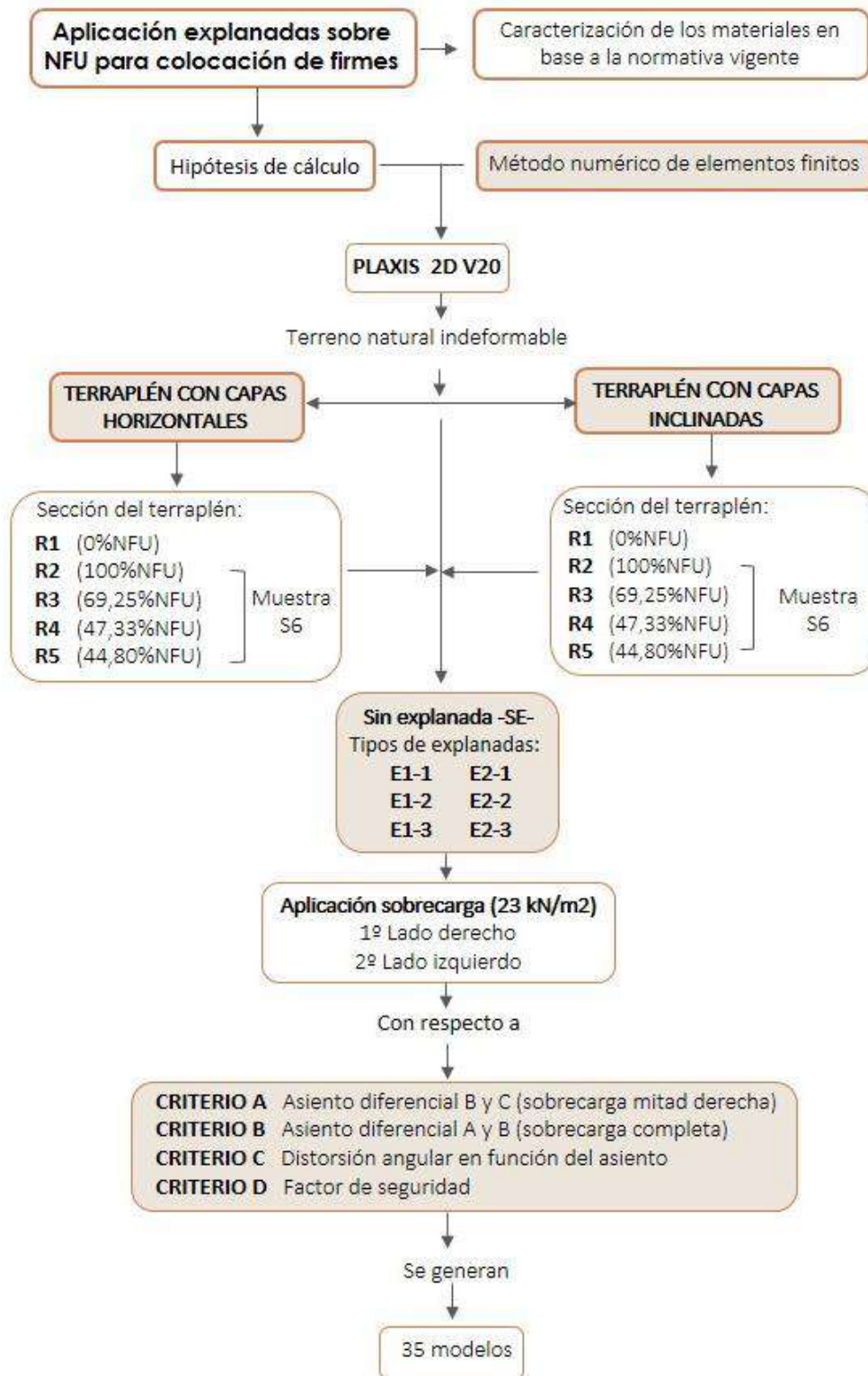


Figura 117. Esquema conceptual de etapas para el análisis de asientos en explanadas sobre NFU

5.4.3 Formación de explanadas según normativa nacional y autonómica

A nivel nacional la Orden FOM/3460/2003, de 28 de noviembre, por la que se aprueba la norma 6.1 IC secciones de firme, de la Instrucción de Carreteras, tiene por objeto el establecimiento de los criterios básicos que deben ser considerados en el proyecto de los firmes de viales de nueva construcción a nivel nacional.

A nivel autonómico se considera la Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía, publicado por la Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía en el año 2007.

Ambas normativas de diseño consideran las prescripciones sobre la clasificación de suelos para la formación de explanadas que considera el artículo 330 del PG-3, según se resume en la Tabla 101. En dicha tabla se consideran a efectos de cálculo de esta aplicación, suelos que no precisan de cal u otros materiales para su estabilización.

Tabla 101. Parámetros geotécnicos considerados para la formación de explanadas sobre capa de NFU

Símb.	Designación	Suelo	v	Φ (°)	C (kPa)	γ_d (kN/m³)	γ_{sat} (kN/m³)	K_z (m/s)	$E_{m\acute{a}x}$ (Mpa)
SS1	Selec. 1	Grava limpia	0,35	35	1	15	20	10^{-2}	100
SS2	Selec. 2			40		16	21		150
SS3	Selec. 3			45		17	22		200
SA	Adecuado	Arena limosa		30	1	18	18	10^{-6}	50
SO	Tolerable	Arcilla arenosa		6	4	21	22	10^{-9}	30

Las prescripciones complementarias para su uso según la Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía son:

- En el núcleo de los terraplenes no se permite el empleo de suelos inadecuados.
- En las capas de asiento no se permite el empleo de los suelos inadecuados ni tolerables.

En la Orden FOM/3460/2003, desaparece la disposición tradicional de colocar sobre la explanada una capa de zahorra natural como sub-base de los firmes. Esta desaparición se ha visto motivada por cuestiones ambientales, pues actualmente es prácticamente imposible disponer de zonas de préstamo que permitan la obtención de materiales que satisfagan las prescripciones técnicas de las zahorras naturales.

A los efectos de definir la estructura del firme para cada casuística se establece tres categorías de explanadas, denominadas E1, E2 y E3. Estas categorías se determinan según el módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga (E_{v2}), obtenido de acuerdo con la NLT-357 "Ensayo de carga con placa" cuyos valores se muestran en la Tabla 102.

Tabla 102. Módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga según NLT-357

Categoría de explanada	E1	E2	E3
<i>E_{v2} (MPa)</i>	≥ 60	≥ 120	≥ 300

Fuente: Orden FOM/3460/2003, de 28 de noviembre, por la que se aprueba la norma 6.1-IC "Secciones de firme", de la Instrucción de Carreteras (M. Fomento, 2003).

La Figura 118 se estructura según la categoría de la explanación en el caso de desmontes, o de la obra de tierra en el caso de los rellenos (terraplenes o rellenos todo-uno). Se describen los tipos de suelos de la explanada en base a la categoría de tráfico, pudiéndose emplear distintos tipos de suelo que deberán alcanzar

el módulo edométrico indicado como mínimo, además de cumplir con las especificaciones de cada tipo de suelo según PG3-3.

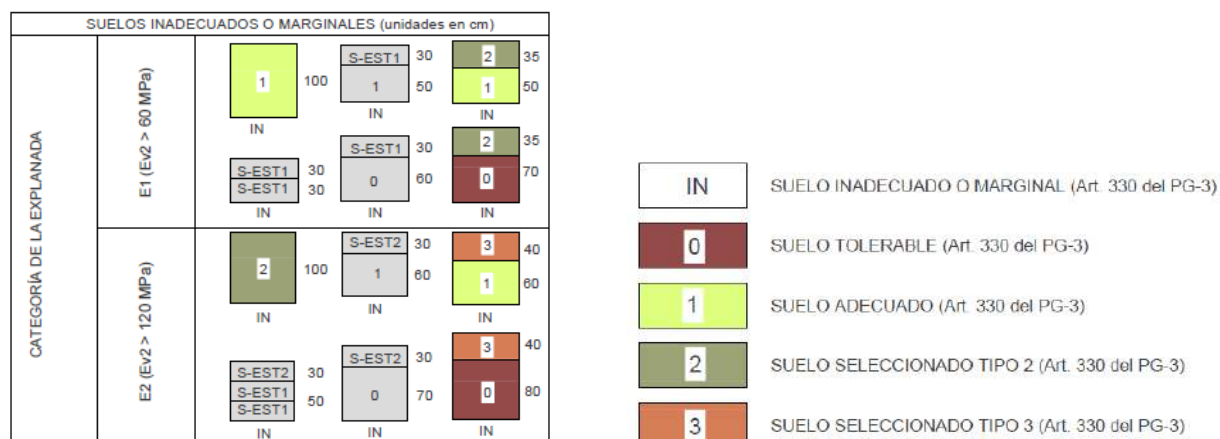


Figura 118. Tipos de suelo de la explanación o de la obra de tierra subyacente FOM/3460/2003

Si se considerará la ejecución de la explanada con NFU, según la Orden FOM/3460/2003 los materiales para la formación de explanadas con materiales marginales, deberán cumplir además las prescripciones complementarias que se indican en la Tabla 103.

Tabla 103. Materiales para la formación de explanadas

SÍMBOLO	DEF. DEL MATERIAL	ARTÍCULO DEL PG-3	PRESCRIPCIONES COMPLEMENTARIAS
IN	Suelo inadecuado o marginal	330	-Su empleo sólo será posible si se estabiliza con cal o con un cemento para conseguir S-EST1 o EST2.

Fuente: Orden FOM/3460/2003, de 28 de noviembre, por la que se aprueba la norma 6.1-IC "Secciones de firme", de la Instrucción de Carreteras (M. Fomento, 2003).

Según las características finales se establecen tres tipos de suelos estabilizados in situ, denominados respectivamente S-EST1, S-EST2 y S-EST3. Los dos primeros se podrán conseguir con cal o cemento, mientras que el tercer tipo se tendrá que obtener con cemento.

Las explanadas construidas con materiales diferentes de los considerados (residuos, subproductos, etc.) serán clasificados, cuando sea posible, por analogía y en otro caso, mediante un estudio específico (M. Fomento, 2003). En este sentido, existen numerosas investigaciones centradas en analizar el comportamiento de la sustitución de parte de material mineral por neumático triturado en mezclas de hormigón, pero los ensayos realizados no se centran en la opción de los parámetros geotécnicos del compuesto (Si, Wang, Guo, Dai, & Han, 2018); (Thomas & Chandra Gupta, 2016).

La Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía clasifica las tres categorías de explanadas, denominadas como baja, media y alta. Estas categorías se diferencian en el módulo equivalente (Ee) en función de la capacidad de soporte mínima, según indica la Tabla 104.

Tabla 104. Módulo de compresibilidad según Red de Carreteras de Andalucía

Categoría de explanada	BAJA	MEDIA	ALTA
Ee (MPa)	≥ 60	≥ 100	≥ 160
Categoría válida de tráfico	T4	T3 y T4	T00 a T2

Fuente: Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía.

Se concluye que el valor del módulo edométrico del granulado de neumático lo imposibilita como material para la formación de explanadas, debido a su elevada deformabilidad.

El módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga se consigue en base a la disposición de las capas de asiento, las cuales deberán estar divididas en tongadas que tendrán un espesor comprendido entre 0,20 y 0,30 m. Cada capa se considera a efectos de cálculo como una capa elástica, homogénea e isótropa, por lo tanto queda definida por su espesor, módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson. Por lo tanto, se considera que el módulo de elasticidad del conjunto va aumentando a medida que se van superponiendo sobre las capas anteriores hasta alcanzar la máxima capacidad de soporte.

En la normativa autonómica se indica que antes de colocar el firme definitivo se deberán estabilizar los asientos diferenciales. Se considera que dichos asientos diferenciales se han estabilizado cuando la diferencia entre los asientos absolutos de dos puntos del plano de la explanada que disten 20 m, medidos en un intervalo de 3 meses, sea inferior a los límites indicados en la Tabla 105.

Tabla 105. Asientos diferenciales máximos constructivos tras 3 meses de dos puntos que disten 20 m

Velocidad de proyecto (km/h)	Asientos diferenciales máximos (cm)
120	1,0
100	1,5
80 - 60	3,0

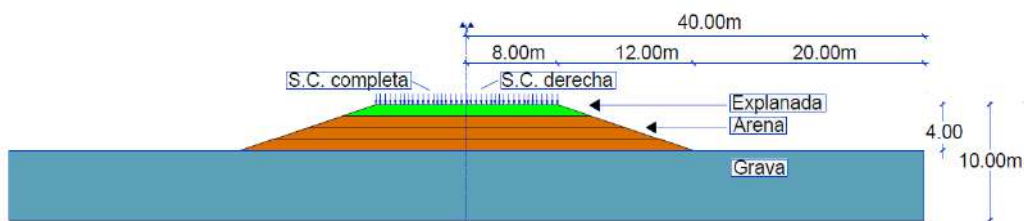
Sin ser vinculante para esta aplicación, el CTE-DB SE-C (V2019) indica para la verificación de los estado límite de servicio relacionados con los movimientos de la cimentación, los valores límite basados en la distorsión angular (β), definida como el asiento diferencial entre dos puntos dividido por la distancia que les separa, según la Ecuación 24.

$$\beta_{AB} = \frac{\delta_{SAB}}{L_{AB}} = \frac{S_B - S_A}{L_{AB}}; \quad \text{Ecuación 24}$$

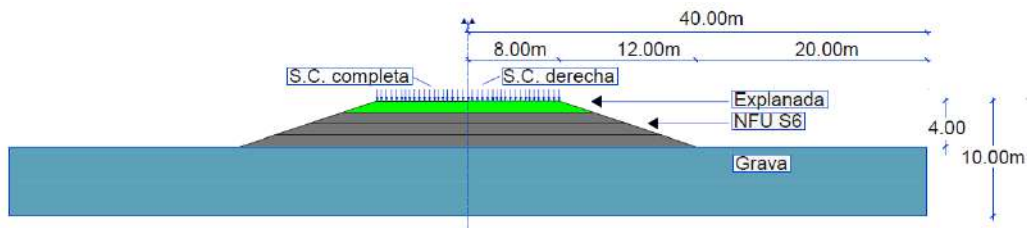
En el caso de que no se especifiquen los valores límites de servicio de los movimientos de la cimentación podrán optarse para estructuras isostáticas 1/300 (CTE DB SE-C, V2019).

5.4.4 Caracterización e hipótesis de cálculo PLAXIS 2D V20 explanadas para firmes

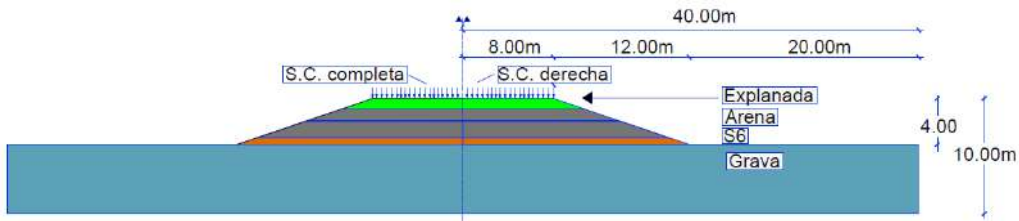
Las estratigrafías propuestas consideran la misma geometría del terraplén que la “Aplicación 2”, pero se incorpora al perfil las distintas soluciones de explanación para la posterior aplicación de la sobrecarga de tráfico (23 kN/m²) en primer lugar en el lado derecho y posteriormente en el lado izquierdo, lo que supone la aplicación de la sobrecarga al completo sobre la coronación del terraplén, como muestra la Figura 119.



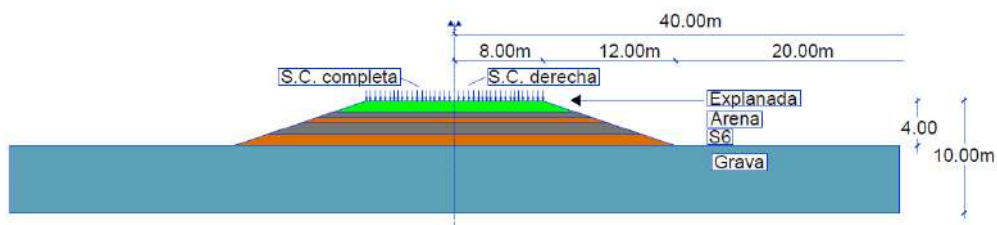
Sección R1 -0% NFU-



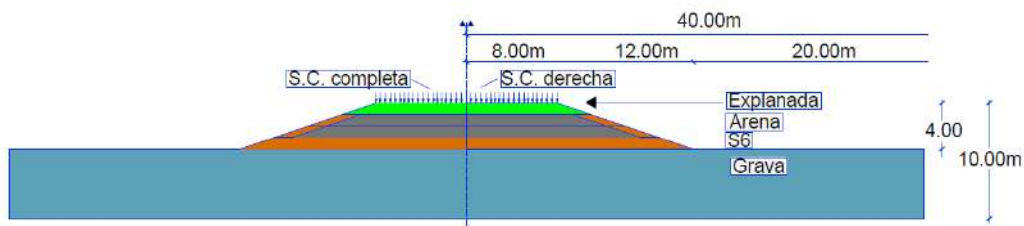
Sección R2 -100% NFU-



Sección R3 -69% NFU-



Sección R4 -47% NFU-



Sección R5 -44% NFU-

Figura 119. Hipótesis de cálculo explanadas para la colocación de un firme estratos horizontales

Respecto a la caracterización de los materiales constituyentes del firme y del cimiento, se supone un comportamiento elástico lineal. Por lo que, para definir la relación tensión deformación del material, sólo serán necesarios dos parámetros:

- Módulo de Young, E'
- Coeficiente de Poisson, ν

Con el objetivo de analizar exclusivamente los asientos verticales del propio terraplén, sin considerar las deformaciones debidas al asiento del terreno de cimentación, se considera para el terreno natural los parámetros indicados en la Tabla 106.

Tabla 106. Caracterización terreno de cimentación para el análisis de asientos del terraplén

Propiedades materiales	ID	Modelo	γ (kN/m ³)	C' (kN/m ²)	Φ' (°)	E' (kN/m ²)	Tipo	ν
Gravas		Morh Coulomb	20	3	39	$1,5 \cdot 10^7$	Drenado	0,30

Se establece que el nivel freático se encuentra en la cota $\pm 0,00$ m y se generan las presiones iniciales intersticiales. A partir del procedimiento "KO", se generan los esfuerzos al considerar el proceso de ejecución del terraplén sobre una superficie horizontal de terreno. Al modelarse el terraplén al completo no se considera ninguna condición de borde para el análisis de consolidación.

Los puntos de interés según la Figura 120 para el análisis de todas las secciones propuestas en esta aplicación son:

- Punto A en el centro de coronación
- Punto B en la esquina izquierda de coronación
- Punto C en la esquina derecha de coronación
- Punto D en el centro de la base

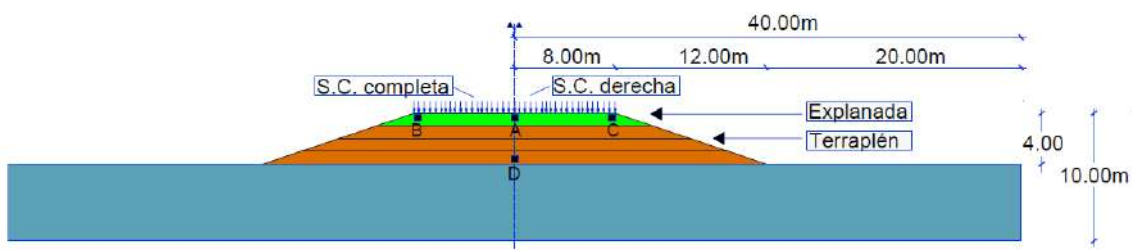


Figura 120. Puntos de interés para el análisis de asientos de explanadas para colocación de firmes

Por lo tanto, la cota de coronación del terraplén se mantiene en 4 m de forma que se sustituyen las últimas tongadas en cada una de las secciones del terraplén, para incluir los seis tipos de explanadas propuestas sobre suelos inadecuados y que no se constituyen a partir de suelos estabilizados mediante cal o cemento (EST1 y EST2). Para estas explanadas en función del tipo de firme que se disponga sobre ellas podría alcanzarse una categoría de tráfico T1 y T2, es decir, una capacidad de entre 2.000 y 200 vehículos pesados por día. Además se incluye una sobrecarga uniformemente distribuida sobre el plano de la explanada en dos fases de 23 kN/m^2 que simula el tráfico rodado en el lado derecho de coronación y en posteriormente considerando también su aplicación sobre el lado izquierdo.

Como argumento de aplicación de NFU bajo explanadas para la formación de firmes y pavimentos, una vez definidas las fases, se analizan los resultados conforme a los siguientes criterios:

- Criterio 1: Asiento diferencial entre los puntos B y C cuando se aplica la sobrecarga en la mitad derecha y asiento diferencial entre los puntos A y B cuando se aplica la sobrecarga en la totalidad del plano de explanación.
- Criterio 2: Distorsión angular entre los puntos B y C -distancia 16 m- al aplicar la sobrecarga en la mitad derecha y distorsión angular entre los puntos A y B -distancia 8 m- cuando se considera la sobrecarga en la totalidad del plano de explanación.

- Criterio 3: Factor de seguridad obtenido al aplicar la sobrecarga de tráfico para cada hipótesis de intervención.

5.4.4.1 Fases constructivas en la ejecución de la explanada para el firme

Con el fin de analizar la influencia que cada una de las explanadas presenta sobre cada una de las secciones del terraplén estudiadas, se supone la ejecución del terraplén en cuatro estratos horizontales en función de la estratigrafía planteada y sobre este, la ejecución de la explanada en capas de no más de 25 cm de espesor hasta alcanzar los 4 m de altura.

Las fases de cálculo constan de una fase inicial y distintas fases constructivas, en base al número de capas de cada sección, que corresponden a un análisis de consolidación. La construcción de los estratos de terraplén se lleva a cabo en un intervalo de tiempo de 13 días, que se asimilaría a un comportamiento bajo condiciones no drenadas. Después de cada fase de construcción se introduce una fase de consolidación que se desarrolla en un periodo de 17 días. Al modelar la explanada se considera un tiempo de consolidación de 2 días por capa ejecutada y 3 días para la consolidación de la misma.

Una vez se finaliza la construcción del terraplén se considera la aplicación de una sobrecarga de tráfico de 23 kN/m² en el lado derecho del terraplén, y en segundo lugar la aplicación de la sobrecarga en toda la coronación de este. La última fase constituye un análisis de estabilidad a partir de la obtención del factor de seguridad en función de la aplicación de la sobrecarga.

5.4.4.2 Sección R1; R2; R3; R4 y R5 sin explanada

Con el fin de analizar la repercusión en las deformaciones verticales que se producen con la colocación de una explanada sobre las secciones de terraplén analizadas en la aplicación anterior, se procede en este apartado a la aplicación de la sobrecarga de tráfico sin contemplar ningún tipo de explanación sobre la coronación del terraplén. Las fases de cálculo se describen en la Tabla 107 para todas las secciones estudiadas.

Tabla 107. Fases de cálculo general para sección R1; R2; R3; R4 y R5 ejecutado sin explanada

Sección R1, R2, R3, R4 y R5 sin explanada

Fase	Tipo de cálculo	Número de capas del terraplén	Tipo de carga	Tiempo [días]	Tiempo acumulado [días]
1	Consolidación	1	Etapa de construcción	13	13
2		1		17	30
3		2		13	43
4		2		17	60
5		3		13	73
6		3		17	90
7		4		13	103
8		4		17	120
10	Plástico	4	Etapa de construcción	-	120
11	Seguridad	4	Mult. incrementales	-	-

En la Tabla 108 se indican los desplazamientos verticales suponiendo la aplicación de la sobrecarga de tráfico en la mitad derecha y por último, la sobrecarga de tráfico completa para los puntos A, B, C y D.

Tabla 108. Deformación vertical en sección R1, R2 R3, R4 y R5 sin explanada

Sobrecarga	Sección	Deformación vertical (Uy) m			
		Punto A	Punto B	Punto C	Punto D
<i>Mitad derecha (SD)</i>	R1	-0,043	-0,030	-0,044	$-4,46 \cdot 10^{-3}$
	R2	-0,059	-0,028	-0,059	$-5,37 \cdot 10^{-3}$
	R3	-0,060	-0,033	-0,056	$-1,27 \cdot 10^{-3}$
	R4	-0,055	-0,032	-0,048	$-2,88 \cdot 10^{-3}$
	R5	-0,064	-0,036	-0,055	$-2,94 \cdot 10^{-3}$
<i>Completa (SC)</i>	R1	-0,053	-0,043	-0,043	$-5,20 \cdot 10^{-3}$
	R2	-0,087	-0,058	-0,058	$-7,20 \cdot 10^{-3}$
	R3	-0,084	-0,055	-0,055	$-1,81 \cdot 10^{-3}$
	R4	-0,075	-0,049	0,050	$-3,98 \cdot 10^{-3}$
	R5	-0,083	-0,056	-0,057	$-3,80 \cdot 10^{-3}$

Una vez obtenidos los resultados se analizan los criterios de evaluación considerados anteriormente, según se indican en la Tabla 109.

Tabla 109. Criterios de análisis deformación vertical explanada

Sobrecarga	Sección terraplén	Criterio 1 (cm)	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4 (F.S)
<i>Mitad derecha</i>	R1	1,4	0,000875	0,96	1,295
	R2	3,1	0,001937	1,34	2,275
	R3	2,3	0,001437	1,47	1,288
	R4	1,6	0,001	1,30	1,291
	R5	1,9	0,00118	1,53	1,272
<i>Completa</i>	R1	1	0,00125	1,19	1,296
	R2	2,9	0,00362	1,99	-
	R3	2,9	0,00362	2,054	1,299
	R4	2,6	0,00325	1,77	1,292
	R5	2,7	0,00337	1,98	1,263

Los mayores asientos diferenciales (criterio 1) se observan en las secciones R2 y R3, tanto al considerar la aplicación de la sobrecarga en la mitad derecha como en la superficie completa de la explanada. En el segundo caso, la deformación vertical del punto A en el centro del terraplén, es muy elevada respecto al punto B ubicado en el extremo, produciéndose elevados asientos diferenciales.

Al considerar en el criterio 2 la aplicación de la sobrecarga completa y por ende la distorsión angular entre los puntos A y B, la distancia entre estos se reduce a 8 m, superándose el valor límite establecido para este parámetro de 1/300 indicado para estructuras isostáticas (CTE-DB-SE-C, v2019).

En la Figura 121, se muestran los desplazamientos totales verticales para la sección R2 al considerar la aplicación de la sobrecarga en la mitad derecha del terraplén.

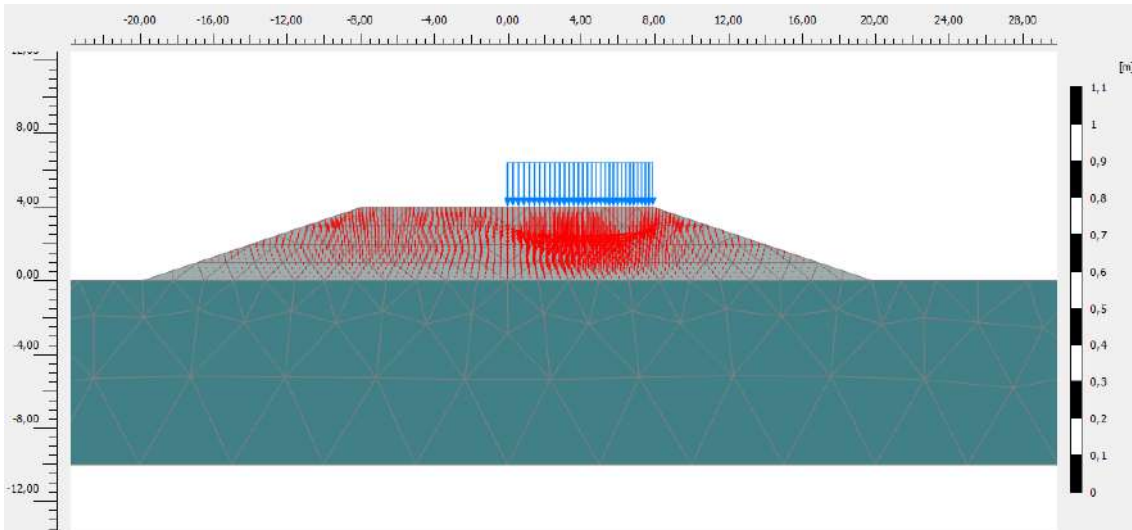


Figura 121. Desplazamientos totales verticales U_y (m) en la fase 10 de la sección R2

Para la obtención del factor de seguridad no se consiguió la condición de equilibrio en el último paso de cálculo para la sección R2 al aplicar la sobrecarga en la totalidad del plano de coronación del terraplén, por lo que no pudo finalizar el cálculo. La Figura 122 representa la ubicación de los mayores desplazamientos verticales que se dan para esa sección al no considerar la colocación de ninguna explanada.

