



UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE MURCIA

ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO
Doctorado en Tecnologías de la Computación e Ingeniería
Ambiental

Aportaciones a la investigación relativa a las zonas
de transición de rigidez ferroviaria, mediante la
optimización constructiva de la transición

Autora:

Dña. Miriam Labrado Palomo

Directores:

Dr. D. Jesús H. Alcañiz Martínez

Dra. Dña. Julia I. Real Herráiz

Murcia, julio de 2022



UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE MURCIA

ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO
Doctorado en Tecnologías de la Computación e Ingeniería
Ambiental

Aportaciones a la investigación relativa a las zonas
de transición de rigidez ferroviaria, mediante la
optimización constructiva de la transición

Autora:

Dña. Miriam Labrado Palomo

Directores:

Dr. D. Jesús H. Alcañiz Martínez

Dra. Dña. Julia I. Real Herráiz

Murcia, julio de 2022



AUTORIZACIÓN DEL DIRECTOR DE LA TESIS PARA SU PRESENTACIÓN

El Dr. D. Jesús H. Alcañiz Martínez y el Dra. Dña. Julia I. Real Herráiz como Directores de la Tesis Doctoral titulada "Aportaciones a la investigación relativa a las zonas de transición de rigidez ferroviaria, mediante la optimización constructiva de la transición" realizada por Dña. Miriam Labrado Palomo en el Programa de Doctorado en Tecnologías de la Computación e Ingeniería Ambiental, **autoriza su presentación a trámite** dado que reúne las condiciones necesarias para su defensa.

Lo que firmo, para dar cumplimiento al Real Decreto 99/2011 de 28 de enero, en Murcia a 23 de Mayo de 2022.

**ALCAÑIZ
MARTINEZ
JESUS
HERMINIO -
24301654S**

Firmado digitalmente por ALCAÑIZ MARTINEZ JESUS HERMINIO - 24301654S
Nombre de reconocimiento (DN):
c=ES,
serialNumber=DCES-24301654S,
givenName=JESUS HERMINIO,
sn=ALCAÑIZ MARTINEZ JESUS HERMINIO - 24301654S
Fecha: 2022.05.02 13:44:51 +02'00'

Fdo. Dr. D. Jesús