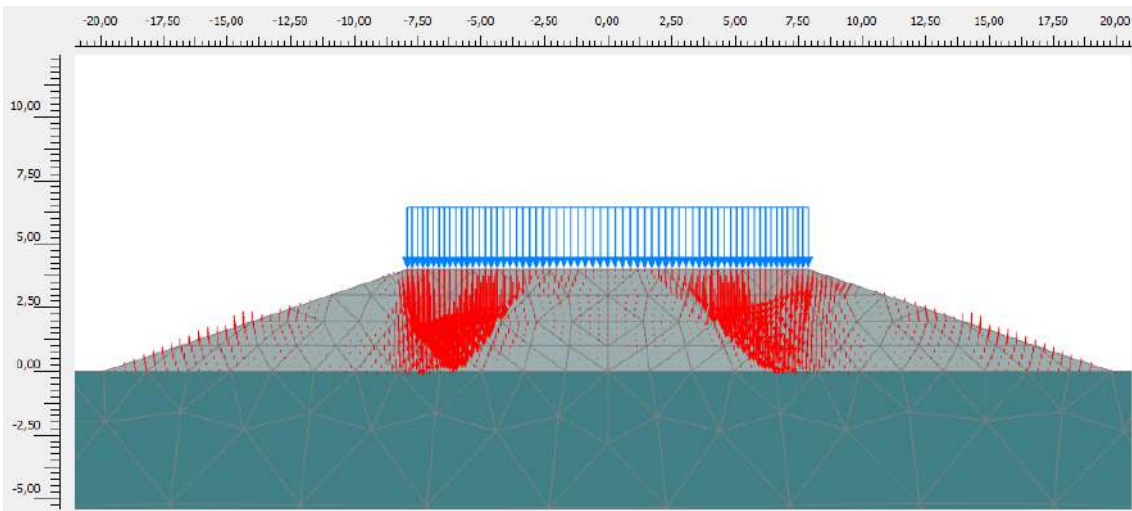


Figura 122. Desplazamientos incrementales totales verticales ΔU_y (m) de la sección R2

En la Figura 123 se aprecia como las secciones que contienen **NFU** presentan una mayor **deformación vertical** en el centro del terraplén (**punto A**) respecto a los extremos (puntos B y C) en el caso de considerar la aplicación de la **sobrecarga completa**. Dicha diferencia entre los puntos A y B al considerar la aplicación de la sobrecarga completa oscila entre un **34,66% en la sección R4** a un **18,86% para la sección R1**.

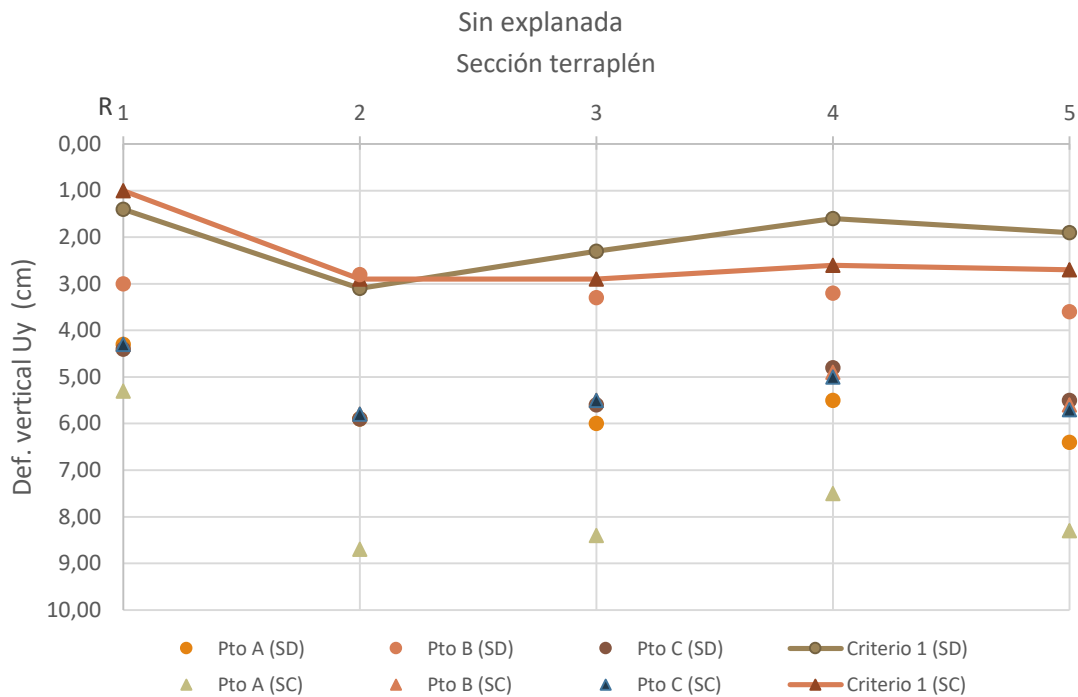


Figura 123. Def. vertical y asiento diferencial en función de la sobrecarga sin explanada

Hecho similar se aprecia en el caso de aplicar la sobrecarga en la mitad derecha, observándose mayores diferencias en la deformación vertical del punto B en aquellas secciones que contienen NFU en comparación con la sección R1, constituida por material convencional.

La **menor deformación vertical** aparece en los **extremos del terraplén**, en el punto B opuesto a la aplicación de la sobrecarga en la mitad derecha de la explanada. Dicha diferencia respecto al centro del terraplén oscila entre el **52,54% para la sección R2** a un **31,81% para la sección R1**.

La aplicación de la sobrecarga de tráfico completa en la explanada del terraplén, implica una mayor deformación vertical en el centro de este para todas las secciones. La sección del terraplén **R2** puede llegar a alcanzar un descenso vertical de hasta **8,7 cm en el centro** de este actuando la sobrecarga completa, similar a la sección **R5**, donde la deformación vertical es de **8,30 cm**, mientras que para la sección **R1** el descenso vertical en el punto A es de **5,30 cm**, es decir un **39% inferior**.

Los asientos diferenciales son mayores al considerar la aplicación de la sobrecarga en el lado derecho de la explanada, salvo para la sección R1 y R2. La diferencia entre estos asientos en función de la aplicación de la sobrecarga es de un 6,45% para la sección R2 y de un 42,10% para la sección R5 mientras que para la sección R1 se obtiene un 28,57% de diferencia, similar a la sección R3 con 26,08%.

En los siguientes apartados se analizan cada uno de los criterios y deformaciones verticales, una vez ejecutado el sustrato de la explanada, de forma que los resultados obtenidos puedan compararse finalmente con la hipótesis desarrollada en este apartado que no considera explanación sobre la coronación terraplén.

5.4.4.3 Explanada E1-1



100

IN

Esta explanada de 1 m de espesor de suelo adecuado (1) según clasificación del PG-3, se modela en capas de 0,20 m de espesor y se sitúa sobre suelos inadecuados (IN), concretamente NFU según caracterización de la muestra S6.

Con el fin de incluir las capas de la explanación para alcanzar la cota de coronación de 4 m, se incluyen las fases y el tiempo de consolidación estimado según se indica en la Tabla 110 para cada sección del terraplén.

Tabla 110. Definición fases sección R1, R2, R4 y R5 para la explanada E1-1

Sección R1, R2, R4 y R5

Fase	Tipo de cálculo	Altura final (m)	Tipo de carga	Tiempo [días]	Tiempo acumulado [días]
1	Consolidación	1 m	Etapa de construcción	13	13
2		1 m		17	30
3		2 m		13	43
4		2 m		17	60
5		3 m		13	73
6		3 m		17	90
7		3,20 m		2	92
8		3,20 m		3	95
9		3,40 m		2	97
10		3,40 m		3	100
11		3,60 m		2	102
12		3,60 m		3	105
13		3,80 m		2	107
14		3,80 m		3	110
15		4 m		2	112
16		4 m		3	115
17	Plástico	4 m	-	115	
18	Seguridad	4 m	Mult. incrementales	-	-

Para la sección R3 la diferencia respecto al resto de las secciones, es que en la fase 4, la altura de coronación del terraplén es de 2,10 m, al incluirse en el primer estrato de NFU la capa de separación de 0,10 m de material convencional tipo arena. Por lo que se asimilará para el resto de explanaciones indicadas esta condición.

En la Tabla 111 se indican los desplazamientos verticales al final de la consolidación de la explanada para los puntos A, B, C y D suponiendo la aplicación de la sobrecarga de tráfico en la mitad derecha del terraplén y en la totalidad de la superficie de explanación.

Tabla 111. Deformación vertical en explanada E1-1; S.C. mitad derecha y completa

Sobrecarga	Sección terraplén	Fase	Deformación vertical (Uy) m			
			Punto A	Punto B	Punto C	Punto D
Mitad derecha	R1		-0,041	-0,030	-0,042	$-4,47 \cdot 10^{-3}$
	R2		-0,078	-0,049	-0,077	$-7,23 \cdot 10^{-3}$
	R3		-0,066	-0,042	-0,066	$-1,73 \cdot 10^{-3}$
	R4		-0,058	-0,039	-0,060	$-3,32 \cdot 10^{-3}$

Completa	R5	10	-0,060	-0,038	-0,060	$-3,36 \cdot 10^{-3}$
	R1		-0,050	-0,041	-0,041	$-5,06 \cdot 10^{-3}$
	R2		-0,102	-0,077	-0,075	$-8,35 \cdot 10^{-3}$
	R3		-0,086	-0,065	-0,066	$-1,90 \cdot 10^{-3}$
	R4		-0,075	-0,059	-0,060	$-4,02 \cdot 10^{-3}$
	R5		-0,078	-0,058	-0,059	$-3,78 \cdot 10^{-3}$

Tabla 112. Criterios de análisis en explanada E1-1 terraplén capas horizontales

Sobrecarga	Sección	Criterio 1 (cm)	Criterio 2	Criterio 3 (%)	Criterio 4 (F.S.)
Mitad derecha	R1	1,2	0,00075	0,91	1,141
	R2	2,8	0,00175	1,77	1,148
	R3	2,4	0,0015	1,61	1,146
	R4	2,1	0,00131	1,37	1,141
	R5	2,2	0,00137	1,41	1,149
Completa	R1	0,9	0,00112	1,12	1,133
	R2	2,5	0,00312	2,34	1,152
	R3	2,1	0,00262	2,10	1,150
	R4	1,6	0,002	1,77	1,123
	R5	2	0,0025	1,85	1,141

Para el criterio 1, el mayor asiento diferencial se aprecia para la sección R2 seguida de la sección R3 que junto a la anterior considera la mayor cantidad de NFU en la composición del terraplén.

Respecto al criterio 2, al considerar la aplicación de la sobrecarga al completo actuando sobre la superficie de la explanada, el valor de distorsión angular se acerca al límite establecido para la sección R2.

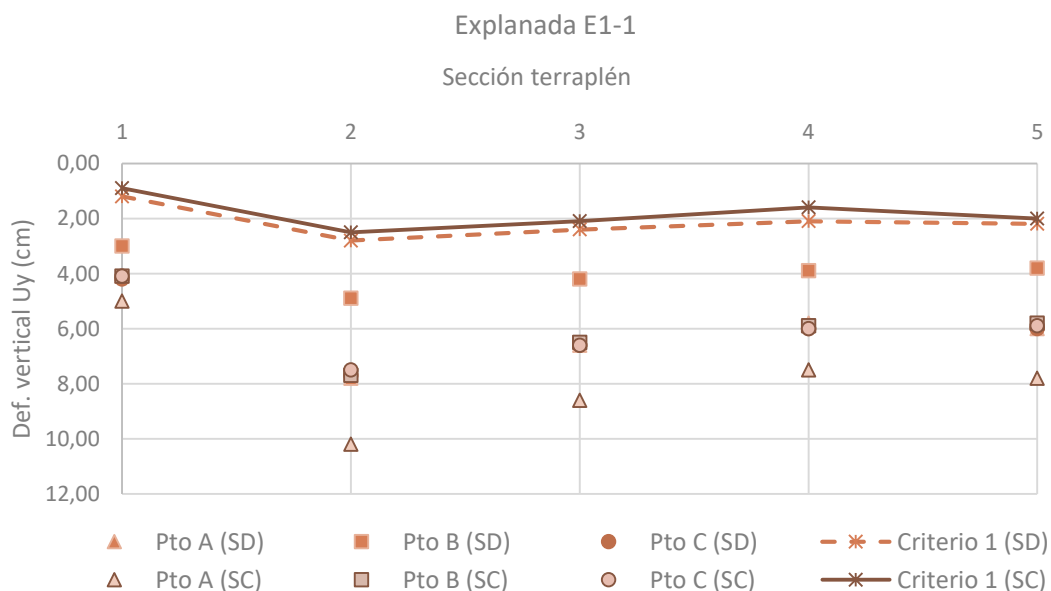


Figura 124. E1-1 def. vertical y asiento diferencial en función de la sobrecarga

En la Figura 124 se aprecia como las secciones que contienen NFU presentan una mayor deformación vertical en el centro del terraplén -punto A- respecto a los extremos (puntos B y C) en el caso de aplicación de

la sobrecarga completa, en comparación con la sección R1. Dicha diferencia entre los puntos A y B al considerar la aplicación de la sobrecarga completa oscila entre un 25,64% para la sección R5 a un 18% para la sección R1.

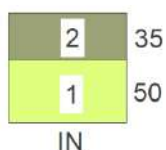
La menor deformación vertical se aprecia en las secciones del terraplén que contienen NFU en el punto B, al considerar sólo la aplicación de la sobrecarga en la mitad derecha de la explanada. Dicha diferencia entre el punto indicado y el punto opuesto -punto C- del terraplén oscila entre el 36,66% para la sección R5 a un 28,57% para la sección R1.

Finalmente aunque la aplicación de la sobrecarga completa en la explanada del terraplén, conlleve una mayor deformación vertical en el centro de este para todas las secciones, se observa como los asientos diferenciales son mayores en el caso de considerar la aplicación de la sobrecarga en la mitad derecha.

El valor porcentual de la desigualdad entre los asientos diferenciales en función de la aplicación de la sobrecarga es de un 9% para la sección R5 mientras que para la sección R1 se obtiene un 25% de diferencia, lo que indica que el comportamiento de esta última frente a sobrecargas de diferente alcance es peor al producirse una variación más acusada entre los asientos diferenciales.

La siguiente sección que presenta una menor diferencia entre los asientos diferenciales en función de la aplicación de la sobrecarga es la R2, con un 10,70%, aunque en esta sección puede llegar a alcanzar un **descenso vertical de hasta 10,2 cm** en el centro del terraplén. **Se concluye que para la sección R2 la deformación vertical en el punto A es un 50,98% mayor en comparación con el mismo punto de la sección R1.**

5.4.4.4 Explanada E1-2



Esta explanada de 85 cm de espesor de suelo adecuado (1) y seleccionado tipo dos (2) según clasificación del PG-3, se modela en capas de 25 cm de espesor para el suelo adecuado y de 17,5 cm de espesor para el suelo seleccionado tipo 2, situándose sobre suelos inadecuados (IN).

Con el fin de incluir las capas de la explanación para alcanzar la cota de coronación de 4 m, se incluyen las fases y el tiempo de consolidación estimado según se indica en la Tabla 113 para cada tipo de sección del terraplén.

Tabla 113. Definición fases sección R1, R2, R4 y R5 para la explanada E1-2

Sección R1, R2, R4 y R5

Fase	Tipo de cálculo	Altura final (m)	Tipo de carga	Tiempo [días]	Tiempo acumulado [días]
1	Consolidación	1 m	Etapa de construcción	13	13
2		1 m		17	30
3		2 m		13	43
4		2 m		17	60
5		3,10 m		13	73
6		3,10 m		17	90
7		3,35 m		3	93
8		3,35 m		4	97
9		3,60 m		3	100
10		3,60 m		4	104
11		3,80 m		3	107
12		3,80 m		4	110
13		4 m		3	113
14		4 m		4	117

15	Plástico	4 m		-	117
16	Seguridad	4 m	Mult. incrementales	-	-

En la Tabla 114 se indican los desplazamientos verticales al final de la consolidación de la explanada para los puntos A, B, C y D suponiendo la aplicación de la sobrecarga de tráfico en la mitad derecha y posteriormente izquierda del terraplén para la explanada E1-2.

Tabla 114. Deformación vertical en explanada E1-2; S.C. mitad derecha y completa

Sobrecarga	Sección terraplén	Fase	Deformación vertical (Uy) m			
			Punto A	Punto B	Punto C	Punto D
<i>Mitad derecha</i>	R1	10	-0,041	-0,029	-0,041	$-8,68 \cdot 10^{-3}$
	R2		-0,074	-0,046	-0,072	$-6,52 \cdot 10^{-3}$
	R3		-0,066	-0,042	-0,066	$-1,73 \cdot 10^{-3}$
	R4		-0,058	-0,039	-0,060	$-3,32 \cdot 10^{-3}$
	R5		-0,058	-0,035	-0,057	$-2,87 \cdot 10^{-3}$
<i>Completa</i>	R1		-0,050	-0,041	-0,041	-0,010
	R2		-0,099	-0,071	-0,072	$-8,63 \cdot 10^{-3}$
	R3		-0,086	-0,065	-0,066	$-1,90 \cdot 10^{-3}$
	R4		-0,075	-0,059	-0,060	$-4,02 \cdot 10^{-3}$
	R5		-0,078	-0,057	-0,059	$-3,20 \cdot 10^{-3}$

Tabla 115. Criterios de análisis deformación vertical explanada E1-2

Sobrecarga	Sección	Criterio 1 (cm)	Criterio 2	Criterio 3 (%)	Criterio 4 (F.S.)
<i>Mitad derecha</i>	R1	1,2	0,00075	0,80	1,380
	R2	2,6	0,00162	1,68	1,443
	R3	2,4	0,0015	1,60	1,480
	R4	2,1	0,00131	1,37	1,431
	R5	3,2	0,002	1,37	1,419
<i>Completa</i>	R1	0,9	0,00112	1	1,549
	R2	2,8	0,0035	2,26	1,460
	R3	2,1	0,0035	2,10	1,467
	R4	1,6	0,002	1,77	1,428
	R5	2,1	0,00262	1,87	1,423

Según indican los resultados de la Tabla 115, para el criterio 1, al igual que para la explanada E1-1 el mayor asiento diferencial se aprecia para la sección R2 seguida de la sección R3 que junto a la anterior considera la mayor cantidad de NFU en la composición del terraplén.

Respecto al criterio 2, al considerar la aplicación de la sobrecarga al completo actuando sobre la superficie de la explanada, el valor de distorsión angular supera en un 4,76% el límite establecido para la sección R2.

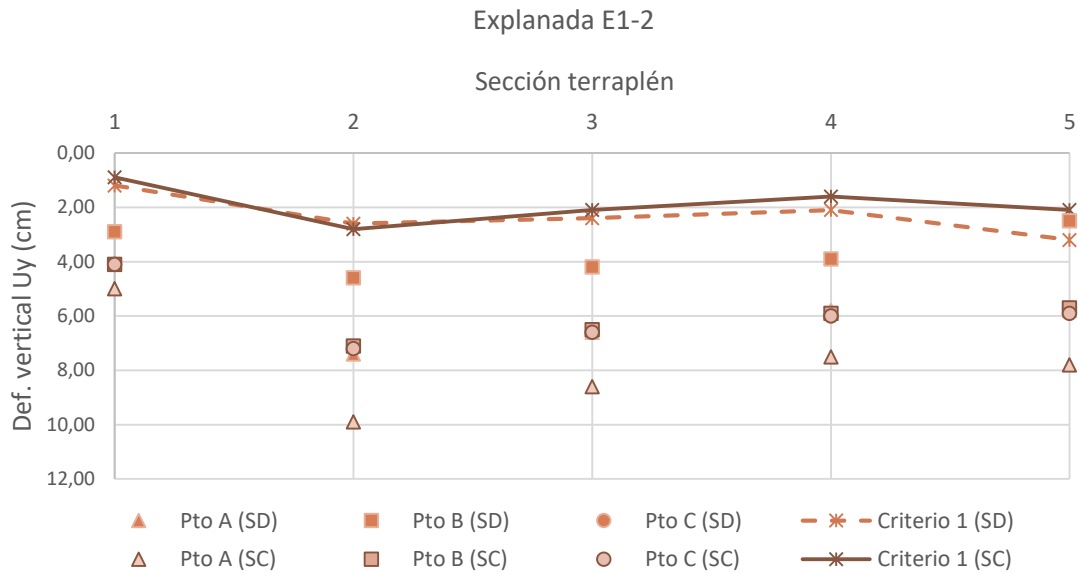


Figura 125. E1-2 def. vertical y asiento diferencial en función de la sobrecarga

En la Figura 125 se observa que las secciones que contienen NFU presentan una mayor deformación vertical en el centro del terraplén -punto A- respecto a los extremos -puntos B y C- en el caso de aplicación de la sobrecarga completa, en comparación con la sección R1. Dicha diferencia entre los puntos A y B al considerar la aplicación de la sobrecarga completa oscila entre un 26,92% para la sección R5 a un 18% para la sección R1.

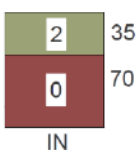
La **menor deformación vertical** se aprecia en el extremo del terraplén -**punto B**-, **opuesto a la aplicación de la sobrecarga en la mitad derecha de la explanada**. La diferencia entre el punto indicado respecto al punto C oscila entre el 56,14% para la sección R5 al 29,26% para la sección R1.

Finalmente, aunque la **aplicación de la sobrecarga completa** en la explanada **conlleve una mayor deformación vertical en el centro de este para todas las secciones**, los **asientos diferenciales son mayores al considerar la aplicación de la sobrecarga en la mitad derecha, salvo para la sección R2**.

La diferencia entre los asientos diferenciales en función de la aplicación de la sobrecarga es de un 34,35% para la sección R5 mientras que para la sección R1 se obtiene un 25% de diferencia, lo que indica que el comportamiento del terraplén convencional con esta explanada funciona mejor frente a sobrecargas de diferente alcance.

La siguiente sección que presenta menores diferencias en los asientos diferenciales en función de la aplicación de la sobrecarga es la **R2**, con un 7,69%, aunque en esta sección puede llegar a alcanzar un descenso vertical de hasta **9,9 cm en el centro del terraplén**. La sección que combina NFU y arena y que presenta una diferencia en el criterio 1 menor es la **R3**, con un **12,5% entre considerar la aplicación de la sobrecarga en la mitad derecha y al completo sobre la explanada E1-2**.

5.4.4.5 Explanada E1-3



Esta explanada de 70 cm de espesor de suelo tolerable (0) y 35 cm de suelo seleccionado tipo 2 (2) según clasificación del PG-3, se modela en capas de 17,5 cm de espesor para los suelos seleccionado tipo 2 y 23 cm de espesor para el suelo tolerable, situándose sobre suelos

IN

inadecuados (IN). Se incluyen las fases y el tiempo de consolidación estimado según se indica en la Tabla 116 para cada tipo de sección del terraplén.

Tabla 116. Definición fases sección R1, R2, R4 y R5 para la explanada E1-3

Sección R1, R2, R4 y R5

Fase	Tipo de cálculo	Altura final (m)	Tipo de carga	Tiempo [días]	Tiempo acumulado [días]
1	Consolidación	1 m	Etapa de construcción	13	13
2		1 m		17	30
3		2 m		13	43
4		2 m		17	60
5		3 m		13	73
6		3 m		17	90
7		3,20 m		2	92
8		3,20 m		3	95
9		3,40 m		2	97
10		3,40 m		3	100
11		3,60 m		2	102
12		3,60 m		3	105
13		3,80 m		2	107
14		3,80 m		3	110
15		4 m		2	112
16		4 m		3	115
17	Plástico	4 m	-	115	
18	Seguridad	4 m	Mult. incrementales	-	-

En la Tabla 117 se indican los desplazamientos verticales al final de la consolidación de la explanada para los puntos A, B, C y D suponiendo la aplicación de la sobrecarga de tráfico en la mitad derecha e izquierda del terraplén para la explanada E1-3.

Tabla 117. Deformación vertical puntos A, B, C y D explanada E1-3; S.C. mitad derecha y completa

Sobrecarga	Sección terraplén	Fase	Deformación vertical (Uy) m			
			Punto A	Punto B	Punto C	Punto D
Mitad derecha	R1	10	-0,044	-0,031	-0,045	-4,65·10 ⁻³
	R2		-0,084	-0,052	-0,082	-7,17·10 ⁻³
	R3		-0,071	-0,045	-0,071	-3,68·10 ⁻³
	R4		-0,063	-0,041	-0,064	-7,16·10 ⁻³
	R5		-0,065	-0,040	-0,064	-6,63·10 ⁻³
Completa	R1		-0,053	-0,043	-0,045	-5,22·10 ⁻³
	R2		-0,108	-0,080	-0,082	-8,21·10 ⁻³
	R3		-0,091	-0,069	-0,071	-4,29·10 ⁻³
	R4		-0,079	-0,062	-0,064	-8,34·10 ⁻³
	R5		-0,083	-0,062	-0,063	-7,98·10 ⁻³

Los resultados en base a los diferentes criterios de análisis planteados se incluyen en la Tabla 118 para cada una de las secciones del terraplén al considerar la explanada E1-3.

Tabla 118. Criterios de análisis en explanada E1-3 con capas horizontales

Sobrecarga	Sección	Criterio 1 (cm)	Criterio 2	Criterio 3 (%)	Criterio 4 (F.S.)
<i>Mitad derecha</i>	R1	1,4	0,000875	0,98	1,077
	R2	3	0,00187	1,92	1,076
	R3	2,6	0,00162	1,68	1,080
	R4	2,3	0,00143	1,39	1,070
	R5	2,4	0,0015	1,46	1,078
<i>Completa</i>	R1	1	0,00125	1,19	1,078
	R2	2,8	0,0035	2,49	1,075
	R3	2,2	0,00275	2,17	1,082
	R4	1,7	0,00212	1,76	1,077
	R5	2,1	0,00262	1,87	1,077

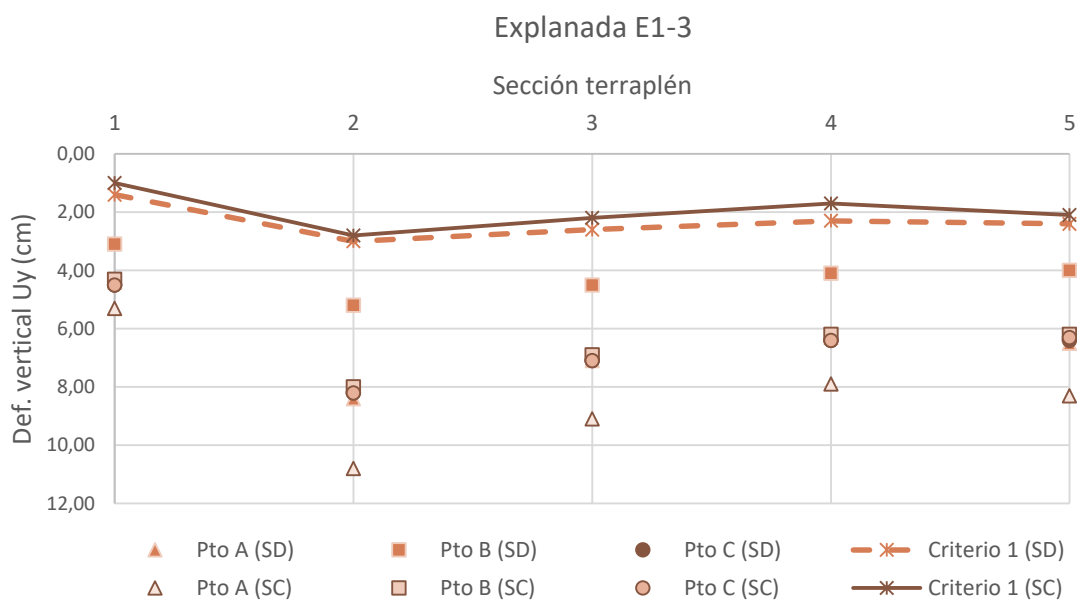


Figura 126. E1-3 def. vertical y asiento diferencial en función de la sobrecarga

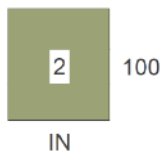
En la Figura 126 de nuevo las secciones que contienen **NFU** presentan una **mayor deformación vertical en el centro del terraplén** -punto A- respecto a los extremos -puntos B y C- en el caso de aplicación de la **sobrecarga completa**. Dicha diferencia entre los puntos A y B al considerar la aplicación de la sobrecarga completa oscila entre un 25,30% para la sección R5 a un 18,86% para la sección R1.

La menor deformación vertical aparece en el extremo del terraplén -punto B- opuesto a la aplicación de la sobrecarga en la mitad derecha de la explanada. La diferencia del punto B respecto al punto simétrico a este -punto C- se encuentra entre el 25,30% para la sección R5 a un 18,86% para la sección R1.

De nuevo los asientos diferenciales son mayores que en el caso de considerar la aplicación de la sobrecarga en la mitad derecha, aunque las deformaciones sean más acusadas al suponer la sobrecarga al completo. La diferencia entre los asientos diferenciales en función de la aplicación de la sobrecarga es de un 12,5% para la sección R5 mientras que para la sección R1 se obtiene un 28,57% de desigualdad, lo que indica que el comportamiento de esta última frente a sobrecargas de diferente alcance es menos favorable al presentar mayor variación los asientos diferenciales obtenidos. La siguiente sección que presenta menor distancia entre los asientos diferenciales en función de la aplicación de la sobrecarga es el terraplén **R2**, con un 6,67%, aunque en esta sección puede llegar a alcanzar un **descenso vertical** de hasta **10,8 cm** en el centro del terraplén. **La siguiente**

sección que combina NFU y arena y que presenta una menor desigualdad según el criterio 1, es la R3, con un 15,38% de diferencia, mientras que la sección R4 presenta una variación del 26,04%, similar a la sección R1.

5.4.4.6 Explanada E2-1



Esta explanada de 100 cm de espesor de suelo seleccionado tipo (2) según clasificación del PG-3, se modela en capas de 0,20 m de espesor, situándose sobre suelos inadecuados (IN).

Las fases y el tiempo de consolidación estimado para alcanzar la cota de coronación de 4 m coinciden con las fases desarrolladas para la explanada E1-1.

En la Tabla 119 se indican los desplazamientos verticales al final de la consolidación de la explanada para los puntos A, B, C y D suponiendo la aplicación de la sobrecarga de tráfico en la mitad derecha y al completo en el terraplén sobre la explanada E2-1.

Tabla 119. Deformación vertical en explanada E2-1; S.C. mitad derecha y completa

Sobrecarga	Sección terraplén	Fase	Deformación vertical (Uy) m			
			Punto A	Punto B	Punto C	Punto D
Mitad derecha	R1	10	-0,039	-0,028	-0,039	$-4,31 \cdot 10^{-3}$
	R2		-	-	-	-
	R3		-0,061	-0,039	-0,060	$-3,61 \cdot 10^{-3}$
	R4 (*)		-0,052	-0,036	-0,051	$-3,43 \cdot 10^{-3}$
	R5		-0,055	-0,035	-0,054	$-6,13 \cdot 10^{-3}$
Completa	R1		-0,047	-0,038	-0,039	$-5,14 \cdot 10^{-3}$
	R2		-	-	-	-
	R3		-0,081	-0,060	-0,060	$-4,40 \cdot 10^{-3}$
	R4		-	-	-	-
	R5		-0,074	-0,055	-0,054	$-6,98 \cdot 10^{-3}$

Para finalizar el cálculo de la sección R4 hubo que reducir la sobrecarga de tráfico a 20 kN/m² (*) en la mitad derecha, ya que ante cargas superiores y la aplicación de la sobrecarga completa se producía el colapso del suelo, según puede apreciarse en la Figura 127.

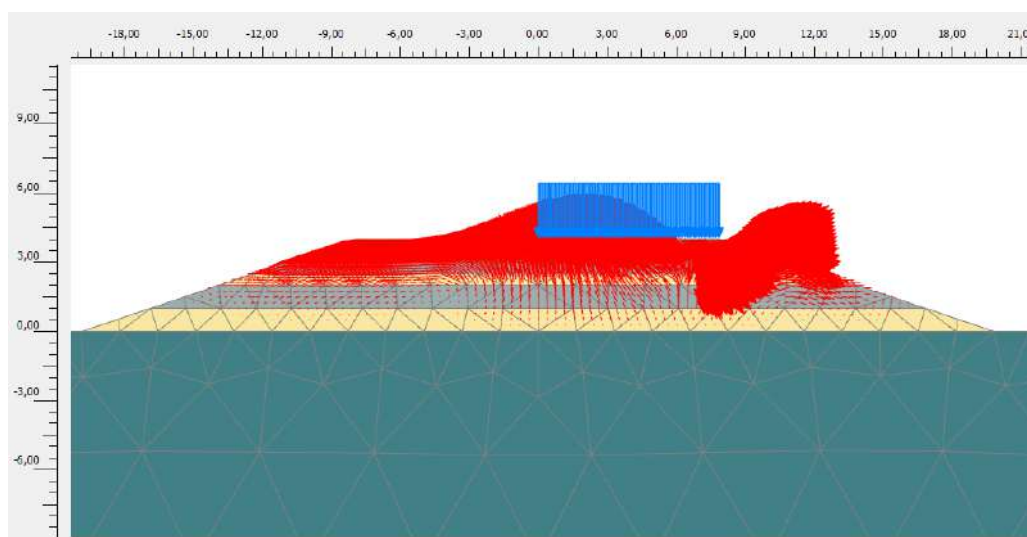


Figura 127. Desplazamientos incrementales totales (m) sección R4 explanada E2-1 S.C. 23 kN/m²

En la sección R2 fue necesario reducir la sobrecarga de tráfico a 18 kN/m², por lo que los resultados obtenidos no se incluyeron en la Tabla 120, que indica los principales resultados.

Tabla 120. Criterios de análisis en explanada E2-1 con capas horizontales

Sobrecarga	Sección	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3 (%)	Criterio 4 (F.S.)
Mitad derecha	R1	1,1	0,000687	0,87	1,381
	R2	-	-	-	-
	R3	2,1	0,00131	1,43	1,432
	R4	-	-	-	-
	R5	1,9	0,00118	1,21	1,421
Completa	R1	0,9	0,00112	1,22	1,258
	R2	-	-	-	-
	R3	2,1	0,00262	1,91	1,458
	R4	-	-	-	-
	R5	1,9	0,00237	1,67	1,469

Para el criterio 1 los mayores asientos diferenciales se observan en la sección R3, ya que la sección R2 no pudo finalizar el cálculo al igual que la sección R4.

Respecto al criterio 2, no se superan los valores límite en aquellas secciones que han finalizado el cálculo para la explanada E2-1, hecho que ocurre por primera vez si se comparan los resultados con las explanadas anteriores.

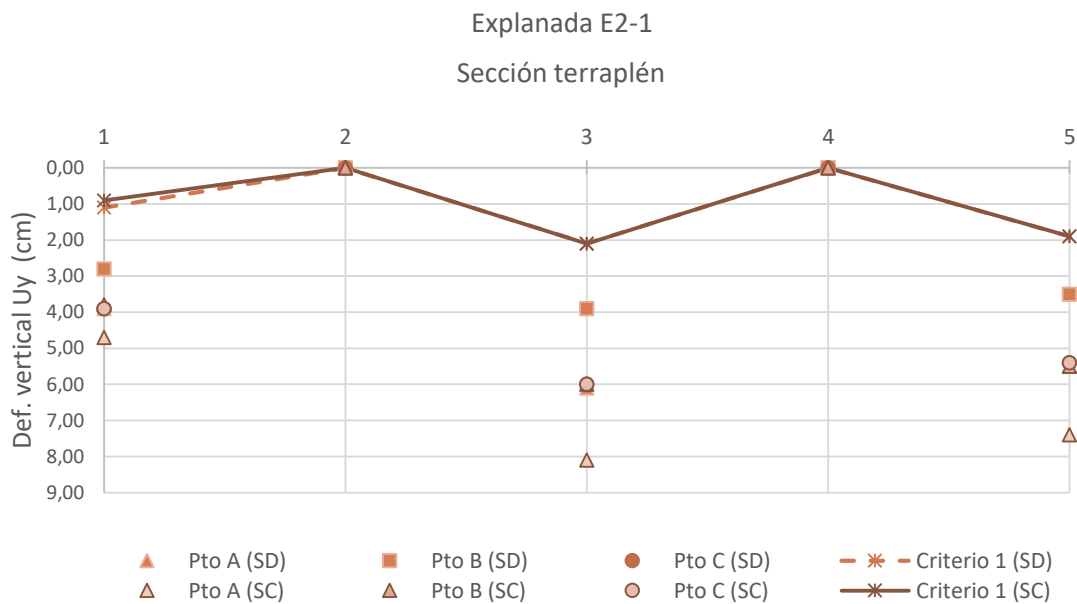


Figura 128. E2-1 def. vertical y asiento diferencial en función de la sobrecarga

En la Figura 128 de nuevo las secciones que contienen **NFU** presentan una **mayor deformación vertical en el centro del terraplén** -punto A- respecto a los extremos -puntos B y C- en el caso de aplicación de la sobrecarga completa. Dicha diferencia entre los puntos A y B al considerar la aplicación de la sobrecarga completa oscila entre un 25,92% para la sección R3 a un 19,14% para la sección R1.

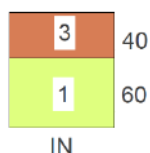
De igual forma ocurre en el caso de considerar la aplicación de la sobrecarga en la mitad derecha, observándose mayor deformación vertical en los puntos analizados en el caso de las secciones que contienen NFU en comparación con la sección R1.

Respecto a la menor deformación vertical se aprecia en el extremo del terraplén -punto B-, ubicado en el lado opuesto de la explanada en la que se aplica la mitad de la sobrecarga en el lado derecho. La diferencia entre el punto B y el punto simétrico oscila entre el 35,18% para la sección R5 a un 28,20% para la sección R1.

De nuevo la diferencia entre considerar la sobrecarga en la mitad derecha o al completo en la explanada no implica variación en los asientos diferenciales, observándose una leve desigualdad para la sección R1. Por lo tanto, no se aprecia ninguna repercusión según la hipótesis de aplicación de la sobrecarga, siendo esta diferencia nula para las secciones R3 y R5 mientras que para la sección R1 se obtiene un 18,18% de diferencia.

La sección **R3** puede llegar a alcanzar un descenso vertical de hasta **8,1 cm en el centro del terraplén**, mientras que para la sección **R1** el descenso vertical del punto A es de **4,7 cm**. Se concluye que para la sección R3 la deformación vertical en el punto A es un 41,97% mayor en comparación con el mismo punto de la sección R1.

5.4.4.7 Explanada E2-2



Esta explanada de 60 cm de espesor de suelo adecuado (1) y suelo seleccionado tipo tres (3) según clasificación del PG-3, se modela en capas de 20 cm de espesor, situándose sobre suelos inadecuados (IN), concretamente NFU.

Las fases y el tiempo de consolidación estimado para alcanzar la cota de coronación de 4 m coinciden con las fases desarrolladas para la explanada E1-1.

En la Tabla 121 se indican los desplazamientos verticales al final de la consolidación de la explanada para los puntos A, B, C y D suponiendo las mismas hipótesis de aplicación de la sobrecarga de tráfico sobre la explanada E2-2.

Tabla 121. Deformación vertical en explanada E2-2; S.C. mitad derecha y completa

Sobrecarga	Sección terraplén	Fase	Deformación vertical (Uy) m			
			Punto A	Punto B	Punto C	Punto D
Mitad derecha	R1	10	-0,040	-0,029	-0,042	$-8,96 \cdot 10^{-3}$
	R2		-0,076	-0,048	-0,075	-0,014
	R3		-0,064	-0,041	-0,065	$-1,53 \cdot 10^{-3}$
	R4		-0,057	-0,038	-0,058	$-3,43 \cdot 10^{-3}$
	R5		-0,058	-0,037	-0,058	$-3,09 \cdot 10^{-3}$
Completa	R1		-0,050	-0,040	-0,041	-0,010
	R2		-0,099	-0,074	-0,074	-0,016
	R3		-0,084	-0,064	-0,064	$-2,16 \cdot 10^{-3}$
	R4		-0,072	-0,058	-0,058	$-3,89 \cdot 10^{-3}$
	R5		-0,076	-0,057	-0,058	$-3,55 \cdot 10^{-3}$

Los resultados obtenidos en base a los distintos criterios para la explanada E2-2, se indican en la Tabla 122.

Tabla 122. Criterios de análisis en explanada E2-2 con capas horizontales

Sobrecarga	Sección	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3 (%)	Criterio 4 (F.S.)
<i>Mitad derecha</i>	R1	1,3	0,000812	0,77	1,715
	R2	2,7	0,00168	1,55	1,676
	R3	2,4	0,0015	1,56	1,641
	R4	2	0,00125	1,34	1,654
	R5	2,1	0,00131	1,37	1,674
<i>Completa</i>	R1	1	0,00125	1	1,632
	R2	2,5	0,00312	2,07	1,678
	R3	2	0,0025	2,04	1,667
	R4	1,4	0,00175	1,70	1,671
	R5	1,9	0,00237	1,81	1,681

Para el criterio 1 los mayores asientos diferenciales se observan en la sección R2 y R3 al igual que en los casos de explanación anteriores.

Respecto al criterio 2, no se superan los valores límite para la explanada E2-2, por lo que pueden considerarse aceptables los valores de distorsión angular obtenidos para esta explanación en todas las secciones de terraplén analizadas.

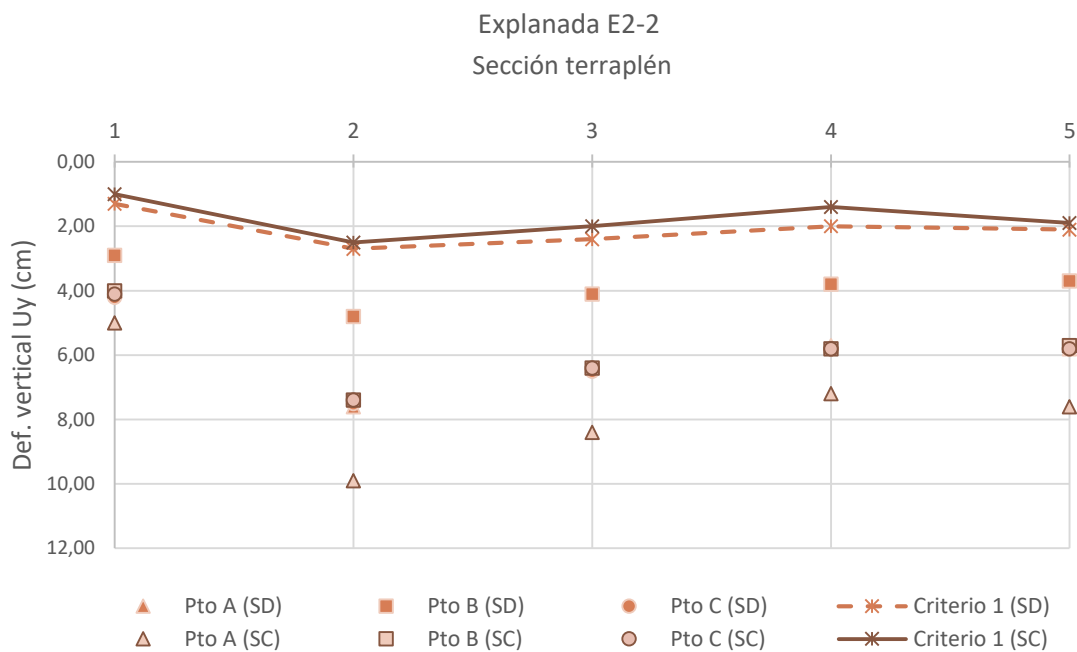


Figura 129. E2-2 def. vertical y asiento diferencial en función de la sobrecarga

En la Figura 129 se observa como las secciones que contienen **NFU** presentan una **mayor deformación vertical en el centro del terraplén** -punto A- respecto a los extremos -puntos B y C- en el caso de considerar la **aplicación de la sobrecarga completa**. Dicha diferencia entre los puntos A y B al considerar la aplicación de la sobrecarga completa oscila entre un 25,25% para la sección R2 a un 20% para la sección R1.

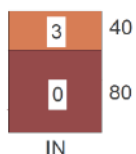
Hecho similar se aprecia en el caso de aplicar la sobrecarga en la mitad derecha, observándose mayores diferencias en la deformación vertical de los puntos analizados en el caso de las secciones que contienen NFU en comparación con la sección R1.

La **menor deformación vertical** aparece en el extremo del terraplén **-punto B-**, opuesto a la aplicación de la **sobrecarga en la mitad derecha** de la explanada. Dicha diferencia respecto al punto C simétrico del terraplén oscila entre el 36,92% para la sección R3 a un 30,95% para la sección R1.

Aunque la aplicación de la **sobrecarga completa en la explanada conlleve una mayor deformación vertical en el centro de este para todas las secciones, los asientos diferenciales son menores que en el caso de considerar la aplicación de la sobrecarga en la mitad derecha de la explanada.** La variación entre los asientos diferenciales en función de la zona de aplicación de la sobrecarga considerada es de un 7,40% para la sección R2 y de un **9,52% para la sección R5** mientras que para la sección **R1** se obtiene un **23% de diferencia**, lo que indica que el comportamiento de esta última frente a sobrecargas de diferente alcance es menos estable al presentar una desigualdad superior. La siguiente sección que presenta menor variación es la R3 con un 16,67%, mientras que en último lugar se encuentra la sección R4 con un 30% de variación entre el asiento diferencial obtenido por la aplicación de la sobrecarga en la mitad derecha y al completo en la explanada.

La sección del terraplén **R2** puede llegar a alcanzar un descenso vertical de hasta **9,9 cm** en el centro del terraplén al considerar la aplicación completa de la sobrecarga, similar a la sección R5, donde la deformación vertical es de 7,6 cm, mientras que para la sección R1 el descenso vertical en el punto A es de 5 cm al considerar la aplicación de la sobrecarga completa. Por lo tanto, se concluye que **la deformación vertical de este punto para la sección R2 es un 49,50% superior a la deformación obtenida en la sección R1.**

5.4.4.8 Explanada E2-3



Esta explanada de 80 cm de espesor de suelo tolerable (0) y 40 cm de suelo seleccionado tipo tres (3) según clasificación del PG-3, se modela en capas de 20 cm de espesor, situándose sobre suelos inadecuados (IN). Al tratarse de una explanada de mayor espesor se eliminan 20 cm de material tipo NFU para incorporar una capa más de explanación a la geometría final.

Con el fin de incluir las capas de la explanación para alcanzar la cota de coronación de 4 m, se incluyen las fases y el tiempo de consolidación estimado según se indica en la Tabla 123 para cada tipo de sección del terraplén. La única diferencia respecto a la explanada E1-1 es que se incrementa el tiempo de consolidación en 5 días.

Tabla 123. Definición fases sección R1, R2, R3 y R5 para la explanada E2-3

Sección R1, R2, R4 y R5

Fase	Tipo de cálculo	Altura final (m)	Tipo de carga	Tiempo [días]	Tiempo acumulado [días]
1	Consolidación	1 m	Etapa de construcción	13	13
2		1 m		17	30
3		2 m		13	43
4		2 m		17	60
5		2,80 m		13	73
6		2,80 m		17	90
7		3 m		2	92
8		3 m		3	95
9		3,20 m		2	97
10		3,20 m		3	100
11		3,40 m		2	102
12		3,40 m		3	105
13		3,60 m		2	107
14		3,60 m		3	110

15		3,80 m		2	112
16		3,80 m		3	115
17		4 m		2	117
18		4 m		3	120
19	Plástico	4 m		-	120
20	Seguridad	4 m	Mult. incrementales	-	-

En la Tabla 124 se indican los desplazamientos verticales al final de la consolidación de la explanada para los puntos A, B, C y D suponiendo la aplicación de la sobrecarga de tráfico en la mitad derecha del terraplén para la explanada E2-3.

Tabla 124. Deformación vertical en explanada E2-3; S.C. mitad derecha y completa

Sobrecarga	Sección terraplén	Fase	Deformación vertical (Uy) m			
			Punto A	Punto B	Punto C	Punto D
Mitad derecha	R1	10	-0,042	-0,031	-0,043	$-4,27 \cdot 10^{-3}$
	R2		-0,084	-0,055	-0,084	$-7,52 \cdot 10^{-3}$
	R3		-0,071	-0,047	-0,072	$-3,83 \cdot 10^{-3}$
	R4		-0,061	-0,042	-0,064	$-3,88 \cdot 10^{-3}$
	R5		-0,063	-0,042	-0,065	$-3,21 \cdot 10^{-3}$
Completa	R1		-0,051	-0,042	-0,043	$-5,49 \cdot 10^{-3}$
	R2		-0,106	-0,082	-0,084	$-9,38 \cdot 10^{-3}$
	R3		-0,089	-0,069	-0,072	$-4,13 \cdot 10^{-3}$
	R4		-0,076	-0,061	-0,064	$-4,40 \cdot 10^{-3}$
	R5		-0,080	-0,062	-0,065	$-3,88 \cdot 10^{-3}$

Los principales resultados en base a los criterios de evaluación se indican en la Tabla 125 para la explanada E2-3, según el tipo de sección del terraplén.

Tabla 125. Criterios de análisis en explanada E2-3 con capas horizontales

Sobrecarga	Sección	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3 (%)	Criterio 4 (F.S.)
Mitad derecha	R1	1,2	0,00075	0,94	1,063
	R2	2,9	0,00181	1,91	1,063
	R3	2,5	0,00156	1,68	1,063
	R4	2,2	0,00137	1,43	1,063
	R5	2,3	0,00143	1,50	1,058
Completa	R1	0,9	0,00112	1,14	1,063
	R2	2,4	0,003	2,41	1,057
	R3	2,0	0,0025	2,12	1,059
	R4	1,5	0,00187	1,79	1,063
	R5	1,8	0,00225	1,90	1,053

Los resultados obtenidos para el criterio 1 indican **asientos diferenciales elevados** tanto para la aplicación de la **sobrecarga en la mitad derecha con la totalidad de la explanada** en las secciones tipo **R2 y R3**, de la misma forma que ocurría en las explanaciones anteriores.

En cuanto al criterio 2 el valor más ajustado se presenta en la sección R2 al considerar la aplicación completa de la sobrecarga y analizar el valor de la distorsión angular entre el centro del terraplén -punto A- y el extremo izquierdo -punto B-.

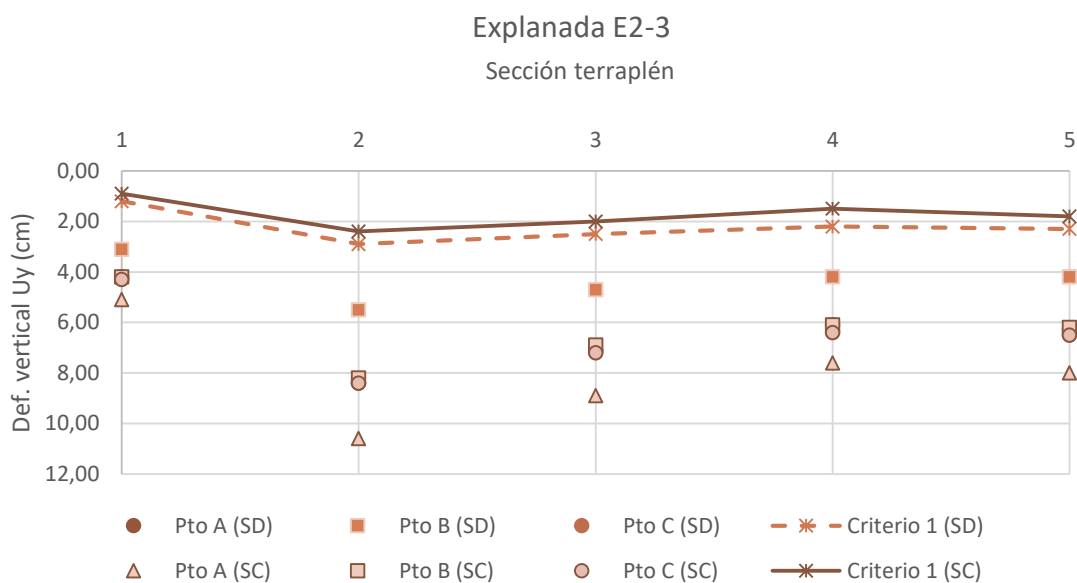


Figura 130. E2-3 def. vertical y asiento diferencial en función de la sobrecarga

En la Figura 130 se indica que las secciones que contienen **NFU** presentan una **mayor deformación vertical en el centro del terraplén -punto A-** respecto a los extremos -puntos B y C- en el caso de considerar la **aplicación de la sobrecarga completa**. Dicha desigualdad entre los puntos A y B al aplicarse la sobrecarga de tráfico de forma completa oscila entre un 22,64% para la sección R2 a un 17,64% para la sección R1.

De nuevo en el caso de aplicar la **sobrecarga en la mitad derecha**, se observan **mayores diferencias en la deformación vertical de los puntos analizados en aquellas secciones que contienen NFU** en comparación con la sección R1, constituida de material convencional.

La **menor deformación vertical** aparece en el extremo del terraplén, en el **punto B** opuesto a la aplicación de la **sobrecarga en la mitad derecha de la explanada**. Dicha diferencia respecto al punto simétrico a este -punto C- del terraplén oscila entre el 34,52% para la sección R2 a un 27,90% para la sección R1.

Aunque la aplicación de la **sobrecarga completa** en la explanada conlleve una **mayor deformación vertical** en el centro de este para todas las secciones, **los asientos diferenciales son menores que en el caso de considerar la aplicación de la sobrecarga en la mitad derecha**. La desigualdad entre los asientos diferenciales en base a la zona de aplicación de la sobrecarga de tráfico considerada es de un 17,24% para la sección R2 y de un 21,74% para la sección R5 mientras que para la sección R1 se obtiene un 25%, lo que indica que el comportamiento de esta última frente a sobrecargas de diferente alcance es más desfavorable.

La sección del terraplén **R2** puede llegar a alcanzar un **descenso vertical de hasta 10,6 cm** en el centro del terraplén actuando la sobrecarga completa, similar a la **sección R5**, donde la deformación vertical es de **8 cm**, mientras que para la sección R1 el descenso vertical en el punto A es de 5,1 cm, es decir, un 51,88% superior.

5.4.5 Caracterización e hipótesis de cálculo en PLAXIS 2D V20 de explanadas para firmes sobre terraplenes modificados

En este apartado se modifica la geometría de las capas horizontales que componen cada una de las secciones del terraplén según la “Aplicación 2” según muestra la Figura 131, para posteriormente incorporar los distintos paquetes de explanación, y considerar la aplicación de la sobrecarga de tráfico (23 kN/m^2) en primer lugar en el lado derecho y posteriormente en el lado izquierdo, lo que supone la aplicación de la sobrecarga al completo sobre la coronación del terraplén.

La modificación de la geometría de los sustratos que componen el terraplén permite disminuir la deformación vertical en el centro del mismo respecto a los extremos, cuando se considera la aplicación de la sobrecarga de tráfico al completo.

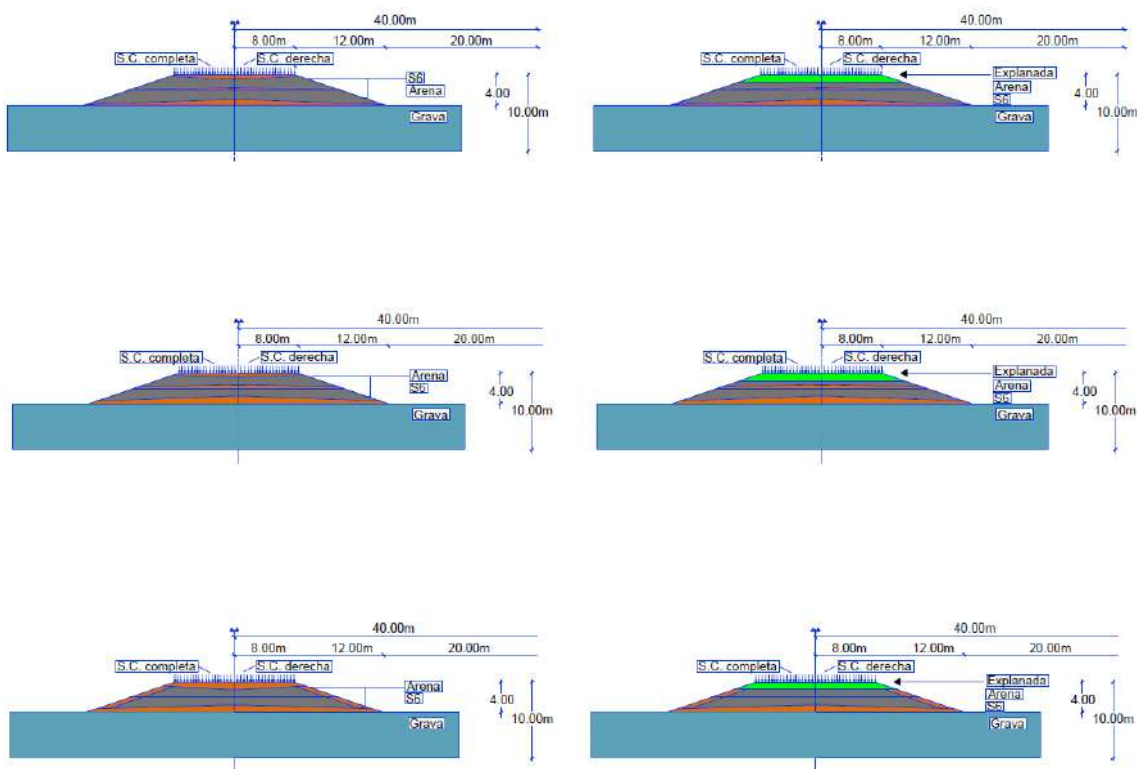


Figura 131. Hipótesis de cálculo explanadas para la colocación de un firme estratos no horizontales

Respecto a las condiciones iniciales y de contorno del modelo se consideran las mismas premisas que en el caso de ejecutar los estratos del terraplén completamente horizontales. La principal diferencia respecto a la geometría de los estratos, consiste en **aumentar el espesor de la capa de material convencional en el centro del terraplén**, de forma que se **disminuyan los desplazamientos verticales en esa zona**.

Únicamente se analizan las secciones R3, R4 y R5 según la Figura 132, la Figura 133 y la Figura 134, ya que tanto la sección R1 y R2 compuesta por arena y por NFU respectivamente, están constituidas por un único Módulo de Young (E') y coeficiente de Poisson.

En la Tabla 126 se indica el porcentaje respecto a la superficie total que compone cada uno de los materiales considerados en las secciones según cada tipo de terraplén, tanto en las hipótesis iniciales donde los estratos eran horizontales, como en las hipótesis con diferente espesor por estratos.

Tabla 126. Porcentaje en base a la composición material de las secciones tipo terraplén

Sección	Estratos terraplén horizontales		Estratos terraplén inclinados	
	% de Arena	% de NFU	% de Arena	% de NFU
R1	100%	0%	100%	0%
R2	0%	100%	0%	100%
R3	30,74%	69,25%	25,11%	74,88%
R4	52,67%	47,33%	37,60%	62,39%
R5	55,19%	44,80%	46,73%	53,26%

Por lo tanto, observando la Tabla 126 se concluye que al modificar la geometría de los estratos que componen cada una de las secciones del terraplén, se ha aumentado el porcentaje de material tipo NFU respecto al material convencional, ya que aunque se haya aumentado el espesor de la capa de este último en el centro del terraplén, en los extremos se ha disminuido, con el objetivo de disminuir los asentamientos diferenciales.

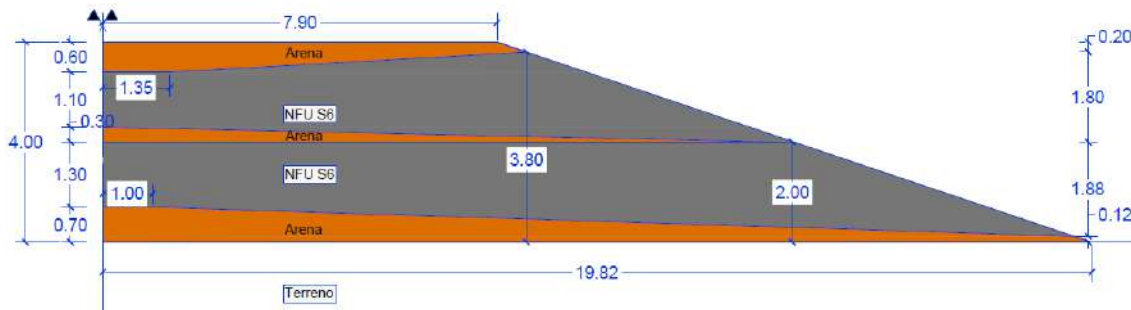


Figura 132. Sección R3 sin explanada (SE) con capas del terraplén no horizontales

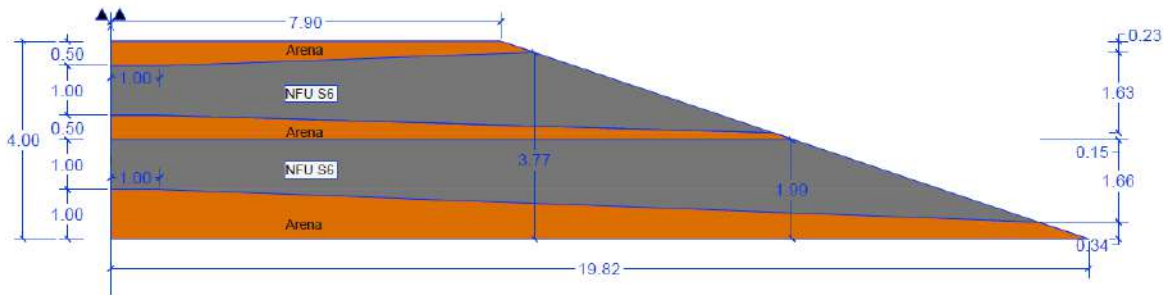


Figura 133. Sección R4 sin explanada (SE) con capas del terraplén no horizontales

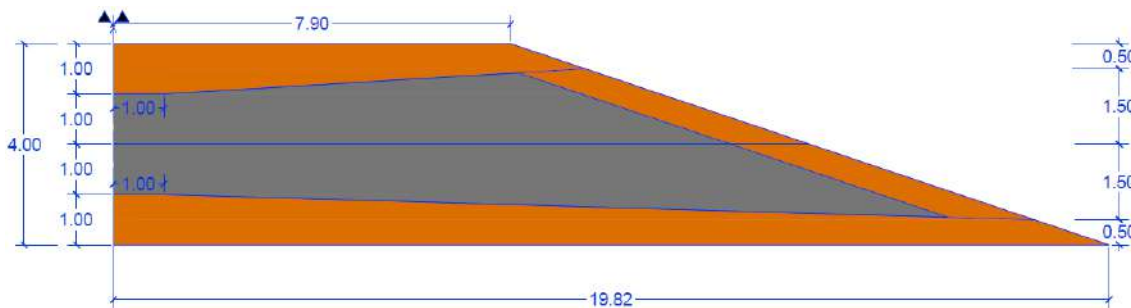


Figura 134. Sección R5 sin explanada (SE) con capas del terraplén no horizontales

Al igual que en el caso de considerar la estratigrafía del terraplén en capas horizontales, se supone la ejecución del terraplén en cuatro estratos y sobre este, la ejecución de la explanada en capas de no más de 25 cm de espesor hasta alcanzar los 4 m de altura.

La construcción de las capas del terraplén en este apartado supone las mismas condiciones que en el caso de considerar las capas del terraplén horizontales. El desarrollo de ejecución de la explanada considera las mismas condiciones que en el apartado anterior. Igualmente, se considera la aplicación de una sobrecarga de tráfico de 23 kN/m² en el lado derecho del terraplén, y en segundo lugar en toda la coronación de este. La última fase constituye un análisis de estabilidad para la obtención del factor de seguridad en función de la aplicación de la sobrecarga.

5.4.5.1 Sección R3; R4 y R5 sin explanada

En este apartado se aplica la sobrecarga de tráfico sin contemplar ningún tipo de explanación sobre la coronación del terraplén según la nueva geometría. En la Tabla 127 se indican los desplazamientos verticales suponiendo la aplicación de la sobrecarga de tráfico en la mitad derecha y por último, la sobrecarga de tráfico completa para los puntos A, B, C y D en ausencia de la explanada (SE).

Tabla 127. Deformación vertical sin explanada en sección R3, R4 y R5 con capas no horizontales

Def. vertical (Uy)	Sección	Punto A	Punto B	Punto C	Punto D
<i>Aplicación S.C. sobre mitad derecha</i>	R3	-0,058	-0,029	-0,049	-3,21·10 ⁻³
	R4	-0,055	-0,029	-0,054	-6,26·10 ⁻³
	R5	-0,061	-0,034	-0,058	-3,25·10 ⁻³
<i>Aplicación S.C. completa</i>	R3	-0,079	-0,053	-0,053	-3,99·10 ⁻³
	R4	-0,076	-0,053	0,053	-8,10·10 ⁻³
	R5	-0,081	-0,057	-0,055	-3,96·10 ⁻³

Una vez obtenidos los resultados se analizan los criterios de evaluación considerados anteriormente, según se indican en la Tabla 128.

Tabla 128. Criterios de análisis explanada con capas no horizontales en el terraplén

Sobrecarga	Sección terraplén	Criterio 1 (cm)	Criterio 2	Criterio 3 (%)	Criterio 4 (F.S.)
<i>Mitad derecha</i>	R3	2,0	0,00125	1,37	1,204
	R4	2,5	0,00156	1,22	1,145
	R5	2,4	0,0015	1,44	1,235
<i>Completa</i>	R3	2,6	0,00325	1,87	1,186
	R4	2,3	0,00287	1,70	1,142
	R5	2,4	0,003	1,92	1,263

El **mayor asiento diferencial** (criterio 1) se observan en la sección **R4**, al considerar la aplicación de la **sobrecarga de tráfico en la mitad derecha**, mientras que al considerar la **sobrecarga en la superficie completa** de la explanada, el mayor asiento diferencial se observa en la sección **R3**. En el primer caso, la deformación vertical del punto B es un 46,29% inferior a la deformación vertical del punto C simétrico. En el segundo caso, la deformación vertical del punto B es un 32,91% inferior respecto al centro del terraplén -punto A-, observándose en la Figura 135 y en la Figura 136 la principal dirección de los desplazamientos verticales en la sección R3.

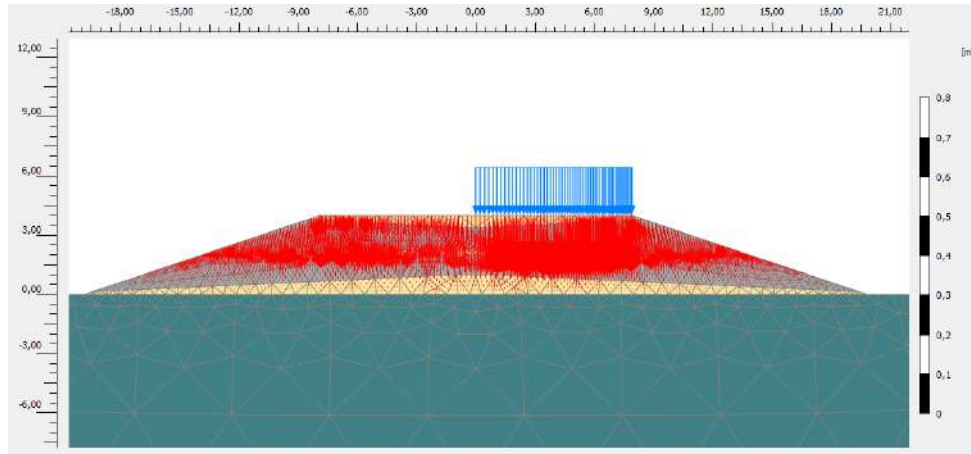


Figura 135. Desplazamientos totales verticales U_y aplicación sobrecarga mitad derecha (SD) sección R3

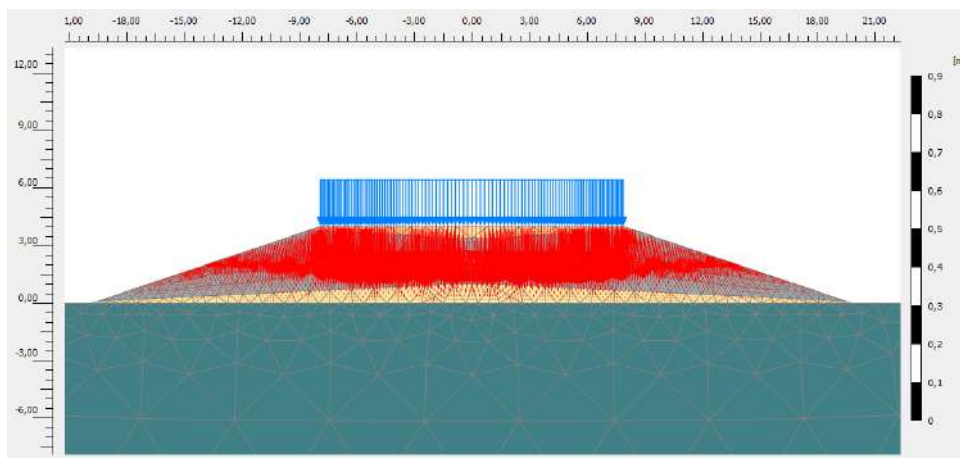


Figura 136. Desplazamientos totales verticales U_y aplicación sobrecarga completa (SC) sección R3

En la Figura 137 se aprecia como en las secciones analizadas (R3, R4 y R5) la **diferencia entre los puntos A y B** al considerar la aplicación de la **sobrecarga completa**, oscila entre un **29,62%** en la **sección R5** a un **32,91%** para la **sección R3**. Mientras que en el caso de considerar la **sobrecarga actuando sobre la mitad derecha del terraplén**, la diferencia entre los **puntos B y C** es de un **40.81%** para la **sección R3** y de un **41.38%** para la **sección R5**.

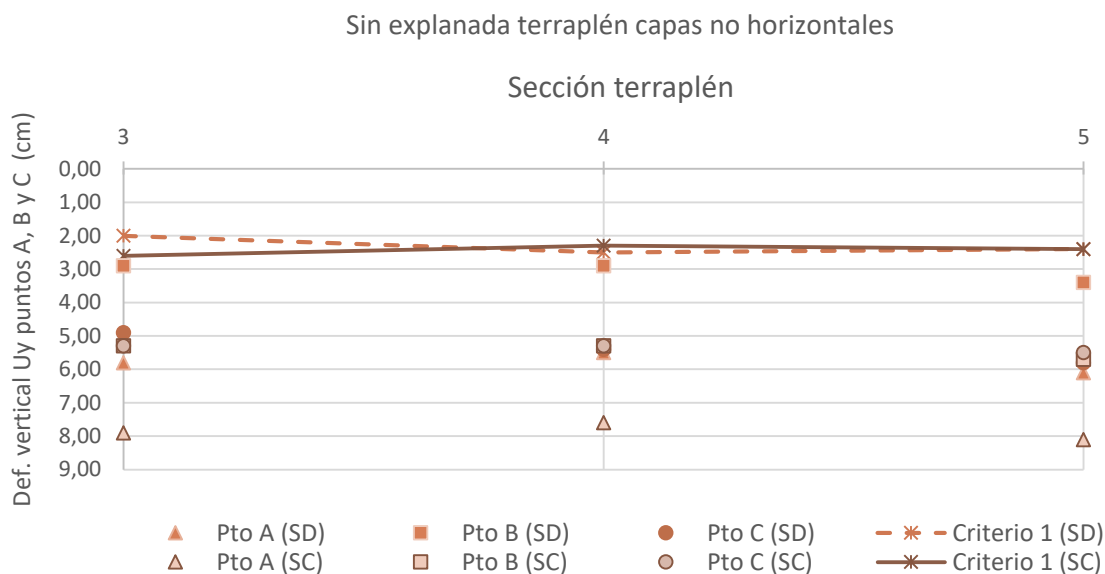


Figura 137. Def. vertical sin explanada y asiento diferencial con S.D. y S.C. sin capas horizontales

La aplicación de la sobrecarga de tráfico completa en la explanada del terraplén, implica una mayor deformación vertical en el centro de este para todas las secciones. La sección del terraplén R5 puede llegar a alcanzar un **descenso vertical de hasta 8,1 cm en el centro** de este, similar a la sección R3 y R4 donde la deformación vertical es de **7,9 cm y 7,6 cm** respectivamente.

Los asientos diferenciales son similares al considerar la sobrecarga actuando en el lado derecho o en la totalidad de la explanada. **La diferencia entre estos asientos en función de la consideración de la sobrecarga es de un 30% para la sección R3, de un 8% para la sección R4 y nula para la sección R5.**

En los siguientes apartados se analizan cada uno de los criterios y deformaciones verticales, una vez ejecutado el sustrato de la explanada, de forma que los resultados obtenidos puedan compararse finalmente con la hipótesis desarrollada en este apartado que no considera ningún tipo de explanada sobre la coronación del terraplén y además, con los resultados obtenidos en el caso de considerar **la ejecución de las secciones con capas del terraplén en capas horizontales.**

5.4.5.2 Explanada E1-1 terraplén con capas no horizontales

En este apartado se aplica la sobrecarga de tráfico contemplando la ejecución de la explanada tipo E1-1 sobre la coronación del terraplén según la nueva geometría de las capas de la sección R3; R4 y R5.

En la Tabla 129 se indican los desplazamientos verticales al final de la consolidación de la explanada para los puntos A, B, C y D suponiendo la aplicación de la sobrecarga de tráfico en la mitad derecha del terraplén y por último, en la totalidad de la superficie de explanación.

Tabla 129. Deformación vertical E1-1 en sección R3, R4 y R5 con capas no horizontales

Sobrecarga	Sección terraplén	Deformación vertical (Uy) m			
		Punto A	Punto B	Punto C	Punto D
Mitad derecha (SD)	R3	-0,061	-0,042	-0,065	$-6,83 \cdot 10^{-3}$
	R4	-0,060	-0,041	-0,064	$-7,10 \cdot 10^{-3}$
	R5	-0,061	-0,039	-0,062	$-3,36 \cdot 10^{-3}$

Completa (SC)	R3	-0,078	-0,064	-0,066	$-8,26 \cdot 10^{-3}$
	R4	-0,076	-0,064	-0,063	$-8,56 \cdot 10^{-3}$
	R5	-0,079	-0,062	-0,063	$-4,07 \cdot 10^{-3}$

Tabla 130. Criterios de análisis explanada E1-1 terraplén con capas no horizontales

Sobrecarga	Sección	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3 (%)	Criterio 4 (F.S.)
Mitad derecha (SD)	R3	2,3	0,00143	1,34	1,132
	R4	2,3	0,00143	1,32	1,141
	R5	2,3	0,00143	1,43	1,143
Completa (SC)	R3	1,4	0,00175	1,74	1,137
	R4	1,2	0,0015	1,68	1,136
	R5	1,7	0,00212	1,87	1,136

Como se observa en la Tabla 130, los mayores asientos diferenciales (criterio 1) son iguales para las secciones R3, R4 y R5, al considerar la aplicación de la sobrecarga de tráfico en la mitad derecha, mientras que al considerar la **sobrecarga en la superficie completa de la explanada**, el mayor asiento diferencial se observa en la sección R5.

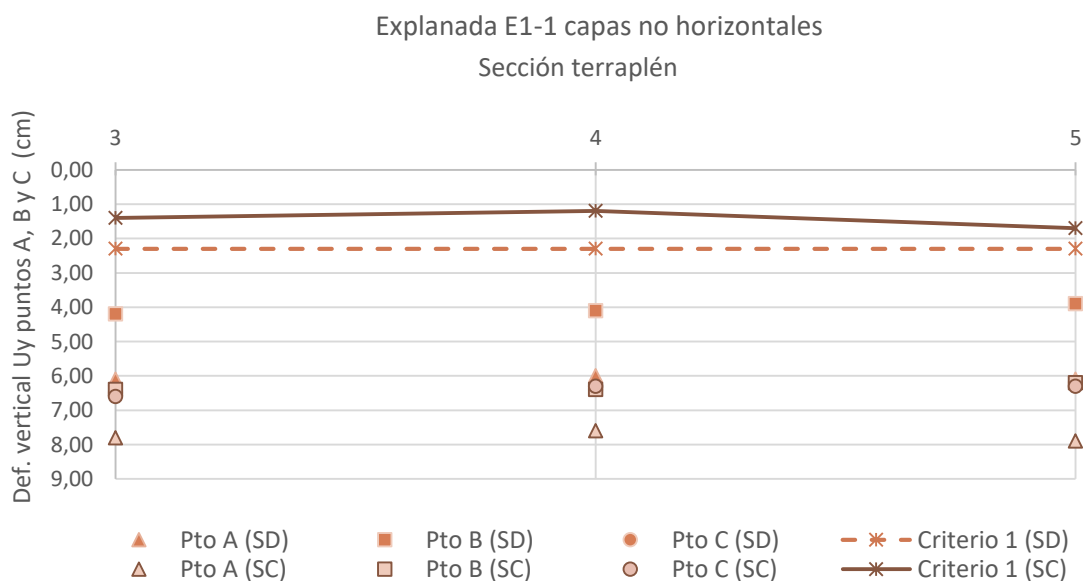


Figura 138. Def. vertical E1-1 y asiento diferencial con S.D. y S.C. en terraplén sin capas horizontales

En la Figura 138 se aprecia como la **deformación vertical del punto A**, en el centro del terraplén, es más elevada respecto a los extremos -puntos B y C-, en el caso de aplicación de la **sobrecarga completa**. La deformación vertical del punto B presenta un valor del 21,51% de diferencia en la sección R5 y un 17,98% en la sección R3 respecto al centro del terraplén -punto A-.

La **menor deformación vertical** se aprecia en el **punto B**, al considerar sólo la aplicación de la **sobrecarga en la mitad derecha de la explanada**. La deformación vertical de este punto es un 35,38% inferior a la deformación vertical del punto C simétrico en la sección R3.

Finalmente aunque la aplicación de la sobrecarga completa en la explanada del terraplén, conlleve una mayor deformación vertical en el centro de este para todas las secciones, se observa como los asientos diferenciales son mayores e iguales en el caso de considerar la aplicación de la sobrecarga en la mitad derecha.

El valor porcentual de la variación entre los asientos diferenciales en función de la aplicación de la sobrecarga es de un 26,08% para la sección R5 mientras que para la sección R3 se obtiene un 39,13% de diferencia.

La sección R4 presenta una mayor diferencia entre los asientos diferenciales en función de la aplicación de la sobrecarga con un 47,82%, aunque en esta sección el descenso vertical del punto A es la menor con 7,6 cm.

5.4.5.3 Explanada E1-2 terraplén capas no horizontales

En este apartado se aplica la sobrecarga de tráfico contemplando la ejecución de la explanada tipo E1-2 sobre la coronación del terraplén compuesto por capas de diferente espesor. En la Tabla 131 se indican los desplazamientos verticales al final de la consolidación de la explanada para los puntos A, B, C y D en función de la sobrecarga de tráfico.

Tabla 131. Deformación vertical E1-2 en sección R3, R4 y R5 con capas no horizontales

Sobrecarga	Sección terraplén	Deformación vertical (Uy) m			
		Punto A	Punto B	Punto C	Punto D
<i>Mitad derecha (SD)</i>	R3	-0,059	-0,039	-0,062	$-6,57 \cdot 10^{-3}$
	R4	-0,058	-0,039	-0,061	$-6,81 \cdot 10^{-3}$
	R5	-0,058	-0,037	-0,060	$-6,19 \cdot 10^{-3}$
<i>Completa (SC)</i>	R3	-0,077	-0,063	-0,062	$-7,93 \cdot 10^{-3}$
	R4	-0,075	-0,061	-0,061	$-8,23 \cdot 10^{-3}$
	R5	-0,078	-0,060	-0,060	$-7,85 \cdot 10^{-3}$

Tabla 132. Criterios de análisis explanada E1-2 terraplén con capas no horizontales

Sobrecarga	Sección	Criterio 1 (cm)	Criterio 2	Criterio 3 (%)	Criterio 4 (F.S.)
<i>Mitad derecha (SD)</i>	R3	2,3	0,00143	1,31	1,401
	R4	2,2	0,00137	1,27	1,421
	R5	2,3	0,00143	1,29	1,398
<i>Completa (SC)</i>	R3	1,4	0,00175	1,72	1,419
	R4	1,4	0,00175	1,67	1,412
	R5	1,8	0,00225	1,75	1,413

Los mayores asientos diferenciales (criterio 1) son iguales para las secciones R3, R4 y R5, al considerar la aplicación de la sobrecarga de tráfico en la mitad derecha, mientras que al considerar la sobrecarga en la superficie completa de la explanada, el mayor asiento diferencial se observa en la sección R5. Estos resultados son similares a los obtenidos para la explanada E1-1 en el apartado anterior, según los resultados de la Tabla 132.

Explanada E1-2 capas no horizontales

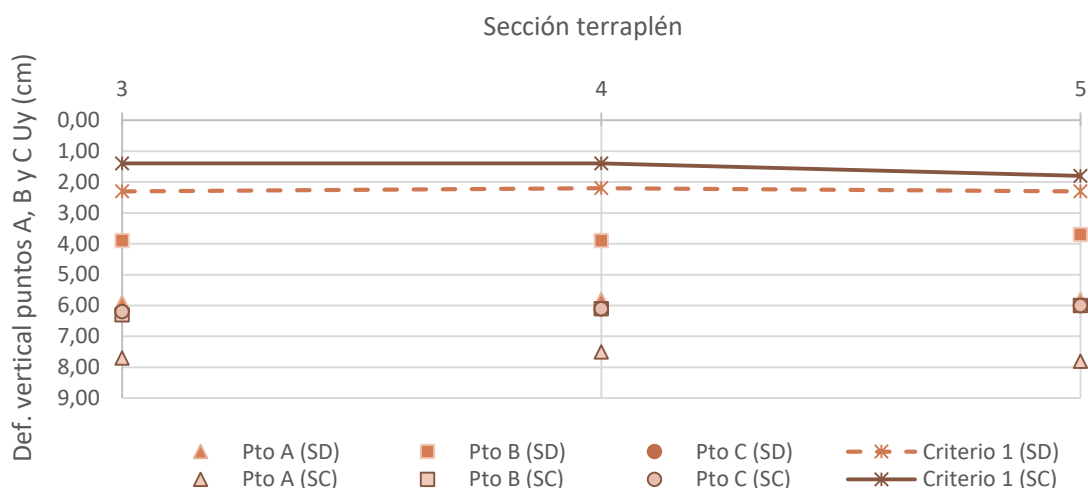


Figura 139. Def. vertical E1-2 y asiento diferencial con S.D. y S.C. en terraplén sin capas horizontales

En la Figura 139 se aprecia como la deformación vertical del punto A es la más elevada. La deformación vertical del punto B presenta un valor del 23,07% de diferencia en la sección R5 y un 18,18% en la sección R3 respecto al centro del terraplén -punto A-.

La menor deformación vertical se da en el punto B para todas las secciones. La deformación vertical del punto B es un 38,33% inferior a la deformación vertical del punto C simétrico para la sección R5.

Aunque la aplicación de la sobrecarga completa en la explanada del terraplén, conlleve una mayor deformación vertical en el punto A, se observa como los asientos diferenciales son mayores y constantes en el caso de considerar la aplicación de la sobrecarga en la mitad derecha.

El valor porcentual de la desigualdad entre los asientos diferenciales en función de la aplicación de la sobrecarga es de un 21,73% para la sección R5 mientras que para la sección R3 se obtiene un 39,13%. La sección R4 se encuentra en este caso en segunda posición al presentar una diferencia entre los asientos diferenciales en función de la aplicación de la sobrecarga de un 36,36%.

5.4.5.4 Explanada E1-3 terraplén capas no horizontales

En este apartado se aplica la sobrecarga de tráfico suponiendo la ejecución de la explanada tipo E1-3 sobre la coronación del terraplén compuesto por capas no horizontales. En la Tabla 133 se indican los desplazamientos verticales al final de la consolidación de la explanada para los puntos A, B, C y D.

Tabla 133. Deformación vertical E1-3 en sección R3, R4 y R5 con capas no horizontales

Sobrecarga	Sección terraplén	Deformación vertical (Uy) m			
		Punto A	Punto B	Punto C	Punto D
Mitad derecha (SD)	R3	-0,065	-0,045	-0,070	$-6,79 \cdot 10^{-3}$
	R4	-0,064	-0,044	-0,069	$-7,35 \cdot 10^{-3}$
	R5	-0,066	-0,042	-0,067	$-6,72 \cdot 10^{-3}$
Completa (SC)	R3	-0,082	-0,067	-0,070	$-8,48 \cdot 10^{-3}$
	R4	-0,080	-0,066	-0,069	$-8,70 \cdot 10^{-3}$
	R5	-0,084	-0,065	-0,067	$-8,11 \cdot 10^{-3}$

Según se aprecia en la Tabla 134, los mayores asientos diferenciales (criterio 1) son iguales para las secciones R3, R4 y R5, al considerar la aplicación de la sobrecarga de tráfico en la mitad derecha, mientras que al considerar la sobrecarga en la superficie completa de la explanada, el mayor asiento diferencial se observa en la sección R5. Estos resultados son similares a los obtenidos para la explanada E1-1 y E1-2 de los apartados anteriores.

Tabla 134. Criterios de análisis en explanada E1-3 terraplén con capas no horizontales

Sobrecarga	Sección	Criterio 1 (cm)	Criterio 2	Criterio 3 (%)	Criterio 4 (F.S.)
<i>Mitad derecha</i>	R3	2,5	0,00156	1,45	1,066
	R4	2,5	0,00156	1,41	1,078
	R5	2,5	0,00156	1,48	1,076
<i>Completa</i>	R3	1,5	0,00187	1,83	1,068
	R4	1,4	0,00175	1,78	1,077
	R5	1,9	0,00237	1,89	1,077

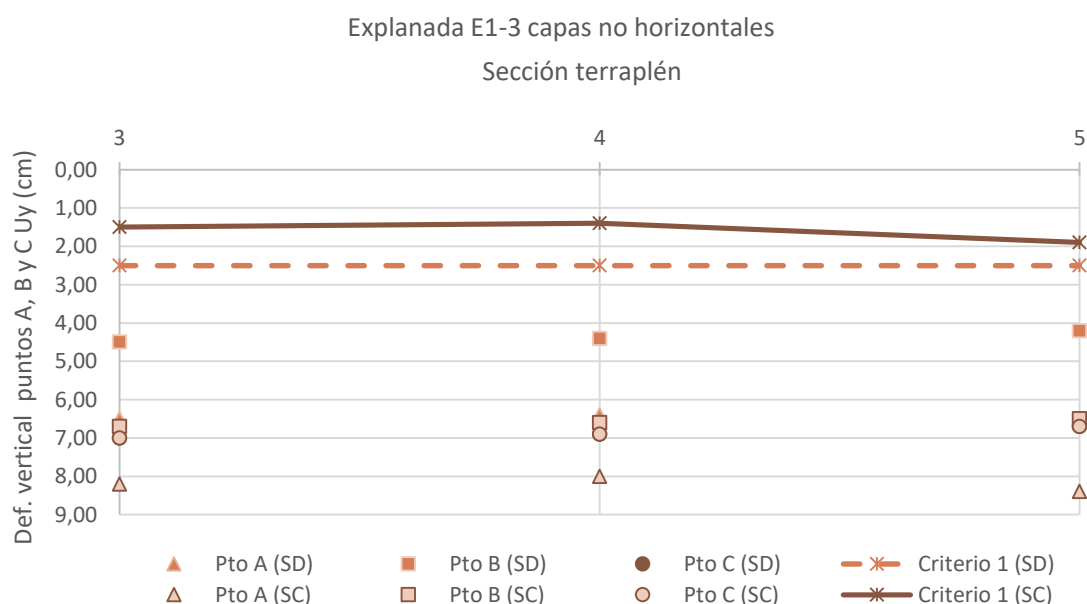


Figura 140. Def. vertical E1-3 y asiento diferencial con S.D. y S.C. en terraplén sin capas horizontales

En la Figura 140 se aprecia como la deformación vertical del punto A en el centro del terraplén es más elevada respecto a los extremos -puntos B y C- en el caso de aplicación de la sobrecarga completa. La deformación vertical del punto B presenta un valor del 22,62% de diferencia en la sección R5 y un 18,29% en la sección R3 respecto al centro del terraplén -punto A-.

La menor deformación vertical aparece al considerar la aplicación de la sobrecarga en la mitad derecha de la explanada. La deformación vertical del punto B es un 37,31% inferior a la deformación vertical del punto C simétrico para la sección R5.

Se observa como los asientos diferenciales son mayores en todas las secciones en el caso de considerar la aplicación de la sobrecarga en la mitad derecha.

El valor porcentual de la diferencia entre los asientos diferenciales en función de la aplicación de la sobrecarga es de un 24% para la sección R5, seguido de la sección R3 con un 40% de diferencia, y por último, la sección R4 con una diferencia del 44%.

5.4.5.5 Explanada E2-1 terraplén capas no horizontales

En este apartado se aplica la sobrecarga de tráfico suponiendo la ejecución de la explanada tipo E2-1 en el terraplén con capas no horizontales. En la Tabla 136 se indican los desplazamientos verticales al final de la consolidación de la explanada para los puntos A, B, C y D en función de la aplicación de la sobrecarga.

Tabla 135. Deformación vertical en explanada E2-1; S.C. mitad derecha y completa

Sobrecarga	Sección terraplén	Deformación vertical (Uy) m			
		Punto A	Punto B	Punto C	Punto D
<i>Mitad derecha (SD)</i>	R3	-0,055	-0,038	-0,059	$-6,64 \cdot 10^{-3}$
	R4	-0,054	-0,038	-0,059	$-6,87 \cdot 10^{-3}$
	R5	-0,055	-0,036	-0,057	$-6,21 \cdot 10^{-3}$
<i>Completa (SC)</i>	R3	-0,072	-0,059	-0,059	$-8,01 \cdot 10^{-3}$
	R4	-0,070	-0,058	-0,059	$-8,36 \cdot 10^{-3}$
	R5	-0,074	-0,057	-0,054	$-7,69 \cdot 10^{-3}$

A diferencia del terraplén con estratos horizontales, en el que no concluyó el cálculo para este tipo de explanada en la sección R4, con la modificación de la geometría de las capas del terraplén se consigue finalizar el análisis según indica la Figura 141.

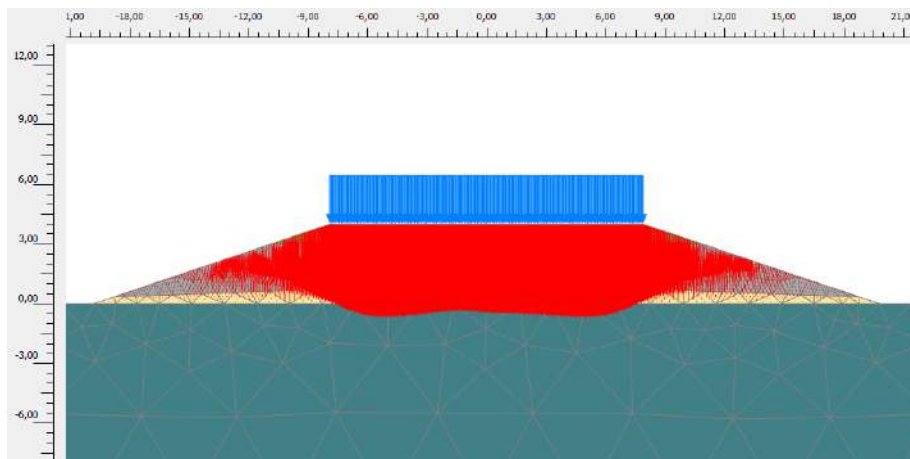


Figura 141. Desplazamientos R4 explanada E2-1 S.C. 23 kN/m² terraplén con capas no horizontales

Como se aprecia en la Tabla 136 Los mayores asentamientos diferenciales -criterio 1- son iguales para las secciones R3, R4 y R5, al considerar la aplicación de la sobrecarga de tráfico en la mitad derecha, mientras que al considerar la **sobrecarga en la superficie completa** de la explanada, el mayor asiento diferencial se observa en la **sección R5**. Estos resultados son similares a los obtenidos para las explanadas de los apartados anteriores.

Tabla 136. Criterios de análisis de explanada E2-1 terraplén con capas no horizontales

Sobrecarga	Sección	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3 (%)	Criterio 4 (F.S.)
<i>Mitad derecha (SD)</i>	R3	2,1	0,00131	1,20	1,438
	R4	2,1	0,00131	1,18	1,751
	R5	2,1	0,00131	1,22	1,571
<i>Completa (SC)</i>	R3	1,3	0,00162	1,60	1,466
	R4	1,2	0,0015	1,54	1,462
	R5	1,7	0,00212	1,66	1,694

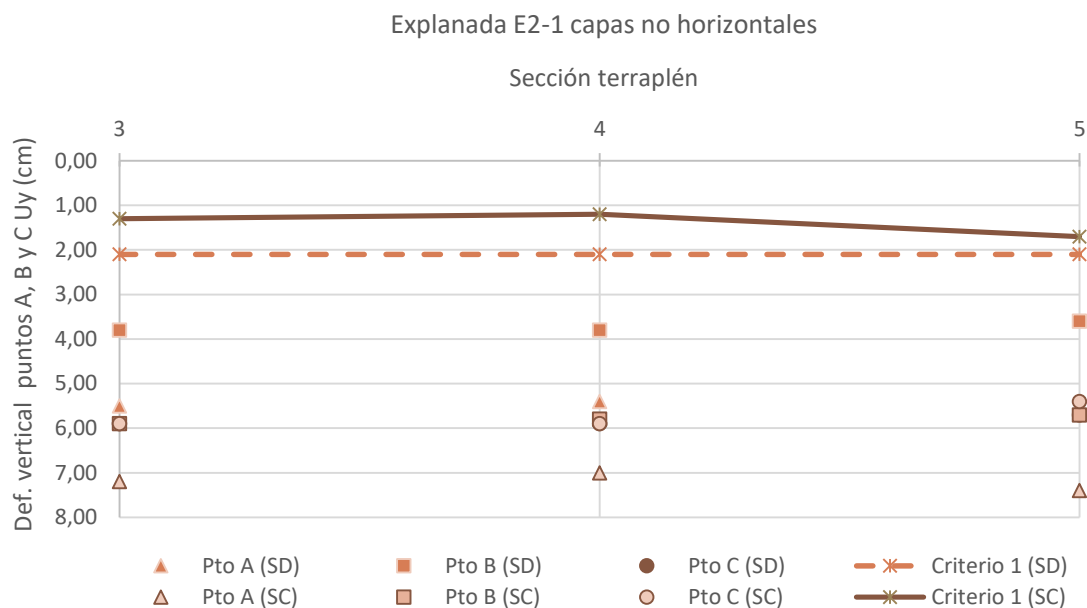


Figura 142. Def. vertical E2-1 y asiento diferencial con S.D. y S.C. en terraplén sin capas horizontales

En la Figura 142 se observa como la deformación vertical del punto A es más elevada respecto a los extremos -puntos B y C- en el caso de aplicación de la sobrecarga completa. La deformación vertical del punto B tiene un valor del 22,97% de diferencia en la sección R5 y un 18,05% en la sección R3 respecto al centro del terraplén.

La menor deformación vertical aparece en el punto B, al considerar sólo la aplicación de la sobrecarga en la mitad derecha de la explanada. La deformación vertical del punto B es un 36,84% inferior a la deformación vertical del punto C simétrico para la sección R5.

Los asientos diferenciales son mayores en todas las secciones al considerar la aplicación de la sobrecarga en la mitad derecha.

El valor porcentual de la diferencia entre los asientos diferenciales en función de la aplicación de la sobrecarga es de un 19,04% para la sección R5, seguido de la sección R3 con un 38,09% de diferencia, y por último, la sección R4 con la mayor diferencia del 42,85%.

5.4.5.6 Explanada E2-2 terraplén capas no horizontales

En este apartado se aplica la sobrecarga de tráfico suponiendo la ejecución de la explanada tipo E2-2 sobre la coronación del terraplén. En la Tabla 137 se indican los desplazamientos verticales al final de la consolidación de la explanada para los puntos A, B, C y D en función de la aplicación de la sobrecarga sobre la totalidad de la explanada E2-2.

Tabla 137. Deformación vertical E2-2 en sección R3, R4 y R5 con capas no horizontales

Sobrecarga	Sección terraplén	Deformación vertical (Uy) m			
		Punto A	Punto B	Punto C	Punto D
<i>Mitad derecha</i>	R3	-0,058	-0,041	-0,063	$-6,81 \cdot 10^{-3}$
	R4	-0,057	-0,040	-0,062	$-7,10 \cdot 10^{-3}$
	R5	-0,059	-0,039	-0,061	$-6,44 \cdot 10^{-3}$

<i>Completa</i>	R3	-0,075	-0,063	-0,063	$-8,23 \cdot 10^{-3}$
	R4	-0,073	-0,062	-0,062	$-8,49 \cdot 10^{-3}$
	R5	-0,077	-0,060	-0,061	$-7,84 \cdot 10^{-3}$

Como se observa en la Tabla 138, al considerar la aplicación de la sobrecarga en la mitad derecha se observa que los asientos diferenciales (criterio 1) son iguales para las secciones R3, R4 y R5, mientras que al considerar la sobrecarga en la superficie completa de la explanada, el mayor asiento diferencial se observa en la sección R5, al igual que ocurría en las explanaciones analizadas en apartados anteriores.

Tabla 138. Criterios de análisis en explanada E2-2 terraplén con capas no horizontales

Sobrecarga	Sección	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4 (F.S.)
<i>Mitad derecha</i>	R3	2,2	0,00137	1,28	1,642
	R4	2,2	0,00137	1,25	1,671
	R5	2,2	0,00137	1,31	1,664
<i>Completa</i>	R3	1,2	0,0015	1,67	1,660
	R4	1,1	0,00137	1,61	1,674
	R5	1,7	0,00212	1,72	1,648

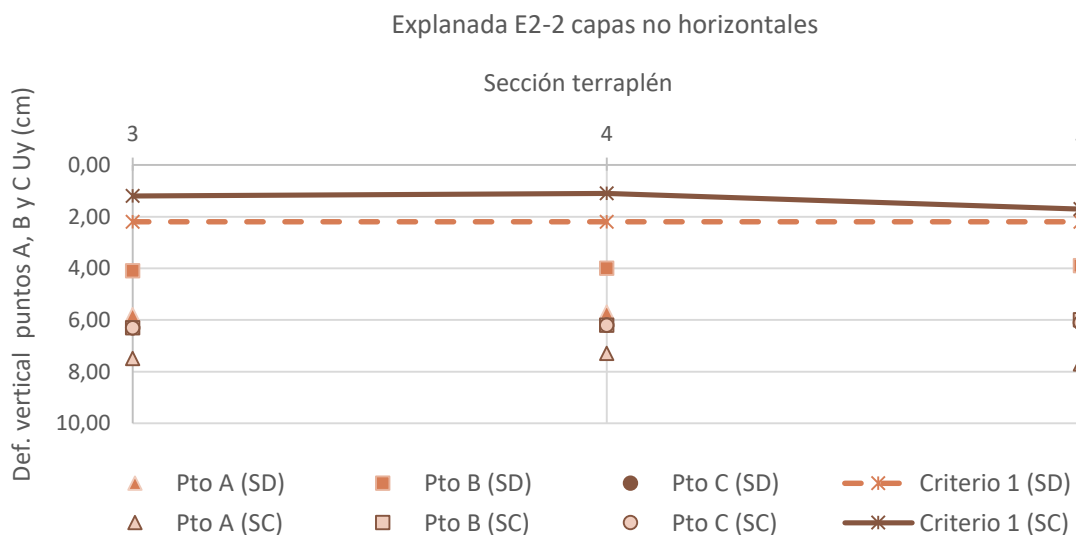


Figura 143. Def. vertical E2-2 y asiento diferencial con S.D. y S.C. en terraplén sin capas horizontales

La deformación vertical del punto A en el centro del terraplén es más elevada respecto a los extremos -puntos B y C- en el caso de aplicación de la sobrecarga completa, según la Figura 143. La deformación vertical del punto B presenta un valor del 22,07% de diferencia en la sección R5 y un 16% en la sección R3 respecto al centro del terraplén.

En el punto B se aprecia la menor deformación vertical, al considerar la aplicación de la sobrecarga en la mitad derecha. La deformación vertical del punto B es un 36,06% inferior a la deformación vertical del punto C simétrico para la sección R5.

Los asientos diferenciales son mayores en todas las secciones al considerar la aplicación de la sobrecarga en la mitad derecha. El valor porcentual de la variación entre los asientos diferenciales en función de la aplicación de la sobrecarga es de un 22,72% para la sección R5, seguido de la sección R3 con un 45,45% de diferencia, y por último, la sección R4 con la mayor diferencia del 50%.

5.4.5.7 Explanada E2-3 terraplén capas no horizontales

Por último, en este apartado se aplica la sobrecarga de tráfico suponiendo la ejecución de la explanada tipo E2-3. En la Tabla 139 se indican los desplazamientos verticales al final de la consolidación de la explanada para los puntos A, B, C y D suponiendo la aplicación de la sobrecarga de tráfico en la mitad derecha del terraplén y por último, sobre la totalidad de la explanada E2-3.

Tabla 139. Deformación vertical E2-3 en sección R3, R4 y R5 con capas no horizontales

Sobrecarga	Sección terraplén	Deformación vertical (Uy) m			
		Punto A	Punto B	Punto C	Punto D
<i>Mitad derecha (SD)</i>	R3	-0,064	-0,046	-0,071	$-7,32 \cdot 10^{-3}$
	R4	-0,062	-0,046	-0,069	$-7,63 \cdot 10^{-3}$
	R5	-0,064	-0,044	-0,068	$-6,94 \cdot 10^{-3}$
<i>Completa (SC)</i>	R3	-0,079	-0,069	-0,071	$-8,79 \cdot 10^{-3}$
	R4	-0,077	-0,067	-0,069	$-9,02 \cdot 10^{-3}$
	R5	-0,081	-0,066	-0,069	$-8,40 \cdot 10^{-3}$

Tabla 140. Criterios de análisis en explanada E2-3 con capas no horizontales

Sobrecarga	Sección	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3 (%)	Criterio 4 (F.S.)
<i>Mitad derecha (SD)</i>	R3	2,5	0,00156	1,42	1,059
	R4	2,3	0,00143	1,36	1,068
	R5	2,4	0,00150	1,43	1,054
<i>Completa (SC)</i>	R3	1,0	0,00125	1,75	1,056
	R4	1,0	0,00125	1,69	1,056
	R5	1,5	0,00187	1,81	1,055

En la Tabla 140 se incluyen los resultados en base a los distintos criterios de evaluación. Al considerar la aplicación de la sobrecarga en la mitad derecha se observa que los asientos diferenciales -criterio 1- varían ligeramente para las secciones R3, R4 y R5. **Al considerar la sobrecarga en la superficie completa de la explanada, el mayor asiento diferencial se observa en la sección R5, al igual que ocurría en las explanaciones analizadas en apartados anteriores, el resto de secciones disminuyen el asiento diferencial a la mitad, si se comparan los resultados suponiendo las capas del terraplén completamente horizontales.**

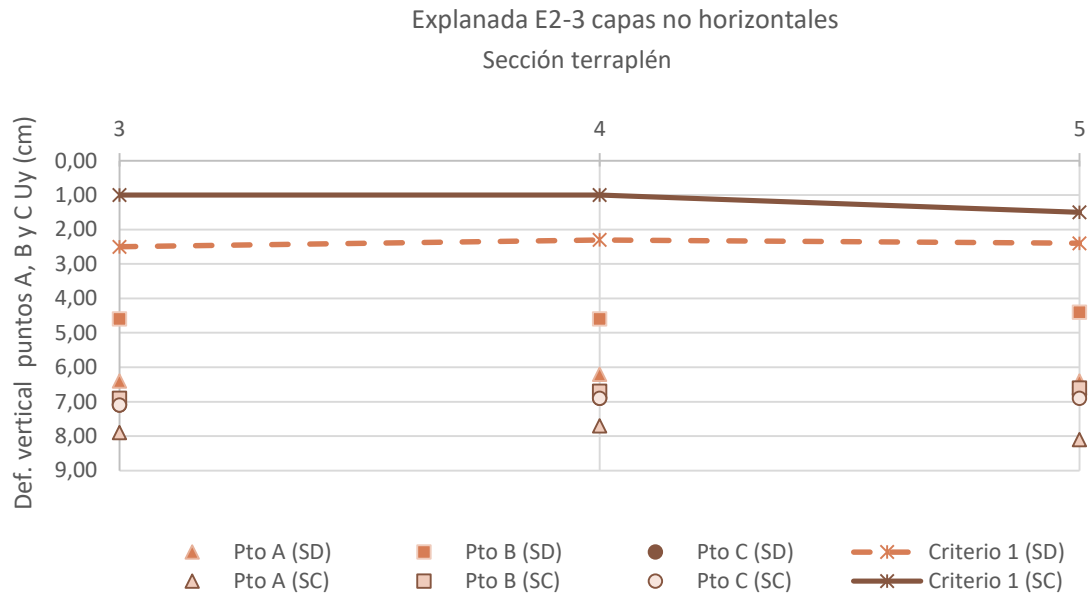


Figura 144. Def. vertical E2-3 y asiento diferencial con S.D. y S.C. sin capas horizontales

De nuevo la deformación vertical del punto A es más elevada respecto a los puntos B y C en el caso de aplicación de la sobrecarga completa, según se aprecia en la Figura 144. La deformación vertical del punto B presenta un valor del 18,51% de diferencia en la sección R5 y un 12,65% en la sección R3 respecto al centro del terraplén.

Al considerar sólo la aplicación de la sobrecarga en la mitad derecha de la explanada se aprecia una deformación menor en el punto B. La deformación vertical del punto B es un 35,29% inferior a la deformación vertical del punto C simétrico para la sección R5, similar a los valores obtenidos para la sección R3 y R4.

Los asientos diferenciales son mayores en todas las secciones al considerar la aplicación de la sobrecarga en la mitad derecha.

El valor porcentual de la desigualdad entre los asientos diferenciales en función de la aplicación de la sobrecarga es de un 37,50% para la sección R5, seguido de la sección R4 con un 56,52% de diferencia, y por último, la sección R3 con la mayor variación del 60%.

capítulo 6

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 SITUACIÓN ACTUAL DEL GRANULADO DE NEUMÁTICO

Las noticias sobre el tratamiento del granulado de neumático más recientes a nivel nacional, indican el desarrollo de un ambicioso proyecto que contempla la construcción de cuatro plantas pirolíticas para convertir los neumáticos usados en biocombustibles, lo que supondría el tratamiento de 40.000 toneladas de chips de neumáticos fuera de uso al año (ABCdeSevilla, 2022).

La creciente generación de este residuo se verifica con el incremento de un 17,3% en el 2021 respecto al año 2020 de las recogidas realizadas sólo por SIGNUS, que supusieron 200.286 toneladas (Signus, 2022). Sin duda el incremento progresivo de almacenamiento y la falta de demanda del material, han motivado la necesidad de forzar el campo de reciclado del mismo de una forma más ágil.

Por lo tanto, se verifica el foco de interés existente en la valorización energética del NFU, que aunque cuente con mecanismos de autoconsumo en todas las plantas proyectadas y estas se ubiquen estratégicamente cercanas a actuales plantas de tratamiento para reducir emisiones en el transporte, debe analizarse detenidamente los complejos procesos químicos necesarios para segregar los componentes de un neumático.

Cada vez son más los grupos de investigación que surgen como respuesta a la problemática de la falta de demanda del granulado de neumático en aplicaciones que no supongan la transformación química del NFU, por lo que sería de gran interés económico, medioambiental y social fomentar y apoyar el empleo de este subproducto.

En el reciente estudio realizado por TNU en colaboración con la Universidad Politécnica de Valencia se ha desarrollado un análisis sobre las tendencias en el tratamiento de neumáticos fuera de uso a partir de la metodología “Tech Mining” (Artacho Ramírez, Miguel Ángel ; Vicente Gomila, 2021). La búsqueda de patentes y aplicaciones científicas a partir de palabras clave a **nivel global**, puso de manifiesto la falta de interés en el uso de granulado de neumático a partir del año 2012, frente a otras aplicaciones como **mezclas asfálticas u mezclas ligadas con NFU** en sustitución del árido convencional, como por ejemplo el hormigón. Este hecho contrasta con la **casuística nacional**, donde las principales aportaciones están basadas en las **partículas de caucho**, contribuyendo en menor medida con publicaciones sobre términos generales como residuos o neumáticos desechados, y estando a la cola respecto a otros países en cuanto a las aportaciones científicas.

En cuanto a la **valorización material del NFU**, las principales aplicaciones se centran en **hormigones y cementos, fibras contenidas en el caucho, asfalto y reutilización de cables de acero** en la actualidad. Aun teniendo en cuenta la poca repercusión de aprovechamiento del material que suponen dichas aplicaciones, resultan de elevado interés ya que cada vez más distintos sellos de certificación medioambiental valoran la utilización en la construcción de materiales reciclados (**Breeam Nueva Construcción; LEED...**). Estas iniciativas pueden considerarse como una herramienta muy potente para publicitar y dar mayor visibilidad a nivel social, de la necesidad de un correcto reciclado y utilización del granulado de neumático, u otros residuos gestionados.

Se podría concluir que es necesario **promover incentivos fiscales** para el empleo del NFU en **obras de geotecnia** en general y simplificar los trámites para su utilización, a partir de un mayor **fomento de normativa técnica y legislativa**.

6.2 APLICACIÓN 1: VIABILIDAD EN EL EMPLEO DE NFU EN RELLENOS LOCALIZADOS

La bibliografía existente sobre la puesta en obra del material en la aplicación propuesta, no desarrolla la casuística especial que puede presentarse en el proceso de cálculo la aplicación del material y por ende en los resultados finales. De ahí, que en este estudio se hayan detallado minuciosamente las formulaciones propuestas en base a la normativa vigente y en base a los resultados obtenidos, las consideraciones necesarias para llevar a cabo una correcta puesta en obra del material reciclado.

La mejora a nivel constructivo se hace patente al analizar los coeficientes de seguridad obtenidos en base a las formulaciones indicadas, cuyos resultados sustentan la viabilidad del material en rellenos localizados tras estructuras de contención tanto de obra nueva como en el campo de la rehabilitación. El **factor de seguridad global** se vio **incrementado un 27%** respecto a la solución que sólo contemplaba relleno a partir de material convencional (H. Djadouni, H. Trouzine, A. Gomes & T. Filipe da Silva, 2021) para la muestra que contenía un **66% de NFU**. Los resultados de esta investigación revelan una mejora en el factor de seguridad del **28,50%** para la **sección M7** que contiene un **61,80% de NFU**, mientras que para la sección **M6** que contiene un **87%** del material reciclado la mejora en el factor de seguridad respecto a la sección M4 fue de un **41,26%**.

Al analizar el factor de seguridad al **deslizamiento** y al **vuelco** en base al **EC7-P1 (1997)** para la **sección M6**, los resultados obtenidos se incrementan un **72%** y un **36%** respectivamente según el **Enfoque de Proyecto 2**. Para la **sección M3** los resultados se incrementan hasta un **76%** y un **59%** para el factor de seguridad al deslizamiento y al vuelco, ya que los empujes en el trasdós del muro son inexistentes debido al efecto de la cohesión del NFU.

Si los cálculos se realizan conforme al **CTE-DB-SE-C (v2019)** para el muro de mayor alzado – **sección M6** – el factor de seguridad al deslizamiento se incrementa un **61,39%** respecto a la sección M4, mientras que el factor de seguridad al vuelco de incrementa un **60,90%**. Para la **sección M3**, el incremento se traduce en un **38,83%** para el factor de seguridad deslizamiento y en un **20,05%** para el vuelco, debido principalmente a que es necesario considerar el 25% de las tensiones verticales actuando en el trasdós del muro.

Existe un contrastado conocimiento sobre la aplicación de NFU como relleno en el trasdós de muros de contención (Tweedie et al., 1998), donde sin ninguna sobrecarga la tensión horizontal en la parte superior del relleno fue un 28% mayor que en la cimentación, probablemente debido a la **cohesión aparente del material**, aunque en otras investigaciones se consideró como nula la cohesión de las muestras de relleno (Arefnia et al., 2021). En esta investigación se concluye la necesidad de considerar la cohesión del material, ya que aunque en la sección M2 - 100% NFU – se produzca un incremento en el factor de seguridad de un 14,53% respecto a la misma sección considerando la cohesión de la muestra S6, no se cumple la condición de paso de la resultante por el núcleo central. De igual forma ocurre para la sección M3, donde la acción estabilizadora del peso del material sobre el talón, la genera la capa de material convencional tipo arena que cubre el NFU.

Las tensiones horizontales tanto en reposo como activas son aproximadamente entre un 45% y un 35% inferiores a las obtenidas para el relleno granular convencional para muros de 4,8 m de alzado y ancho de relleno con NFU igual a la longitud del talud (Tweedie et al., 1998); (H. Djadouni, H. Trouzine, A. Gomes & T. Filipe da Silva, 2021) y (Duda & Siwowski, 2021a). En el caso de considerar un **ancho de relleno de NFU de 30 cm** actuando como capa de amortiguación en el trasdós del muro, la presión del terreno debido a acciones sísmicas, se redujo en torno a un **33% a lo largo del alzado de 6 m de altura** (Dram et al., 2022). Para el caso de estudio de una sección del **recinto amurallado de Utrera**, se concluyó que el empleo del NFU permite **reducir** en torno a un **20% los empujes sobre el trasdós** de la muralla respecto a la solución que contempla material convencional.

Dichos empujes aumentan a medida que se incrementan las deformaciones al ampliar el ancho de la entibación del terreno.

Otros autores al suponer balas de neumáticos como rellenos, consiguieron reducir los empujes horizontales en torno a un 70% añadiendo arena entre los espacios de la bala, y alrededor de un 40% al implementar material artificial como NFU (Duda & Siwowski, 2021a).

En el caso de emplear 100% NFU, los desplazamientos totales del relleno se incrementaron un 75% respecto a las muestras mezcladas con material convencional (H. Djadouni, H. Trouzine, A. Gomes & T. Filipe da Silva, 2021). En esta investigación se observa que los desplazamientos totales que experimenta la sección M6 compuesta por un 87% NFU, y la sección M7 formada por un 61,80% de NFU, tienen el mismo valor, por lo que para esos contenidos de NFU no se observan diferencias significativas. No obstante, la disminución del Módulo de Young y la resistencia al corte se compensa con la reducción del peso unitario del NFU generándose menores desplazamientos de la estructura en general. Normalmente, los rellenos de NFU experimentan más desplazamientos pero ejercen menor presión dinámica sobre el trasdós de los muros (Amirkhanian & Skelton, 2021).

La proporción de la mezcla de NFU y material convencional indica un ratio óptimo de 81:19 en volumen (H. Djadouni, H. Trouzine, A. Gomes & T. Filipe da Silva, 2021), al igual que ocurre en esta investigación donde a mayor contenido de NFU a lo largo del trasdós de las estructuras de contención menores son los empujes y por lo tanto, mayores los coeficientes globales de seguridad obtenidos.

Los aspectos considerados con mayor relevancia en el análisis de viabilidad del uso del NFU como relleno localizado, frente a rellenos con material convencional tipo arena, son el volumen de hormigón y acero; así como el geotextil. No se han considerado medidas excepcionales frente a la compactación del material que supongan un mayor esfuerzo económico y por lo tanto de utilización de recursos y generación de emisiones.

El coste material al incluir en el trasdós del muro de contención NFU podría llegar a reducirse del 81% al 85%, mientras que los costes totales podrían reducirse entre un 52% a un 67% para alzados de muro de 3 m a 9 m, siendo más evidente el ahorro para muros de mayor altura (Cecich et al., 1996). En esta investigación se concluyó que los costes pueden llegar a reducirse entre un 12% y un 21,5% para muros de alzado entre 2,50 m y 4,5 m.

La Base de Datos de información medioambiental contiene información aportada por los participantes del ITeC, que constituyen la base para la creación del banco BEDEC, donde además de recogerse información medioambiental de diferentes materiales, se recopila la evolución de los precios en dieciséis años. A través de dicha información puede evaluarse el encarecimiento de los precios que tienden al alza en los próximos años, según la Figura 145.

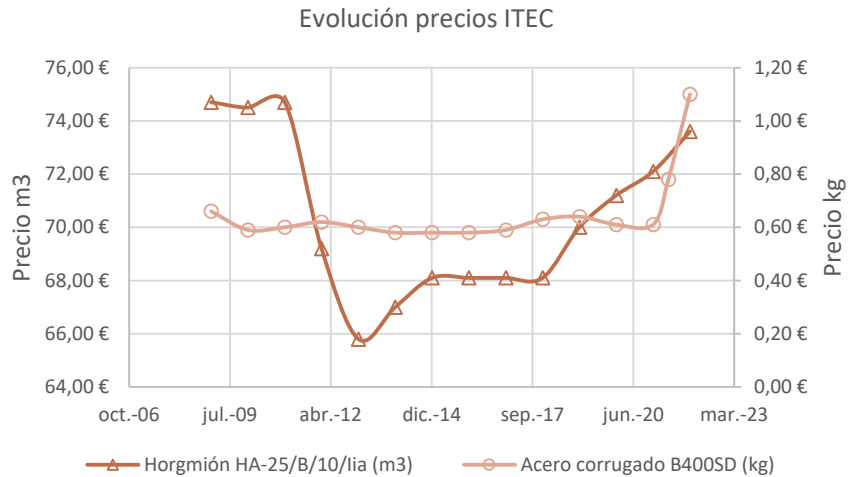


Figura 145. Evolución de los precios según base de datos ITEC hormigón y acero

En la Figura 146 se aprecia como a medida que aumenta la altura del muro de contención, se precisa aumentar la sección del mismo para alcanzar el factor de seguridad límite cuando se emplea relleno con material convencional tipo arena -secciones M1 y M4-, lo que implica un incremento en el uso del hormigón armado.

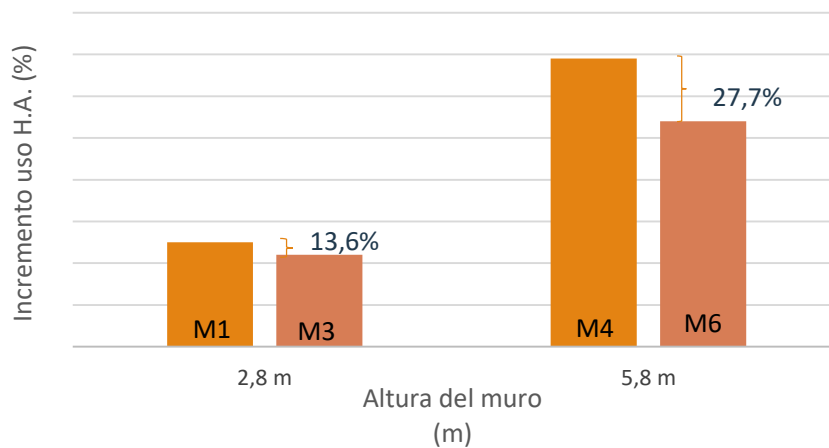


Figura 146. Incremento en el empleo de H.A. para rellenos según rellenos localizados

En la Figura 146 se concluye que el uso del NFU como relleno localizado en muros de contención puede contribuir a reducir el empleo del hormigón armado. Para alturas de muro de 2,80 m el incremento en el empleo del hormigón es de un 13,6%, mientras que para alturas de muro de 5,80 m, el uso del hormigón puede aumentar hasta un 27,7% respecto a la solución que emplea relleno de NFU en el trasdós -sección M6-.

Respecto a los costes que implican cada geometría considerada del muro de contención, la Figura 147, muestra como a medida que aumenta la altura del muro, el importe estimado si se emplea relleno con NFU puede ser del orden de un 20% más económico que si se emplea material convencional.

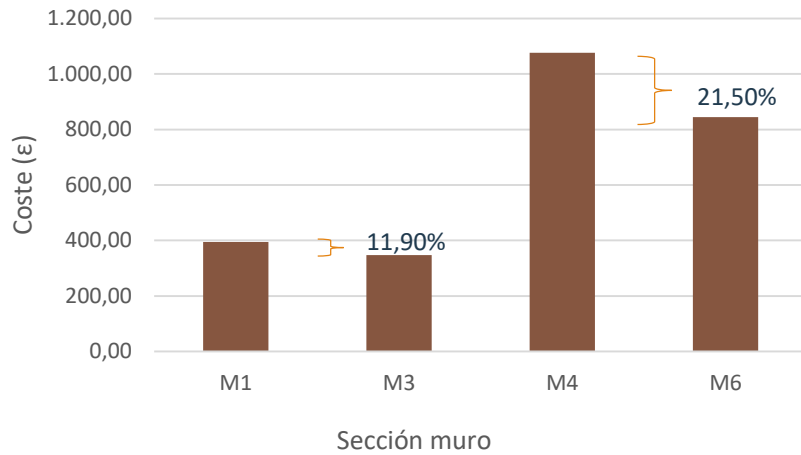


Figura 147. Costes según la sección para muro de contención en L

A nivel medioambiental, el empleo de recursos favorece el incremento de las emisiones de CO₂ a la atmósfera, que al igual que en el caso anterior son superiores para las secciones que consideran relleno convencional en el trasdós, ya que precisan de una sección de muro de mayor envergadura. Se ha cuantificado las emisiones de CO₂ a la atmósfera, en base a la información medioambiental disponible de la base de datos BEDEC PR/PCT del ITeC (ITEC, 2022).

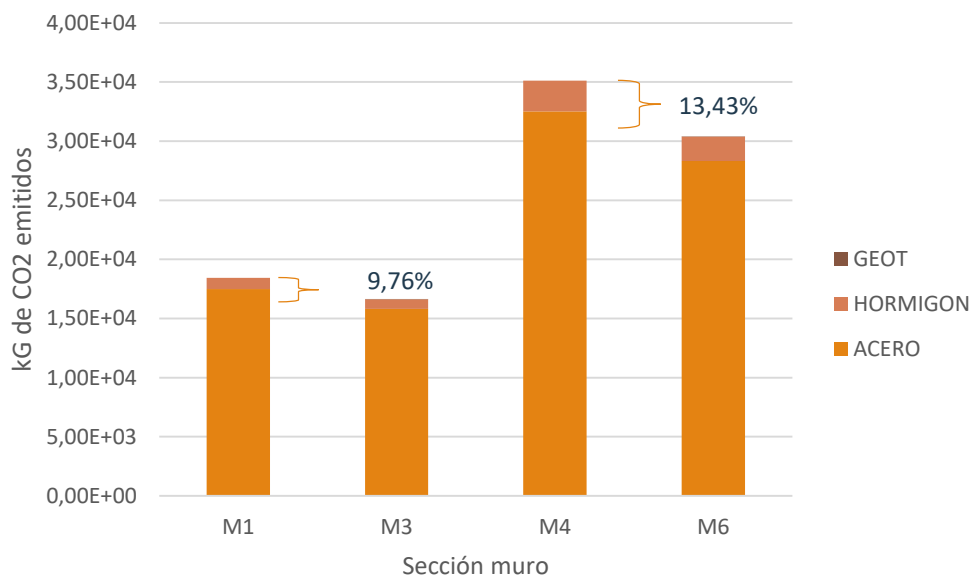


Figura 148. kg de CO₂ emitidos a la atmósfera en base a la sección del muro de contención

De la Figura 148 se concluye que a medida que aumenta la altura del muro, la reducción en las emisiones de CO₂ es de mayor repercusión, aunque la diferencia al compararlo con los muros de 2,80 m de altura no supera el 3,67%.

6.2 APLICACIÓN 2: VIABILIDAD EN EL EMPLEO DE NFU PARA FORMACIÓN DE TERRAPLENES

Para cuantificar a **nivel constructivo** el efecto que implica cada una de las secciones del terraplén analizadas se han identificado los siguientes criterios:

- Criterio 1: Deformación vertical en el punto A y B.
- Criterio 2: Tiempo total hasta que finaliza el proceso de consolidación primaria.
- Criterio 3: Factor de seguridad.

En la Figura 149 se exponen las conclusiones obtenidas respecto al criterio 1, donde se observa que no hay un patrón claro en los desplazamientos verticales del punto A para el criterio 1, en función de la muestra de NFU y de la composición de la sección del terraplén, ya que para la sección R5 y R2, los mayores desplazamientos son generados por la muestra S5 con una diferencia del 40%, mientras que para la sección R3 y R4, los desplazamientos más acusados del punto A son generados por la muestra S6.

Normalmente cuando se supera una deformación vertical de 10 cm es necesario implementar medidas de mejora en el terreno base, por lo que la única sección que no necesitaría plantear dichas mejoras sería la sección R2, según indica la Figura 149.

La deformación vertical en los terraplenes sin NFU fue aproximadamente el doble que la obtenida en los terraplenes reforzados; además se indicó que el comportamiento mejoraba al disminuir la separación entre las capas de NFU (L. Li et al., 2016a).

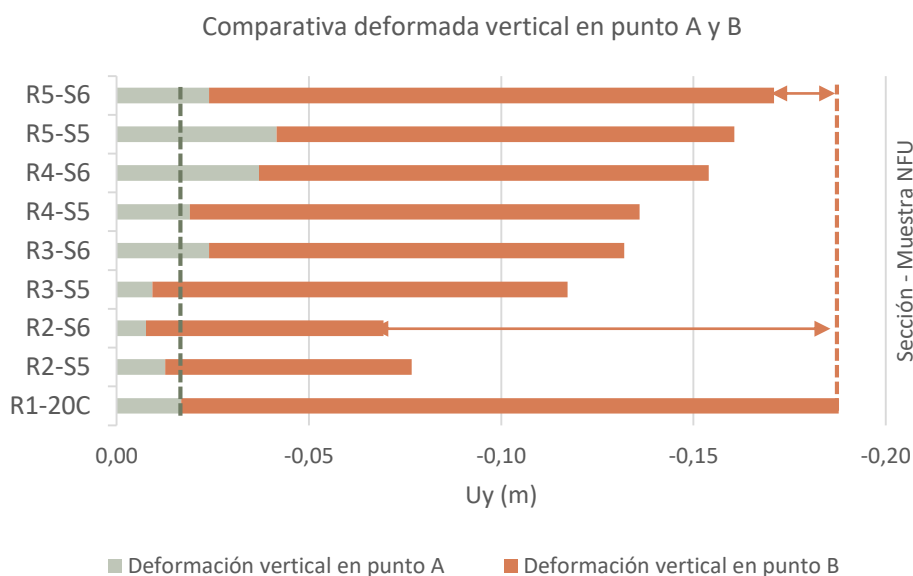


Figura 149. Criterio 1 para cada una de las secciones de terraplén en función de la muestra de NFU

Los resultados de esta investigación, indican que al suponer el empleo de material convencional según la sección **R1-20C -0% NFU-**, las deformaciones verticales en el punto B se reducen como mínimo un **14%** si se compara con los resultados de la sección del terraplén **R5-S6 -44% NFU-**. Mientras que respecto a la sección teórica **R2-S6 -100%-** la deformación vertical en el mismo punto, se reduce en un **64%**. Lo que indica que el empleo de NFU reduce la deformación vertical de los sustratos de cimentación. Por lo tanto, **a medida que aumenta el porcentaje de NFU en la sección, se reducen los desplazamientos verticales en el terreno soporte**. En otras investigaciones, **la deformación vertical debido a la construcción del terraplén se redujo en torno a un 30% al considerar la sección del terraplén compuesta por un 50% de NFU (Duda & Siwowski, 2021b)**, dependiendo de las características del sustrato de apoyo. En esta investigación la sección **R4-S6 -47% NFU-**, permitió reducir en

torno a un **31,57%** la deformación vertical en el **punto B**. Mientras que la sección **R3-S6 -69% NFU-**, permitió reducir en un **36,84%** la deformación vertical en el mismo punto, respecto a la sección compuesta por material convencional.

La principal conclusión que se obtiene para el **criterio 1**, indica que el porcentaje de NFU óptimo en las secciones tipo terraplén se encuentra en torno al **50%** para reducir las deformaciones verticales en el terreno de cimentación.

Respecto al **criterio 2**, el tiempo de consolidación necesaria para alcanzar como máximo 1 kN/m^2 de presión intersticial, no supone grandes variaciones. Siendo más elevado en aquellas secciones con un contenido de NFU superior al de arena, como se observa en la sección R2, según la Figura 150.



Figura 150. Evaluación del criterio 2 para cada una de las secciones tipo terraplén

La presión intersticial en el centro del terraplén puede llegar a reducirse un **25%** en aquellos terraplenes que incorporan NFU en un **55%** como relleno dentro de la sección (Duda & Siwowski, 2021b). Los resultados de esta investigación, concluyen que al suponer la sección **R1-20C -0% NFU-**, el exceso de presión intersticial en el punto B se reduce como mínimo un **18,28%** si se compara con los resultados de la sección del terraplén **R5-S6 -44% NFU-**. Mientras que respecto a la sección teórica **R2-S6 -100%**- el exceso de presión intersticial en el mismo punto, se reduce en un **62,67%**. Lo que indica que el empleo de NFU reduce el exceso de presión intersticial generado por la construcción del terraplén en los sustratos de cimentación. Mientras, la sección **R4-S6 -47% NFU-**, permitió reducir en torno a un **46,20%** el exceso de presión intersticial. Por último, la sección **R3-S6 -69% NFU-**, permitió reducir en un **35,18%** el exceso de presión intersticial en el mismo punto, respecto a la sección compuesta por material convencional.

Al añadir una capa de NFU de 3 m de espesor, se incrementaron las presiones intersticiales en el terreno un **21%** (Mills & McGinn, 2010). Según los resultados obtenidos, se concluye que hasta un **69%** de NFU –R3- el exceso de presión intersticial se incrementa progresivamente en la misma proporción respecto a la sección R2. Considerar un contenido de NFU del **44%** en la sección supone una diferencia del **18%** en el exceso de presión intersticial respecto a la sección que solo contempla material convencional –R1-.

El empleo de NFU implica un aumento significativo del factor de seguridad respecto a la solución que sólo contempla arena como material principal en la ejecución del terraplén, según se observa en el **criterio 3**, como se observa en la Figura 151.

Las secciones de terraplén ejecutadas con la muestra S6 presentan un factor de seguridad ligeramente superior a las secciones ejecutadas con la muestra S5, entre un 3% y 5%.

El empleo de NFU supone un **incremento del factor de seguridad** entre el **37,6%** para la sección **R3-S6 -69% NFU-** y del **25%** para la sección **R5-S6 -44% NFU-**, si comparamos con el factor de seguridad obtenido en el terraplén ejecutado con arena en su totalidad. Para este porcentaje de NFU en la sección, **otras investigaciones han obtenido un incremento en el factor de seguridad de un 26% al considerar un 30% en peso de NFU en la sección del terraplén para un rango granulométrico de 1 – 5 mm (Kowalska & Chmielewski, 2017).** Mientras, la sección **R4-S6 -47% NFU-** genera un incremento en el factor de seguridad del **25,40%**. En otras investigaciones, **el factor de seguridad global se incrementó en un 15% al suponer un 50% de la sección del terraplén compuesta por NFU, respecto al terraplén ejecutado con material convencional en el caso de contar con una arcilla limosa como terreno de cimentación,** mientras que la superficie de deslizamiento se observó próxima al espaldón del terraplén, mostrando una correcta estabilidad rotacional (Duda & Siwowski, 2021b).

Respecto a la sección R2, el incremento es del 50%, pero al tratarse de una sección teórica por los asientos que provocaría en el pavimento de coronación, no se tendrá en consideración. **Se concluye que las secciones que emplean mayor cantidad de árido convencional reducen el factor de seguridad del terraplén.**

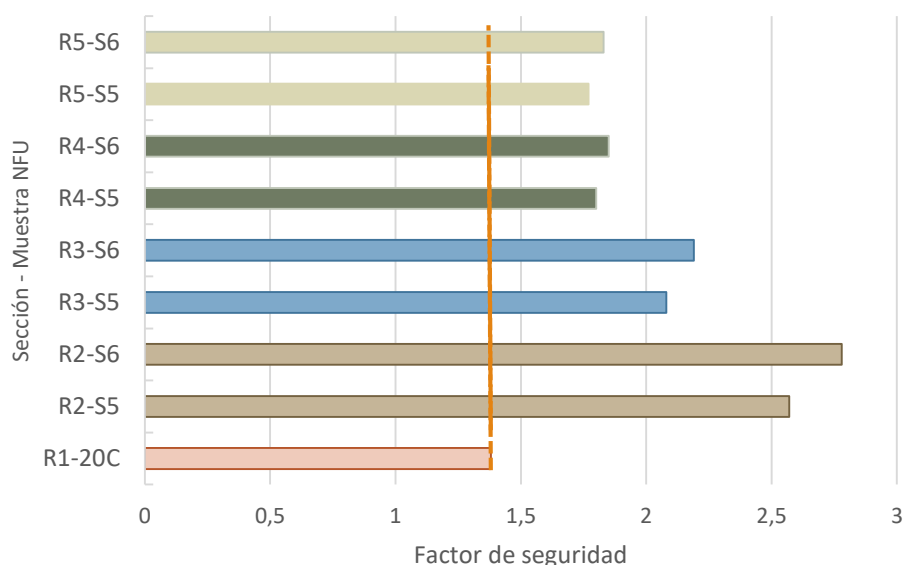


Figura 151. Evaluación del criterio 3 para cada una de las secciones tipo terraplén

En base a las conclusiones obtenidas anteriormente, se concluye apostar por el **empleo de la muestra S6 para las aplicaciones de campo**, ya que al contener una mayor proporción de granulado de tamaño superior, los costes y procedimientos para su triturado son menores, lo que repercute en un menor esfuerzo medioambiental, además de presentar valores más favorables en cada uno de los criterios evaluados.

En algunas investigaciones la composición volumétrica de las secciones tipo terraplén estaban formadas por un **50% de material convencional y un 50% de granulado de NFU (Eldin, 1990)** cuya granulometría variaba entre 2,54 cm hasta los 45 cm. Con dicha proporción no se apreciaron problemas significativos durante el proceso constructivo. En base a los resultados obtenidos, a **nivel constructivo** se concluye que el **porcentaje óptimo de NFU ronda el 50%** de la sección del terraplén y que los resultados se encuentran directamente relacionados con la **estratigrafía y composición del terraplén** planteada, por lo que debe estudiarse para cada caso la sección propuesta en función de las características del terreno de cimentación y compararse al menos, el **modelo**

concluyeron que se necesitan del orden de 8 semanas para estabilizar en los pavimentos los asientos dependientes del tiempo antes de construir elementos sensibles (Humphrey 2000).

Para cuantificar a nivel constructivo el efecto que implica cada una de las secciones del terraplén analizadas para la formación de explanadas sobre NFU, se cuantificaron tres criterios que consideraban los asientos diferenciales entre los puntos analizados, la distorsión angular y el factor de seguridad.

A la hora de evaluar dichos criterios es importante remarcar que este análisis consideró principalmente las deformaciones provocadas por la ejecución del plano de explanación y la sobrecarga de tráfico sobre cada una de las secciones del terraplén, considerándose el módulo edométrico de la muestra S6 en condiciones de compactación entre 100 y 200 kPa, donde el material se considera como pre consolidado. Dicho valor deberá ser revisado in situ en el momento de ejecución del terraplén, ya que una vez realizada la puesta en obra del material se espera que se produzca un aumento de volumen debido a la ausencia permanente de carga sobre el estrato de NFU.

Además, se debe contemplar que los valores obtenidos variarán en función de la sobrecarga a la que esté sometido el pavimento, junto con las condiciones del terreno de cimentación que pueden inducir deformaciones adicionales que afecten sensiblemente al plano de explanación.

La influencia que la **formación de la explanada tiene en la deformación vertical de los puntos analizados** en la cota de coronación del terraplén, se releja en la Figura 153, donde se indica la **diferencia porcentual entre el desplazamiento vertical de los puntos A y B**, en el caso de considerar la aplicación completa de la sobrecarga (SC) y entre los puntos B y C al considerar actuando la sobrecarga en la mitad derecha (SD).

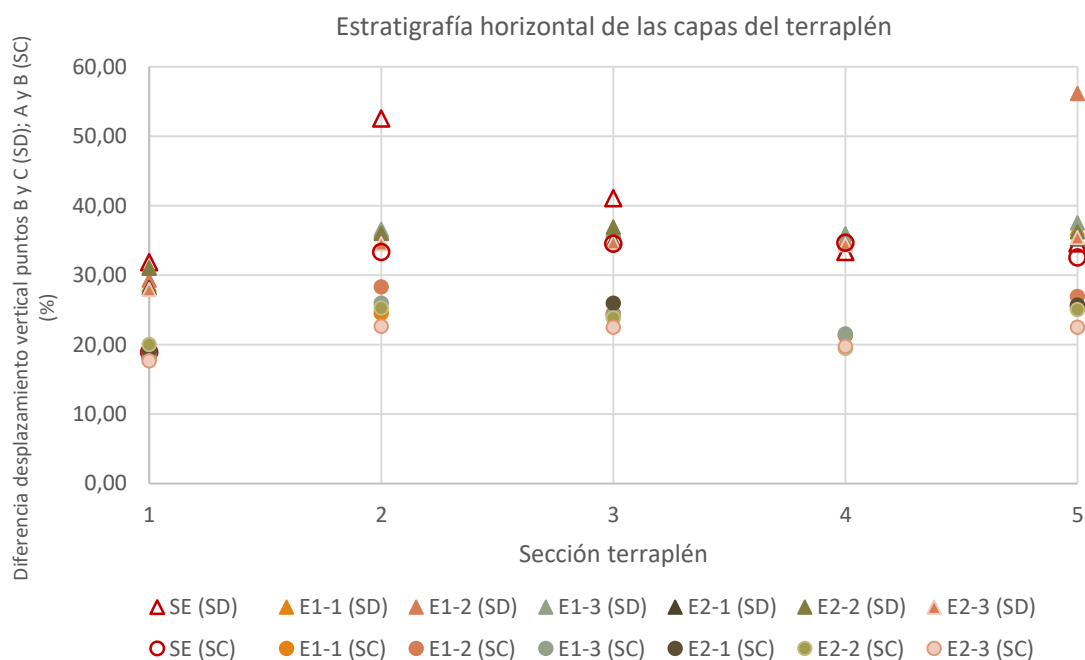


Figura 153. Desp. vertical según explanada y S.D. y S.C. en el terraplén de capas horizontales.

En el supuesto de no considerar plano de explanación (SE) en la sección R1 compuesta de material convencional, no se aprecian diferencias significativas en la deformación vertical de los puntos analizados en función de la aplicación de la sobrecarga, respecto a considerar formación de explanada. Para el resto de secciones que contienen NFU, en el caso de no considerar explanada, las desigualdades entre los puntos analizados son mayores cuando actúa la sobrecarga completa, mientras que al aplicar la sobrecarga en la mitad

derecha todas **las variaciones entre los desplazamientos verticales se encuentra en la franja del 30% al 40%**, salvo la sección R2. Para la sección R5 el comportamiento es similar a las secciones R3 y R4, con la considerable variación que se observa para la explanada E1-2 (SD) al aplicarse la sobrecarga sólo en el lado derecho de la sección.

La principal conclusión que se obtiene es la importancia de **considerar la ejecución de un plano de explanación** cuando vayan a aplicarse sobrecargas de diferente extensión, ya que **a mayor contenido de NFU la diferencia de desplazamiento entre los puntos analizados es mayor**, lo que conllevará **mayores asientos diferenciales**. La variación entre las deformaciones verticales de los puntos analizados en el caso de considerar la aplicación de la sobrecarga en la mitad derecha o al completo, es menor en las secciones R4 y R5 que no consideran ejecución de ninguna explanada, cuyo contenido de NFU oscila entre el 44% y 47%, mientras que a mayor contenido de NFU la diferencia es mayor.

Al considerar un relleno de NFU de 3 m de espesor sin capas intermedias de material convencional la deformación del material se incrementa un 60% provocando mayores asientos en la coronación del terraplén (Duda & Siwowski, 2021b), como se aprecia en la Figura 153 donde la diferencia entre los puntos analizados es del 52%. Es necesario considerar una capa de material convencional sobre el relleno de NFU antes de aplicar una carga sobre cimentaciones poco profundas de al menos de 0,3 veces la altura total del relleno (Mahgoub & El Naggar, 2022), ya que se produce el punzonamiento de la capa granular superior y por lo tanto de la capa de la cimentación (Mahgoub & El Naggar, 2020).

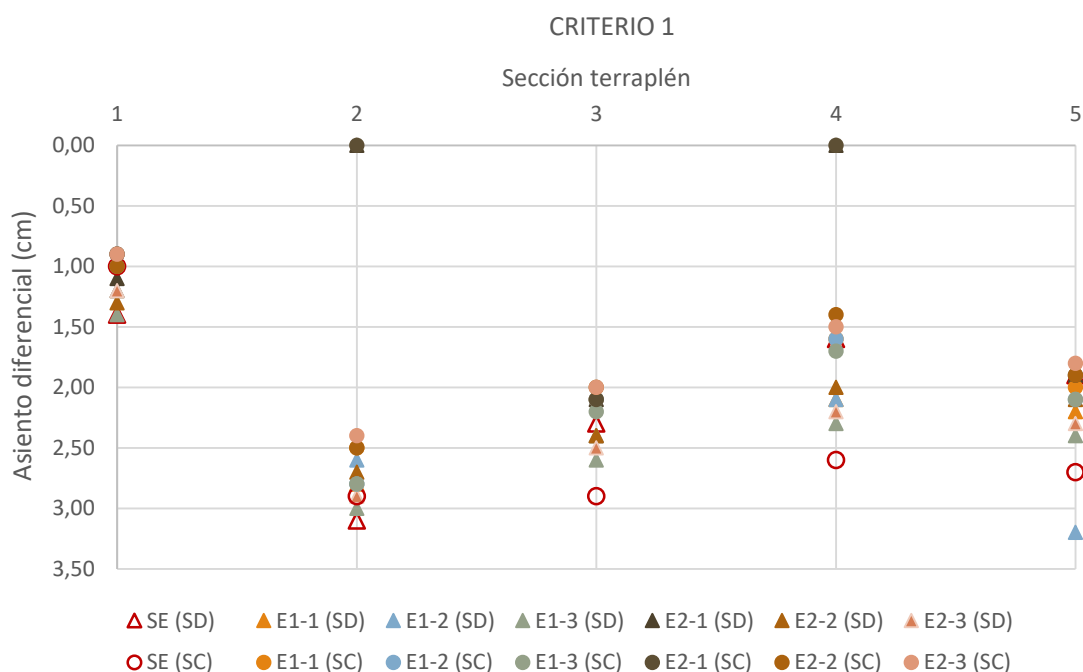


Figura 154. Criterio 1 según explanada en función de la sobrecarga con capas horizontales del terraplén

De la Figura 154 se concluye que los mayores asientos diferenciales se observan en aquellos terraplenes en los que no se consideró la ejecución de la explanada y se aplicó la sobrecarga de tráfico al completo. No obstante, **en el caso de considerar la aplicación de la sobrecarga en el lado derecho, los asientos diferenciales de los terraplenes compuestos por NFU y arena, son inferiores al no considerar la ejecución de ninguna superficie de explanación frente a los cálculos que sí lo consideraron**. A medida que aumenta el contenido de NFU los asientos diferenciales son mayores en todas las secciones, con un aumento de un 50% respecto a la sección R1.

Los resultados en otras investigaciones indican que hay una profundidad óptima para la colocación de las capas de refuerzo mediante NFU, en concreto a una profundidad de 0,25 veces el ancho de la cimentación (L. Li et al., 2019) y en estudios posteriores a 0,5 veces (L. Li et al., 2022), es decir, próximo a la aplicación de la carga. En el caso que nos ocupa, **la sección R4** considera una capa de NFU de 0,5m de espesor y a continuación un núcleo de arena, lo cual permite reducir en un 22% los asientos diferenciales. Además, se observa como la explanada de mayor espesor –E2-3- presenta un mayor asiento diferencial al aplicar la sobrecarga al completo. A nivel de asientos y comportamiento del terraplén en otras investigaciones se fija el contenido óptimo de NFU en un 5% en base a un modelo escalado, siendo necesario el análisis de comportamiento de modelos numéricos (L. Li et al., 2022). **Las secciones R4 y R5 presentan el menor contenido de NFU, concretamente el 47% y el 44%, no obstante, la sección R4 genera menores asientos diferenciales, por lo que además del contenido de NFU se determina que influye de forma determinante la disposición del mismo dentro de la sección, sobre todo al considerar la aplicación de la sobrecarga al completo.**

Respecto al **criterio 2**, que analiza la distorsión angular en base al límite de 1/300, se aprecia según la Figura 155 que solamente **superan el límite indicado, los terraplenes que contienen NFU y no consideraron la ejecución de ningún tipo de explanada** sobre la que aplicar la sobrecarga de tráfico al completo.

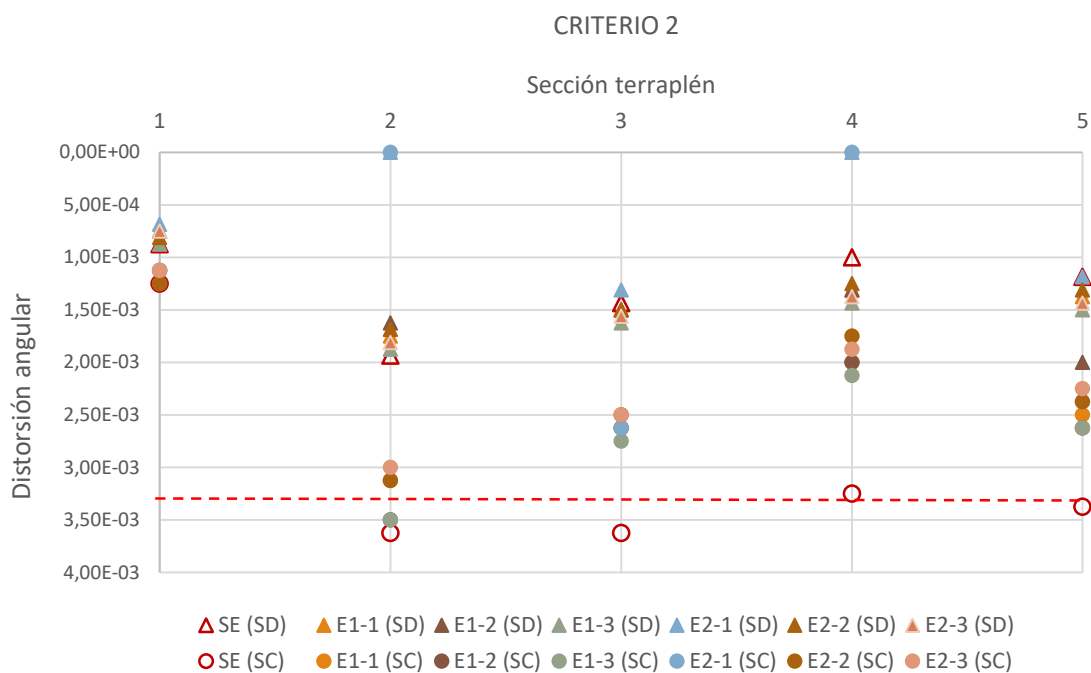


Figura 155. Criterio 2 según explanada en función de la sobrecarga con capas horizontales del terraplén

Por último, se evalúa el factor de seguridad según el criterio 3, obtenido para cada una de las explanadas en función de la sección del terraplén constituida mediante capas horizontales.

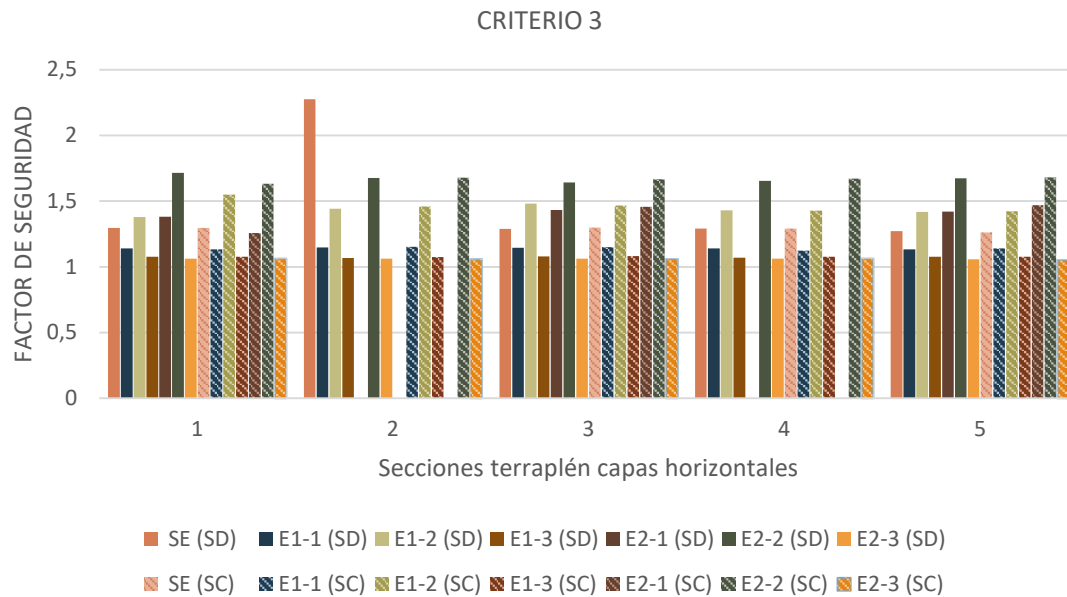


Figura 156. Criterio 3 según explicada en función de la sobrecarga de terraplén con capas horizontales.

El factor de seguridad para las soluciones que implican la ejecución de la explanada oscila entre 1,60 para las explanadas E2-2 (SD), E1-2 (SC) E2-2 (SC), sin incluir la explanada E2-1 para la cual no finalizó el cálculo en las secciones R2 y R4. La incorporación del resto de explanadas en las diferentes secciones arrojó un factor de seguridad ligeramente superior a la unidad, tanto para la aplicación de la sobrecarga en el lado derecho como en la totalidad del terraplén.

Para la sección R2 compuesta 100% por NFU, el factor de seguridad alcanzó un valor superior a 2,20 para la aplicación de la sobrecarga en el lado derecho, mientras que al considerar la aplicación de la sobrecarga al completo no se alcanzó la condición de equilibrio.

Con la finalidad de **disminuir los asientos diferenciales** entre el extremo -punto B- y el centro del terraplén -punto A- debido a la aplicación de la sobrecarga completa, se modificó la geometría de las capas que componen cada una de las secciones para incrementar el espesor de las capas de material convencional en el centro del terraplén y disminuir en los extremos el espesor de estas, de forma que esas zonas presentan mayor cantidad de NFU.

En la Figura 157 se representa la variación entre las deformaciones verticales de los puntos analizados en el caso de considerar la aplicación de la sobrecarga en la mitad derecha o al completo una vez modificada geometría de las capas del terraplén.

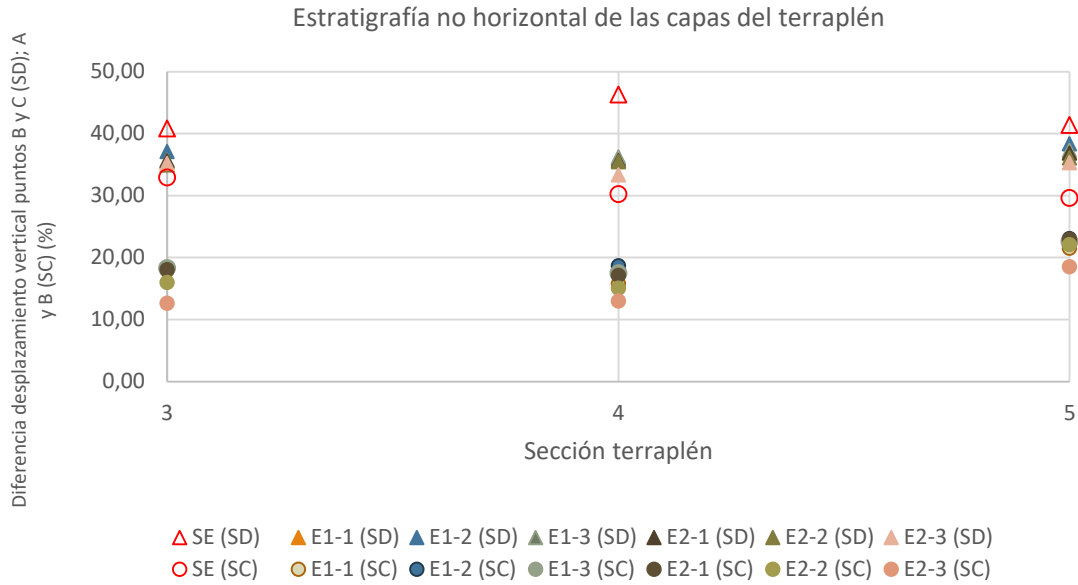


Figura 157. Despl. vertical según explanada y sobrecarga en el terraplén con capas no horizontales.

La diferencia en el desplazamiento vertical de los puntos analizados, respecto a considerar la ejecución del terraplén mediante capas horizontales, indica un incremento en el caso de no considerar la ejecución de explanada y aplicar la sobrecarga en el lado derecho en mayor medida para las secciones R4 y R5, en donde la modificación de las capas implicó un aumento del porcentaje de NFU, respecto a las secciones iniciales con capas horizontales.

No ocurre lo mismo si se considera la aplicación de la sobrecarga completa, ubicándose la diferencia de desplazamiento vertical en la franja de un 10% y un 20% de variación para las secciones R3 y R4, mientras que en el caso anterior se situaban en la franja del 20% al 30% de diferencia. Para la sección R5 la variación no supera el 3% aproximadamente respecto a la condición inicial de capas horizontales en la sección del terraplén, por lo que se modificaron los resultados.

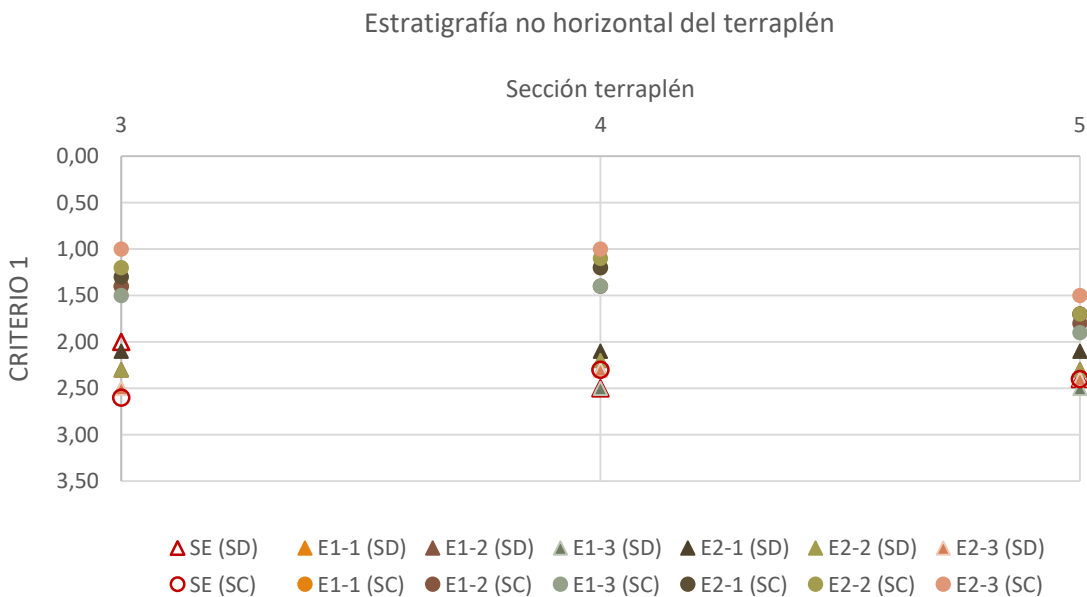


Figura 158. Criterio 1 según explanada en función de la sobrecarga capas no horizontales del terraplén.

De la Figura 158 se **concluye al igual que en el caso de considerar las capas del terraplén horizontales, que los mayores asientos diferenciales se dan en aquellos terraplenes en los que no se consideró la ejecución de la explanada.** En este caso, aunque el contenido de NFU de las secciones sea mayor, los asientos diferenciales no se incrementaron. En lugar de considerar la aplicación de la sobrecarga en la mitad derecha los asientos se equiparan a los obtenidos anteriormente, encontrándose en la franja de 2,00 cm a 2,50 cm, **mientras que al considerar la aplicación de la sobrecarga al completo los asientos diferenciales disminuyeron equiparándose a los obtenidos para la sección R1.**

Por lo tanto, la principal conclusión que se verifica de nuevo es **que la geometría del problema presenta un papel relevante a la hora de definir la deformación de la malla, y no sólo el contenido de NFU que presente la sección.**

Aumentando el contenido de material convencional en el centro del terraplén **se mejora el comportamiento de la sección frente a sobrecargas que actúan en la totalidad del mismo,** aunque ello implique una mayor diferencia entre los asientos diferenciales en función de la zona en la que se aplique la sobrecarga de tráfico considerada.

Respecto al **critero 2**, se aprecia según la Figura 159, que no se superó el límite para ninguna de las secciones al incrementar el porcentaje de NFU y no considerar la ejecución de **ningún tipo de explanada** sobre la que aplicar la **sobrecarga de tráfico al completo.**

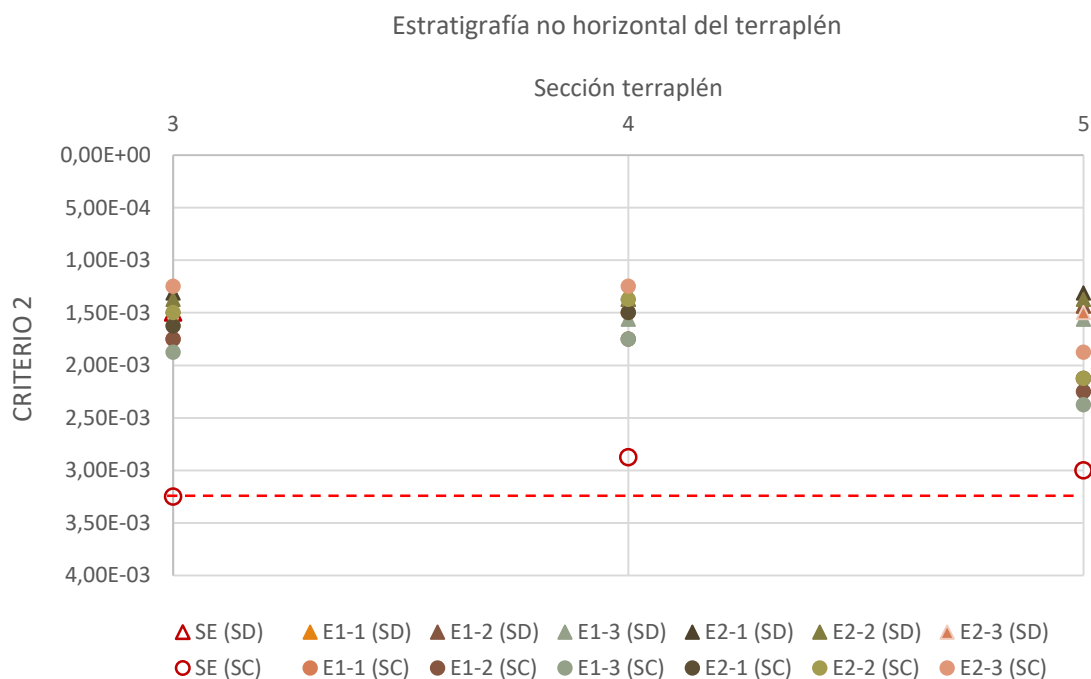


Figura 159. Criterio 2 según explanada y la sobrecarga con capas no horizontales del terraplén

Por último, se evalúa el **factor de seguridad** obtenido para cada una de las explanadas en función de la sección del terraplén constituida mediante capas no horizontales.

CRITERIO 3

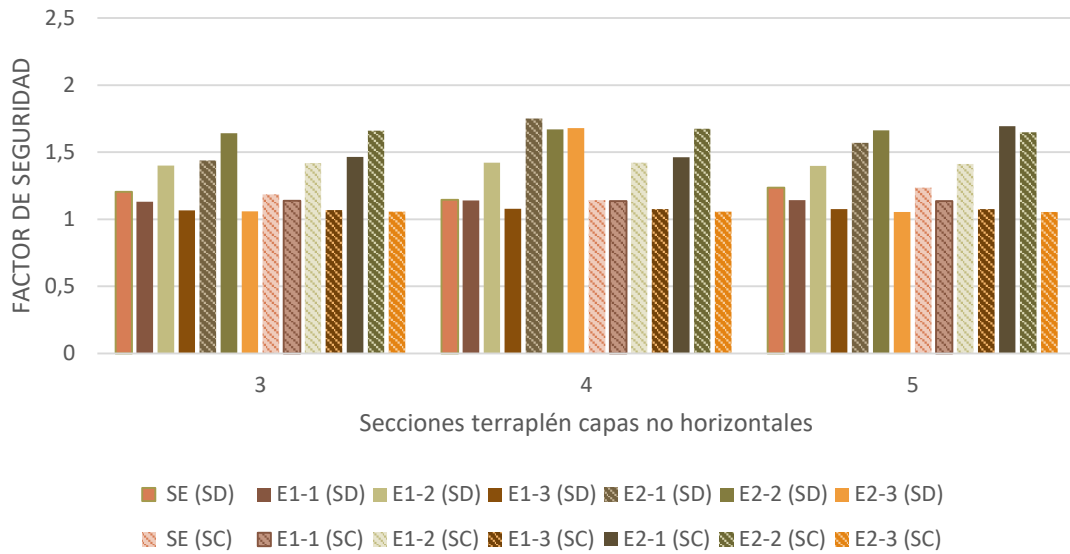


Figura 160. Criterio 3 según explanada y sobrecarga en el terraplén con capas no horizontales.

Respecto al **criterio 3**, cuyos resultados se muestran en la Figura 160, para la sección R3 y R5 no se aprecian diferencias significativas en los resultados obtenidos del factor de seguridad respecto a la hipótesis que considera la estratigrafía del terraplén horizontal.

La principal diferencia al modificar la geometría de las capas de las secciones del terraplén, es que **se alcanzó la condición de equilibrio en la sección R4 para la explanada E2-1 (SD/SC)**. Para esa misma sección, el factor de seguridad para la explanada **E2-3 (SD) se incrementó un 35,71%** respecto a la solución del terraplén con **capas horizontales**.

Para finalizar se incluye en la Figura 161 la desigualdad porcentual entre los asientos diferenciales al considerar la aplicación de la sobrecarga de tráfico actuando sobre la mitad derecha o en la totalidad del plano de la explanada en los terraplenes constituidos en capas horizontales y en capas con espesores desiguales.

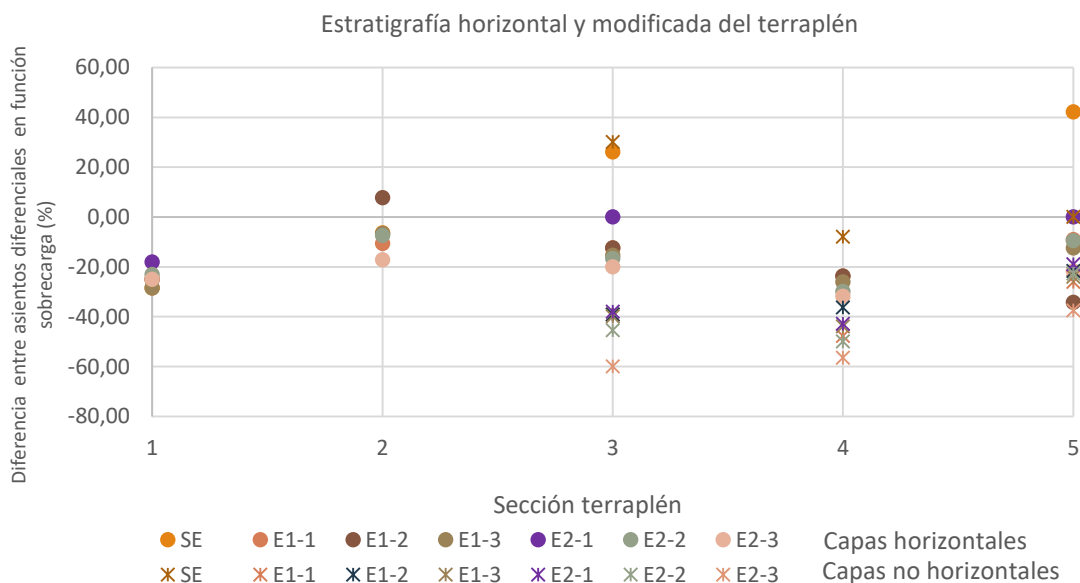


Figura 161. Dif. entre asientos diferenciales en función de la sobrecarga y geometría del terraplén

La principal conclusión que se obtiene es que aunque la modificación de la geometría de las capas del terraplén reduzca la deformación vertical en el centro del mismo al considerar la aplicación de la sobrecarga al completo, y por ende reduzca los asentos diferenciales, **no se reducen de igual forma los asentos diferenciales resultado de aplicar solamente la sobrecarga en la mitad derecha del terraplén, por lo que el comportamiento final ante sobrecargas de diferente alcance es menos equitativo.**

En contraposición suponer las capas del terraplén horizontales implica que la diferencia entre los asentos diferenciales en función de la aplicación de la sobrecarga, no presentan una gran variación en la mayoría de las explanadas y por lo tanto, el conjunto desarrolla asentos diferenciales similares ante cargas de diferente extensión.

capítulo 7

CONCLUSIONES EN BASE A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS

7.1 CONCLUSIONES RESPECTO A LA CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

El huso granulométrico de partida se corresponde con la definición “rubber fines”, con un **tamaño de partícula entre 12 y 50 mm**, frente al tradicional huso del “tire derived aggregate” (TDA), piezas con una forma geométrica entre los 12 y 305 mm, lo que permitió obtener las siguientes conclusiones respecto a la puesta en obra del material en base a su caracterización:

- A nivel granulométrico con el fin de evitar la dispersión del material e incrementar las labores de procesamiento se opta por aquellas muestras con un contenido de partícula de tamaño superior en base a las muestras disponibles **-S5 y S6-**.
- Las muestras **no presentan contenido en humedad** debido a la ausencia de fibras de textil que puedan favorecer la absorción de agua. Por lo que las hace idóneas frente a cambios de temperatura evitándose problemas de expansividad y retracción.
- Se observa que **el peso específico no presenta relación entre la variación del tamaño de la partícula**, pero para valores mayores de NFU sí hay variación, al tener un mayor contenido en acero. En caso de realizar mezclas con materiales de diferente densidad para su implementación, deberá considerarse la densidad aparente del conjunto en base al volumen que ocupa cada muestra.
- Se obtuvieron **resultados similares de densidad seca para el ensayo Próctor Normal y Próctor Modificado**, además del bajo contenido de humedad necesario para conseguir el valor óptimo de compactación. Por ello, no es necesario considerar medidas de compactación excepcionales que encarezcan la puesta en obra.
- **La permeabilidad del material garantiza el correcto drenaje del mismo hasta su correcta conducción**, protegida convenientemente por un geotextil que impida su obstrucción.
- **El índice de compresión noval es similar al de las arcillas de compresibilidad alta ($C_c \geq 0,25$)**, ya que el de las arenas oscila entre 0,02 a 0,03 para un estado denso. Esto indica que se producen mayores deformaciones que en el caso de las arenas. **En la aplicación del NFU el material debe haber sido sometido a una carga de preconsolidación, con el objetivo de trabajar con el valor de índice de hinchamiento (C_s) en la rama de descarga, de forma que los asientos se reduzcan del orden de cuatro veces, en el caso de aplicar el material en obra sin ningún tipo de precarga debería emplearse el índice de compresión (C_c)**. Por lo tanto, si se considera que sobre la capa de NFU existe una sobrecarga constante cuyo valor se encuentra entre los 50 a 200 kPa las deformaciones del material se mantienen constantes.
- El coeficiente de consolidación del NFU es inferior al de una arcilla sobreconsolidada para ese rango de sobrecargas (50 a 200 kPa). Lo que indica que el NFU prolongará en torno al doble de tiempo la consolidación del material.

- El **ángulo de rozamiento y la cohesión** presenta **valores similares a los materiales convencionales**, siendo importante considerar que **la presencia de agua puede reducir en un 65% el valor de la cohesión**, mientras que el ángulo de rozamiento no se vería afectado.
- Otro aspecto importante a considerar es la posible autocombustión del material, debido a los procesos de oxidación de los filamentos de acero expuesto, y que con el huso granulométrico propuesto en esta investigación desaparecen.
- Por último, los posibles lixiviados que puedan generarse deberán de conducirse a los mecanismos de drenaje previstos de forma que el N.F. se encuentre por debajo del NFU, más que por la generación de lixiviados, por la modificación de las propiedades del material frente a la presencia de agua.

El análisis de sensibilidad realizado indicó que el **peso específico es el parámetro que mayor repercusión tiene en el factor de seguridad**, y al presentar todas las muestras de NFU un peso específico similar, se considera como punto de partida para rellenos localizados la **muestra S6**. Esta muestra está compuesta por un mayor tamaño de partícula, y por lo tanto, el procesamiento de las mismas en las plantas de reciclado requiere de menores recursos. Además de favorecer la contención del granulado y la trabajabilidad en la puesta en obra.

En base a la conclusión anterior, en las aplicaciones geotécnicas propuestas se tomarán como punto de partida los valores característicos correspondientes a la muestra S6, los cuales se compararan con la muestra S5, al presentar características similares.

7.2 CONCLUSIONES RESPECTO A LAS APLICACIONES PROPUESTAS

Con el tiempo, la aceleración en la demanda de áridos y las nuevas limitaciones de carácter social y ambiental principalmente en los procesos de extracción, han favorecido que estos hayan pasado a tener un carácter agotable y consecuentemente a revalorizarse. **El empleo de árido natural proviene de la explotación de canteras y graveras no renovables mediante actividades de extracción que suponen un impacto negativo en la naturaleza.** A esto debe añadirse el consumo de energía que implican la extracción de estos materiales y el transporte del material, que supone un gran agravio al tratarse de materiales densos. Por otro lado, las especificaciones de los productos son cada vez mayores, por lo que se acude a cubrir este déficit en las plantas de tratamiento con sistemas que van incrementando el procesamiento de estos materiales. Por último, para evitar el impacto negativo de las canteras, estas deben rehabilitarse una vez terminada su explotación. Por ello, se concluye que **el empleo de NFU como relleno en obras de geotecnia favorece la conservación del paisaje y el hábitat natural.**

El empleo de granulado de neumático, supone una **reducción del 99% de las emisiones de CO2 a la atmósfera**, respecto al empleo de material convencional. Los resultados obtenidos a nivel informático no permiten obtener una **comparación vinculante, al no encontrarse los procesos definidos conforme al caso de estudio que aplica a esta investigación.** El empleo de NFU como material de relleno reduce la existencia de neumático de desecho, además del ahorro en el espacio de almacenaje, ya que en esta aplicación el aprovechamiento del material por metro cuadrado es mayor.

El uso de NFU en construcción puede ser más económico si existe disponibilidad local frente a los materiales convencionales. Por ejemplo, **el coste de usar NFU puede ser sobre un 10% y un 90% menos en algunos proyectos comparados con usar grava.** En general, los elevados costes de usar NFU están asociados con los procesos de tratamiento y el equipamiento necesario para llevar a cabo estas tareas. A igualdad de distancias, **el coste de transporte esperado por transportar NFU es menor que para los materiales convencionales debido a que el NFU es del orden de dos a tres veces más ligero que los materiales convencionales.** El empleo de este subproducto fomenta el ciclo de vida circular del material que deja de tener la consideración de residuo y pasa a incorporarse al flujo de mercado.

Implementar el uso de los subproductos derivados del NFU mediante el análisis de aplicaciones como material de **relleno localizado en el trasdós de estructuras de contención**, presenta las siguientes ventajas:

A nivel constructivo:

- **El coeficiente de seguridad al deslizamiento se incrementa** por el empleo de NFU en el trasdós del muro de contención al reducirse las tensiones horizontales y por ende los empujes.
- **En muros de 2,50 m de alzado el coeficiente de seguridad al deslizamiento se incrementó en torno a un 37% respecto al coeficiente de seguridad límite.**
- **En muros de 4,80 m de alzado no se alcanzó el valor límite para los coeficientes de seguridad analizados al suponer en el trasdós material convencional. Con el empleo de NFU el coeficiente de seguridad al deslizamiento se incrementó en un 44,85% respecto al valor límite.**
- Para **materiales sin cohesión** como la arena, los **coeficientes de resistencia al deslizamiento son similares** según el **CTE-DB-SE-C y EC-7**, empleando el Enfoque de Proyecto 2. En el caso de considerar materiales con cohesión como el NFU, el resultado obtenido mediante el **CTE-DB-SE-C** es más conservador, al **suponer actuando como mínimo sobre el trasdós del muro el 25% de las tensiones efectivas del suelo.**
- Para las dos alturas de alzado analizadas, la variación en el factor de seguridad al deslizamiento respecto al límite, muestra un valor similar en el caso de materiales sin cohesión como la arena. Para materiales con cohesión, según el **CTE-DB-SE-C el incremento respecto al valor límite es de un 25%, mientras que para el EC-7 el incremento alcanza el 70% de diferencia.**
- Respecto al factor de seguridad al vuelco para los dos alzados de muro contemplados, al considerar la cohesión del NFU, los momentos desestabilizadores se reducen, aumentando el factor de seguridad.
- **Al incrementar en contenido de material convencional en la sección M7 en un 25% se redujo el incremento respecto al límite en el F.S. global en un 10%-12%.**
- Si el diseño de los muros de contención en L se realiza en base al ELU se alcanza entre un 5 y 10% menos de seguridad que si el diseño se lleva a cabo en ELS, según análisis para las secciones M3 y M6.
- El incremento de la temperatura en el intradós de la sección M4 produce un empuje pasivo contra el terreno de relleno, mientras que para las secciones M6 y M7 se produce un empuje activo debido a la expansión del NFU.

A nivel económico:

- El coste por el empleo de hormigón armado en el muro de contención puede reducirse en un 20% si se emplea NFU en lugar de emplear material convencional.

A nivel medio ambiental:

- La reducción en el empleo de hormigón armado y por tanto el consumo de recursos, comienza a ser significativa para alzados de 4,80 m, siempre que se considere el uso del granulado de neumático con cohesión.
- Los **rellenos con NFU pueden disminuir la temperatura en un 20% si se compara con la sección M4** en el interior de los mismo, lo que **favorece el aislamiento térmico** frente a instalaciones que puedan ubicarse en dichas zonas.
- El uso de NFU contribuye a **reducir el empleo del hormigón armado en un 13,6% para alzados de muro de 2,50 m y en 27,7% para alzados de 4,80m**, en lugar de emplear como relleno material convencional.

A nivel normativo:

- En el artículo 332 del PG3-3 se indica que para rellenos localizados se debe emplear suelos adecuados y seleccionados, lo que supone una primera limitación a la hora de considerarse el NFU como material inadecuado o marginal.

- La principal diferencia del procedimiento desarrollado por el EC-7 con respecto al CTE-DB-SE-C es la adopción del método de cálculo basado en coeficientes parciales de seguridad.
- Los Enfoques de Proyecto 1.2 y 3 sobredimensionan en menor medida los factores de seguridad al deslizamiento y al vuelco respecto al límite, según el cálculo realizado para muros de 4,80 m de alzado. **Dichos Enfoques de Proyecto consideran la minoración de los parámetros del terreno, lo que supone el incremento del coeficiente de empuje activo, y por ende de los empujes sobre el trasdós del muro.**

Implementar el uso de los subproductos derivados del NFU mediante el análisis de aplicaciones **como material de relleno en la formación de terraplenes sobre terrenos con baja capacidad portante**, presenta las siguientes ventajas:

A nivel constructivo:

- Del análisis de sensibilidad realizado en base a la muestra S5 y S6 se concluye que no existe un patrón claro que permita diferenciar ambas muestras, a la hora de evaluar los desplazamientos verticales de los puntos analizados. No obstante se aprecia una **reducción en la deformación vertical entre un 14,00% a un 64,00% para las secciones R5-S6 y R2-S6 respecto a la sección constituida por material convencional**, lo que indica que las secciones que contiene NFU disminuyen las deformaciones en terrenos con baja capacidad portante.
- Respecto al tiempo necesario para la consolidación de la sección se observa que la sección R2 constituida por NFU al 100% tarda un 23% más de tiempo que la sección R1-20C formada por arena.
- Las secciones del terraplén ejecutadas a partir de la muestra **S6 tienen un F.S. superior a las secciones ejecutadas con la muestra S5**, el cual oscila entre un 3% y un 5%. **El factor de seguridad se incrementa respecto a la solución convencional entre un 37,6% para la sección R3-S6 a un 25% para la sección R5-S6.**
- La colocación de un geotextil del grupo 0 en cimentación del terraplén incrementa el factor de seguridad en un 8,45% respecto a la solución que no contempla la colocación del geotextil, según el análisis realizado para la sección R5-S6.
- Al suponer sobre la explanada del terraplén la colocación de una losa de H.A., la temperatura del núcleo del terraplén no presenta diferencias respecto a suponer material convencional tipo arena en coronación. Por lo que se concluye la capacidad de aislamiento del NFU frente al incremento de la temperatura exterior que se transmite al núcleo a través de los espaldones del terraplén.
- A la hora de contemplar la ejecución de pilotes hincados, deberá considerar el efecto rebote que presenta el NFU frente a los materiales convencionales en la capa superior del terreno.

A nivel económico:

- Disminuyen los costes de la obra al emplear un material reciclado, sólo considerándose el transporte al punto de formación del terraplén.

A nivel medio ambiental:

- Favorece la conservación de las canteras de árido natural y por ende del hábitat.
- Reduce el gasto de combustibles fósiles en el transporte por carretera, al suponer una menor carga para el mismo volumen de material.

A nivel normativo:

- En el PG3-P3 artículo 330 se indica las zonas de un terraplén en las que se deben emplear los distintos tipos de suelo, situándose los materiales marginales tipo NFU en el núcleo del terraplén. Además desde

el laboratorio de CEDEX se desarrolló una guía en donde se marcaba la geometría de este tipo de secciones para la formación de terraplenes. No obstante, **en este estudio se analizaron distintas secciones con el fin de determinar la influencia que la geometría de la sección presentaba en los resultados de finales.**

- Se modela cada una de las secciones del terraplén analizadas en capas de pequeño espesor, al observarse diferencias en el exceso de presiones intersticiales y en las deformaciones verticales.
- Su falta de implementación puede deberse a la falta de procedimientos en su puesta en obra y a la ausencia de normas de ensayo adecuadas que contemplen una caracterización detallada.

Implementar el uso de los subproductos derivados del NFU mediante el análisis de aplicaciones **como base para la colocación de explanadas para viales**, presenta las siguientes ventajas:

A nivel constructivo:

- Las secciones de terraplén tanto con capas horizontales como de diferente espesor compuestas por NFU y arena que **no consideran explanada, presentan una mayor diferencia porcentual de los desplazamientos verticales al considerar la aplicación de la sobrecarga al completo.** Por lo tanto, se concluye la necesidad de **considerar la formación de explanadas al emplear NFU como base para explanadas.**
- **La modificación de la geometría de los sustratos que componen el terraplén permite disminuir la deformación vertical en el centro respecto a los extremos, cuando se considera la aplicación de la sobrecarga de tráfico al completo.**
- Al considerar la geometría del terraplén compuesta por capas de diferente espesor, las variaciones porcentuales se incrementan entre los puntos analizados cuando la sobrecarga actúa en la mitad derecha, debido a la reducción del espesor de material convencional en los extremos. Sin embargo, **al aplicar la sobrecarga al completo la desigualdad entre los desplazamientos verticales se reducen un 10%, respecto al terraplén con estratigrafía horizontal.**
- Respecto al criterio 1, al considerar las capas del terraplén horizontales se detectó que las secciones que contenían NFU presentaban mayores asientos diferenciales en el caso de considerar la ejecución de las diferentes explanadas, cuando la sobrecarga actuaba en la mitad derecha. **Este hecho no se produce al considerar el terraplén con capas de diferente espesor, observándose asientos diferenciales de similar valor, por lo que debe analizarse detalladamente este efecto relacionado con la geometría del problema.**
- Los mayores asientos diferenciales se dan para las secciones **R2 y R3** de forma general al considerar cualquier explanada, salvo para el tipo E2-1 que no finalizó el cálculo en las secciones R2 y R4. Como primer factor determinante podría concluirse que son **las secciones que mayor cantidad de NFU presentan, sin analizar la geometría del terraplén.**
- Al modificar la geometría del terraplén, los asientos diferenciales al aplicar **la sobrecarga completa se redujeron a pesar de haber aumentado el contenido de NFU respecto a material convencional en todas las secciones**, salvo el perfil R5 cuya mejora no fue significativa. Por lo que se concluye, que **es posible alterar la deformación vertical en la coronación del terraplén en función del espesor de las capas que lo componen, incrementando en zonas sensibles la cantidad de material convencional.**
- Por todo ello, en el caso de firmes cuya aplicación de la sobrecarga sea completa, las secciones R3 y R4 presentan un mejor comportamiento frente a la sección R5 ante asientos diferenciales, siempre que las capas del terraplén no sean de espesor constante.

- Respecto a la distorsión angular solamente superan el límite considerado los terraplenes con capas horizontales que contienen NFU y no suponen la ejecución de ninguna explanada. Mientras que los terraplenes con capas de diferente espesor en función de la zona, no superan dicho límite.
- **El factor de seguridad no se incrementó en función de la geometría del terraplén para las distintas explanadas.** Las explanadas que superan el factor de seguridad de 1,5 son la E2-2 para la sección R1, R2, R3, R4 y R5. Las explanadas E2-1 y E2-2 para las secciones R4 y R5 suponiendo la geometría del terraplén en capas no horizontales, mientras que la explanada E2-1 no finalizó el cálculo en caso de suponer los sustratos del terraplén horizontales. Por lo tanto, **el incremento en el factor de seguridad en el caso de suponer las explanadas de la categoría E2, constituida por materiales de mayor módulo edométrico indica un mejor comportamiento frente a la sobrecarga aplicada.**
- La variación entre los asientos diferenciales en función de la aplicación de la sobrecarga es menor en el caso de suponer las capas del terraplén horizontales, mientras que al modificar la geometría del terraplén dicha desigualdad se incrementa al reducirse en torno a un 10% los asientos diferenciales en el caso de aplicar la sobrecarga al completo.

A nivel normativo:

Se descarta la posibilidad de ejecutar la explanada mediante NFU, debido al bajo módulo edométrico del material y a las prescripciones de la del PG3, artículo 330 donde se indica que solamente podrán emplearse materiales inadecuados si se estabilizan con cal o cemento. A ello se suma la ausencia de bibliografía en la que se analicen los parámetros resistentes a nivel geotécnico de estos compuestos.

7.3 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La valorización material del granulado de neumático como objeto de esta tesis doctoral, revela un amplio conocimiento de la materia a nivel internacional para un uso granulométrico diferente al empleado en esta investigación. Por lo que de forma simultánea, se han generado nuevas preguntas o vías de investigación a partir de las muestras analizadas en el laboratorio y las aplicaciones propuestas.

Como futuras líneas de investigación se indican a continuación aquellas pruebas o aplicaciones que resultan ser de interés para favorecer el empleo del granulado de NFU en el futuro y que podrían desarrollarse en trabajos complementarios, ya que por su alcance no han sido incluidos en la planificación abordada en esta investigación.

A nivel de caracterización mecánica del material sería conveniente abordar el ensayo de corte triaxial, permitiendo la determinación de la resistencia al corte y las relaciones de tensión-deformación en términos de tensiones totales al efectuarse el corte sin drenaje ni consolidación.

Respecto a la caracterización química del granulado de NFU empleado en esta investigación, los ensayos para el modelado geoquímico de lixiviados y reacción al fuego serían necesarios para corroborar el correcto estado del pH del agua en contacto con el NFU y la dificultad de autocombustión ante determinados ambientes. Relacionado con este último aspecto, resulta de gran relevancia obtener los parámetros característicos térmicos del material analizado.

Respecto a la mezcla del granulado de NFU con áridos convencionales, podría ser de gran utilidad una campaña de ensayos de laboratorio detallados en base a la composición de las muestras para aquellas aplicaciones en las que no fuera necesario contar con las ventajas del granulado de NFU, pero en las que se quisiera reducir el consumo de árido convencional y así priorizar el factor medioambiental.

En cuanto a la puesta en obra del material, se hace patente la justificación de un estudio detallado que permita obtener conclusiones objetivas en base a las propiedades del material y que de esta forma, no se margine el empleo de este producto para su valorización material en obras de geotecnia o construcción.

El software Plaxis 2D de elementos finitos ha sido de utilidad para abordar el análisis de la deformación y la estabilidad de las estructuras de suelo, siendo posible abordar en investigaciones futuras el empleo del programa en tres dimensiones para abordar estructuras de mayor complejidad.

Se hace patente la ausencia de normativa específica y manuales en el uso de este material en obras de rehabilitación o nueva construcción por lo que como línea de investigación podrían ampliarse los casos de estudio analizados, además de abordar otros relacionados con las propiedades de amortiguación del material debido a su elevada elasticidad.

Con todo ello se persigue conseguir el objetivo principal de esta investigación, que es favorecer la economía circular mediante el empleo de este material reciclado en aplicaciones que impliquen el uso de grandes cantidades del mismo, además de alcanzar la consiguiente mejora medioambiental y de concienciación social frente a la importancia del reciclado en el momento actual.

BIBLIOGRAFÍA

- Aderinlewo, O., & Okine, N. A. (2009). Sensitivity analysis of a scrap tire embankment using Bayesian influence diagrams. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1446–1455. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.07.003>
- Akbarimehr, D., Eslami, A., Aflaki, E., & Hajitaheriha, M. M. (2021). Investigating the effect of waste rubber in granular form on strength behavior of Tehran clay. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(18). <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08188-8>
- Amirkhanian, A., & Skelton, E. (2021). Tire-derived aggregate applications in civil engineering. In *Tire Waste and Recycling*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-820685-0.00016-8>
- Anvari, M., & Shooshpasha, I. (2014). Fine-grained sand reinforced with granulated tire. *International Journal on Recent Trends in Computing and Communication*, 2(9), 2879–2882.
- Arefnia, A., Dehghanbanadaki, A., & Kassim, K. A. (2021). Sustainable Implementation of Recycled Tire-Derived Aggregate as a Lightweight Backfill for Retaining Walls. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(11), 4196–4206. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-0218-3>
- Arroyo, M., San Martin, I., Olivella, S., & Saaltink, M. W. (2011). Evaluation of self-combustion risk in tire derived aggregate fills. *Waste Management*, 31(9–10), 2133–2141. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.04.014>
- Artacho Ramírez, Miguel Ángel ; Vicente Gomila, J. M. (2021). *NFU: Tech mining, Responsabilidad Ampliada del Productor y Economía circular*.
- Asefzadeh, A., Hashemian, L., & Bayat, A. (2018). Fatigue life evaluation of pavement embankments made with tire derived aggregates. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 45(9), 795–802. <https://doi.org/10.1139/cjce-2017-0671>
- ASTM D 1621. (n.d.).
- ASTM D 6270 (Vol. 08). (2017). <https://doi.org/10.1520/D6270-08R12.2>
- Carballo, T. D. S., Maya, D. A., Domínguez, D. J. M., & Píriz, D. V. (2007). *Plan De Negocio Planta De Reciclado De Neumáticos Fuera De Uso*. 28.
- Cecich, V., Gonzales, L., Hoisaeter, A., Williams, J., & Reddy, K. (1996). Use of shredded tires as lightweight backfill material for retaining structures. *Waste Management and Research*, 14(5), 433–451. <https://doi.org/10.1006/wmre.1996.0043>
- Chenari, R. J., & Poursalimi, N. (2017). Dynamic Properties of Sand-Tire Crumb Mixtures with Large Cyclic Direct Shear Apparatus. *EJGE*, 22, Bund., 5085–5105.
- Cheng, D. (2016). Usage Guide Tire-Derived Aggregate (TDA). *California Department of Resources Recycling and Recovery*, (January), 1–60.
- COMAREX. (n.d.). *Documento 36.- Proyecto de estabilización de laderas*.
- Concepción, M., & Menor, P. (2015). *Materiales sostenibles. Refugio de corcho como árido ligero en piezas de hormigón para fábrica de albañilería*.
- Delegaciones Municipales de Urbanismo y obras, E. A. de U. *Plan Especial de Protección y Catálogo del*

Conjunto Histórico de Utrera., (2018).

- Disfani, M. M., Mohammadinia, A., Narsilio, G. A., & Aye, L. (2020). Performance evaluation of semi-flexible permeable pavements under cyclic loads. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(3), 336–346. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1475666>
- Dram, A., Balunaini, U., Benmebarek, S., & Madhav, M. R. (2022). Seismic Performance of Cantilever Retaining Walls with Tire Shreds as Compressible Inclusion. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40(7), 3851–3872. <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02128-3>
- Duda, A., & Siwowski, T. (2021a). Experimental study on earth pressure reduction of waste tyre bales used as a backfill for rigid retaining structures. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 43(4), 411–424. <https://doi.org/10.2478/sgem-2021-0023>
- Duda, A., & Siwowski, T. W. (2021b). Stability and Settlement Analysis of a Lightweight Embankment Filled with Waste Tyre Bales over Soft Ground. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 467–491. <https://doi.org/10.1007/s40515-021-00184-5>
- Edil, T. B. (2002). *Mechanical properties and mass behaviour of shredded tire-soil*. 17–32. Tokyo, Japan: Proceedings of the International Workshop on Lightweight Geo-Materials (IW-LGM2002).
- Eldin, N. N. (1990). *Development of engineering criteria for shredded or whole tires in highway applications*. Wisconsin Madison.
- Escavy, J. I., Herrero, M. J., Lopez-Acevedo, F., & Trigos, L. (2022). The progressive distancing of aggregate quarries from the demand areas: Magnitude, causes, and impact on CO2 emissions in Madrid Region (1995–2018). *Resources Policy*, 75, 102506. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102506>
- Esmaili, M., Aela, P., & Hosseini, A. (2017). Experimental assessment of cyclic behavior of sand-fouled ballast mixed with tire derived aggregates. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 98(March), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.03.033>
- Europea Feder. (2013). *Actividad 2 : Transferencia Tecnológica relativa a materiales de construcción , incluyendo materiales marginales y residuos aprovechables terraplenes en el Sur de España y Norte de Marruecos , y metodologías para su*. 160.
- Feng, Z. Y., & Sutter, K. G. (2000). Dynamic Properties of Granulated Rubber/Sand Mixtures. *Geotechnical Testing Journal*, 23(3), 338–344. <https://doi.org/10.1520/GTJ11055J>
- Fomento, Ministerio de. (2015). PG3-PARTE 3. *BOE-A-2015-48, III. Otras*, páginas 584 a 1096.
- Fomento, Ministerio de, Ambiente, M. de M., & Públicas, C. de E. y experimentación en obras. (2013). Ficha técnica neumáticos fuera de uso (NFU). CEDEX. Retrieved from http://www.cedexmateriales.es/upload/docs/es_NEUMTICOSFUERADEUSODIC2013.pdf
- Fomento, M. (2003). ORDEN FOM/3460/2003, DE 28 DE NOVIEMBRE, POR LA QUE SE APRUEBA LA NORMA 6.1 IC SECCIONES DE FIRME, DE LA INSTRUCCIÓN DE CARRETERAS (BOE DE 12 DE DICIEMBRE DE 2003). *I. Disposiciones Generales, BOE-A-2003*.
- GeoSyntec Consultants. (2008). Guidance Manual for Engineering Uses of Scrap Tires. *GeoSyntec Consultants*, 182.
- Ghaaowd, I., McCartney, J. S., Thielmann, S. S., Sanders, M. J., & Fox, P. J. (2017). Shearing behavior of tire-derived aggregate with large particle size. I: Internal and Concrete Interface Direct Shear. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE*, 143(10), 1–11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001775](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001775)
- Gill, G., Mittal, R. K., & Rawat, S. (2021). Comprehensive feasibility study for application of waste tire chips in

enhancing the performance of shallow foundations. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(39), 55554–55578. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14876-5>

Gobierno de España. (2020). España Circular 2030. Estrategia Española de Economía Circular. *Estrategia Española de Economía Circular*, 1–65. Retrieved from https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/economia-circular/espanacircular2030_def1_tcm30-509532.PDF

Gong, H., Song, W., Huang, B., Shu, X., Han, B., Wu, H., & Zou, J. (2019). Direct shear properties of railway ballast mixed with tire derived aggregates: Experimental and numerical investigations. *Construction and Building Materials*, 200, 465–473. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.284>

Guía Técnica Arlita. (2018). *ARLITA En Proyectos de Infraestructuras y Geotecnia.*, 2ª Edición, 5–63.

I., A. (1993). *Laboratory study on properties of rubber soils* (Vol. 47). Indiana.

Industria, D. (2005). *Real Decreto 1619/2005, de 30 de diciembre, sobre la gestión de neumáticos fuera de uso.* 352–357.

Intaboot, N., & Kanbua, P. (2022). Investigation of concrete blocks mixed with recycled crumb rubber: A case study in Thailand. *Engineering and Applied Science Research*, 49(3), 413–424. <https://doi.org/10.14456/easr.2022.42>

Invertimos, E. F. (2013). Actividad 2 : Transferencia Tecnológica relativa a materiales de construcción , incluyendo materiales marginales y residuos aprovechables terraplenes en el Sur de España y Norte de Marruecos , y metodologías para su. *Unión Europea FEDER*.

IPCC2013. (2013). CLIMATE CHANGE 2013 Climate Change 2013. In *Researchgate.Net*. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Abha_Chhabra2/publication/271702872_Carbon_and_Other_Biogeochemical_Cycles/links/54cf9ce80cf24601c094a45e/Carbon-and-Other-Biogeochemical-Cycles.pdf

Jamshidi Chenari, R., Alaie, R., & Fatahi, B. (2019). Constrained Compression Models for Tire-Derived Aggregate-Sand Mixtures Using Enhanced Large Scale Oedometer Testing Apparatus. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(4), 2591–2610. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-00780-2>

Khan, B. J., Ahmad, M., Sabri, M. M. S., Ahmad, I., Zamin, B., & Niekurzak, M. (2022). Experimental and Numerical Evaluation of Mechanically Stabilized Earth Wall with Deformed Steel Bars Embedded in Tire Shred-Sand Mixture. *Buildings*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/buildings12050548>

Khorasani, F. F., & Kabir, M. Z. (2022). Experimental study on the effectiveness of short fiber reinforced clay mortars and plasters on the mechanical behavior of adobe masonry walls. *Case Studies in Construction Materials*, 16(September 2021), e00918. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00918>

Kim, J. Y., Park, J. K., & Edil, T. B. (1997). Sorption of organic compounds in the aqueous phase onto tire rubber. *Journal of Environmental Engineering*, 123, 827–835.

Kowalska, M. (2016). Compactness of Scrap Tyre Rubber Aggregates in Standard Proctor Test. *Procedia Engineering*, 161, 975–979. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.836>

Kowalska, M., & Chmielewski, M. (2017). Mechanical Parameters of Rubber-Sand Mixtures for Numerical Analysis of a Road Embankment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 245(5). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/5/052003>

Kyser, D., & Ravichandran, N. (2016). Properties of chipped rubber roofing membrane and sand mixtures for civil engineering applications. *Journal of Building Engineering*, 7, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.05.008>

Li-Hua, L., Shuai-Shuai, L., Heng-Lin, X., Wei-Qiang, F., Jun-Peng, L., & Pei-Chen, W. (2022). Experimental investigation on reinforcement effect of sustainable materials for different subgrades. *Journal of*

- Cleaner Production*, 343(February), 130944. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130944>
- Li, L., Cui, F., Ferreira, P., Xiao, H., & Jie, H. (2019). Experimental study of embankments with different reinforcement materials and spacing between layers. *Geotextiles and Geomembranes*, 47(4), 477–482. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.03.003>
- Li, L., Sheng, H., Xiao, H., Zhou, X., Li, W., & Liu, Y. (2022). Mechanical Behavior of Reinforced Embankment with Different Recycling Waste Fillers. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 26, 3251–3264. <https://doi.org/10.1007/s12205-022-0908-5>
- Li, L., Xiao, H., Ferreira, P., & Cui, X. (2016a). Study of a small scale tyre-reinforced embankment. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(2), 201–208. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.08.004>
- Li, L., Xiao, H., Ferreira, P., & Cui, X. (2016b). Study of a small scale tyre-reinforced embankment. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(2), 201–208. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.08.004>
- Li, S., & Li, D. (2018). Mechanical Properties of Scrap Tire Crumbs-Clayey Soil Mixtures Determined by Laboratory Tests. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018.
- M. Sc. Thesis by Behzat Alp ATAPEK, C. E. (2008). *Determination of Properties of Composite Soil With Used Tire Granulates, Sand and Cement*.
- Mahgoub, A., & El Naggar, H. (2020). Shallow foundations on lightweight TDA backfill: Field tests and 3D numerical modelling. *Computers and Geotechnics*, 126(June), 103761. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103761>
- Marcotte, B. A., & Fleming, I. R. (2020). Damage to geomembrane liners from tire derived aggregate. *Geotextiles and Geomembranes*, 48(2), 198–209. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.11.005>
- Martínez López, J. A. (2013). *Universidad Politécnica de Madrid Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos*.
- McCartney, J. S., Ghaaowd, I., Fox, P. J., Sanders, M. J., Thielmann, S. S., & Sander, A. C. (2017). Shearing behavior of tire-derived aggregate with large particle size. II: Cyclic simple shear. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(10), 04017079. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001775](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001775)
- Medio Ambiente, S. G. (2001). Boletín Oficial del Estado núm. 260. *Boletín Oficial Del Estado*, 39547–39555.
- Meguid, M. A., & Youssef, T. A. (2018). Experimental investigation of the earth pressure distribution on buried pipes backfilled with tire-derived aggregate. *Transportation Geotechnics*, 14, 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2017.11.007>
- Mel Fraga, J. (2017). *Nuevo modelo de evaluación de la sostenibilidad de estructuras de hormigón*. 397.
- Meles, D. T. (2014). *APPLICATION OF TIRE DERIVED AGGREGATE AS*.
- Mills, B., & McGinn, J. (2010). Design, construction, and performance of a highway embankment failure repaired with tire-derived aggregate. *Transportation Research Record*, (2170), 90–99. <https://doi.org/10.3141/2170-11>
- Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente. (2013). Programa Estatal De Prevención De Residuos. *Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural*, 32.
- Ministerio de Fomento. (2006). *Guía para el proyecto y la ejecución de muros de escollera en obras de carretera*. (Secretaría de Estado de infraestructuras y planificación).
- Ministerio de Fomento. (2015). *Pliego de prescripciones técnicas general para obras de carreteras y puentes (PG-3)*. 385. Retrieved from

<http://www.fomento.gob.es/MFOM.CP.Web/handlers/pdfhandler.ashx?idpub=ICW020>

- Ministerio de la Presidencia de España. (2021). Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética. *Boletín Oficial Del Estado*, 26798–26800.
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2009). Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-2015 (PNIR). *Ministerio De Medio Ambiente, Y Medio Rural Y Marino*, (49, 26 de febrero), 19893–20016. Retrieved from <https://www.boe.es/boe/dias/2009/02/26/pdfs/BOE-A-2009-3243.pdf>
- Mohajerani, A., Kurmus, H., Conti, D., Cash, L., Semcesen, A., Abdurahman, M., & Rahman, M. T. (2022). Environmental impacts and leachate analysis of waste rubber incorporated in construction and road materials: A review. *Science of the Total Environment*, 835(August 2021), 155269. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155269>
- Mohamad, E. T., Latifi, N., Marto, A., Moradim, R., & Abad, S. V. A. N. K. (2013). Effects of relative density on shear strength characteristics of sand-tire chips mixture. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 18 D, 623–632.
- Montella, G., Govindjee, S., & Neff, P. (2016). The Exponentiated Hencky Strain Energy in Modeling Tire Derived Material for Moderately Large Deformations. *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, 138(3), 1–19. <https://doi.org/10.1115/1.4032749>
- Nascimento, U. S., Ismail, K. A. R., Lino, F. A. M., & Nóbrega, C. R. E. S. (2021). Crushed Rubber from Used Tires for Thermal Insulation of Walls and Flat Roofs: Modeling, Validation and Comparison with Conventional Technology. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(12), 12355–12372. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-05942-8>
- Ni, P., Qin, X., & Yi, Y. (2018). Use of tire-derived aggregate for seismic mitigation of buried pipelines under strike-slip faults. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115(September), 495–506. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.09.018>
- Obras de tierra y terraplenes | CEDEX. (n.d.). Retrieved April 3, 2018, from <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/32/neumaticos-fuera-de-uso/valorizacion/aplicaciones/311/obras-de-tierra-y-terraplenes.html>
- OFICEMEN. (2019). *Guía de seguimiento y notificación de las emisiones GEI del sector cementero español en el marco del IV periodo ETS 2021-2031*. 184. Retrieved from https://www.oficemen.com/wp-content/uploads/2019/05/Guía-de-seguimiento-y-notificación-de-las-emisiones-GEI-del-sector-cementero-español_2019.pdf
- Okur, D. V., & Umu, S. U. (2018). Dynamic Properties of Clean Sand Modified with. *Hindawi. Advances in Civil Engineering*, 2018, 11. <https://doi.org/10.1155/2018/5209494>
- Park, J. K., Edil, T. B., Kim, J. Y., Huh, M., Lee, S. H., & Lee, J. J. (2003). Suitability of shredded tyres as a substitute for a landfill leachate collection medium. *Waste Management and Research*, 21(3), 278–289. <https://doi.org/10.1177/0734242X0302100311>
- Parlamento Europeo, & Consejo Unión Europea. Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y el Consejo. , Diario Oficial de la Unión Europea § (2018).
- PEMAR. (2015). Spanish National Framework Waste Management Plan 2016-2020. *Ministry of Environmental, Rural and Marine Issues*, 1–182. Retrieved from <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/planes-y-estrategias/Planes-y-Programas.aspx>
- PennDOT Chief Engineer’s Office. (2008). *TARRTOWN BRIDGE PROJECT CASE STUDY GUIDANCE*.
- Raeesi, R., Soltani, A., King, R., & Disfani, M. M. (2020). Field performance monitoring of waste tire-based permeable pavements. *Transportation Geotechnics*, 24(February), 100384.

<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100384>

- Rahgozar, M. A., & Saberian, M. (2016). Geotechnical properties of peat soil stabilised with shredded waste tyre chips. *International Mire Conservation Group and International Peatland Society*, 18, 1–12. <https://doi.org/10.19189/Map.2015.OMB.205>
- Reddy, S. B., Krishna, A. M., & Reddy, K. R. (2018). Sustainable Utilization of Scrap Tire Derived Geomaterials for Geotechnical Applications. *Indian Geotechnical Journal*, 48(2), 251–266. <https://doi.org/10.1007/s40098-017-0273-3>
- Rezaei B., A., Kolahehdou, E. M., Dargush, G. F., & Weber, A. S. (2012). Ground source heat pump pipe performance with Tire Derived Aggregate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(11–12), 2844–2853. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.02.004>
- Salud, M. D. E., Asistencia, P. Y., Sectorial, U., La, D. E. P. D. E., Informacion, S. D. E., Salud, G. D. E., ... Pais, D. E. L. (n.d.). "Memoria Anual." 1–15.
- Si, R., Wang, J., Guo, S., Dai, Q., & Han, S. (2018). Evaluation of laboratory performance of self-consolidating concrete with recycled tire rubber. *Journal of Cleaner Production*, 180, 823–831. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.01.180>
- SIGNUS Ecovalor. (2011). Memoria 2011 - 2012. *Memoria 2011*, 1–11.
- SIGNUS Ecovalor, S. L. (2007). *El autentico valor de los neumáticos usados*. 9–25.
- SIGNUS Ecovalor, S. L. (2009). Eco Valor. *EcoValor*, 1, 3.
- SIGNUS Ecovalor, S. L. (2014). Dando valor al neumático fuera de uso. *Memoria De Actividades*, 29.
- SIGNUS Ecovalor, S. L. (2020). *Memoria anual 2020*.
- Tatliso, N., Edil, T. B., & Benson, C. H. (1998). Interaction between reinforcing geosynthetics and soil-tire chip mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 124, pp. 1109–1119. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1998\)124:11\(1109\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:11(1109))
- Thomas, B. S., & Chandra Gupta, R. (2016). Properties of high strength concrete containing scrap tire rubber. *Journal of Cleaner Production*, 113, 86–92. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.019>
- TNU. (2013). *Reciclar para ser sostenible*.
- Toledo, M. A. Á. de T., & Lloret, A. M. (2009). *CARACTERIZACIÓN DE NEUMATICOS FUERA DE USO TROCEADOS PARA SU RECICLADO EN OBRA CIVIL*.
- Tratamiento de Neumáticos Usados - TNU*. (2014). Retrieved from <http://www.tnu.es/w/126/vias-de-metro-con-base-de-neumaticos-fuera-de-uso>
- Tweedie, J. J., Humphrey, D. N., & Sandford, T. C. (1998). *Tire Chips as lightweight backfill for retaining walls - Phase II*. Maine, Orono.
- Wartman, J., Asce, M., Natale, M. F., Strenk, P. M., & Asce, M. (2007). *Immediate and Time-Dependent Compression of Tire Derived Aggregate*.
- Wu, W. Y., Benda, C. C., & Cauley, R. F. (1997). Triaxial Determination of Shear Strength of Tire Chips. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(5), 479–482. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1997\)123:5\(479\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:5(479))
- Yi Dong, John S. McCartney, N. L. (ASCE). (2016). Geo-Chicago 2016 GSP 272 316. *Geo-Chicago 2016*, 3(Horvath 1994), 316–325. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001506](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001506)
- Youwai, S., & Bergado, D. T. (2004). Numerical analysis of reinforced wall using rubber tire chips-sand

mixtures as backfill material. *Computers and Geotechnics*, 31(2), 103–114.
<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2004.01.008>

Páginas web:

ABC de Sevilla (22 de febrero de 2022). *Proyectan en Andalucía una planta pirolítica para convertir los neumáticos usados en biocombustibles*. https://sevilla.abc.es/economia/sevi-proyectan-andalucia-planta-pirolitica-para-convertir-neumaticos-usados-biocombustibles-202202220717_noticia.html

Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos [ANEFA] (18 de junio de 2020). *El sector de los áridos en 2019 y perspectivas 2020*. <https://www.aridos.org/el-sector-de-los-aridos-en-2019-y-perspectivas-2020/>

European Statistical System (Eurostat) (4 de enero de 2022) Treatment of waste by waste category, hazardousness and waste management operations.
<https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>

Metabase-TCQ 2000: Datos Ambientales. ITEC, Barcelona, Cataluña, 2005 (marzo de 2022) [ITEC]. Disponible en <http://www.itec.cat>.

SIGNUS Ecovalor (2022). *Signus cierra el año 2021 con un elevado nivel de recogida, superando las 200.000 toneladas de neumáticos*. Disponible en: <https://www.signus.es/signus-cierra-el-ano-2021-con-un-elevado-nivel-de-recogida-superando-las-200-000-toneladas-de-neumaticos/>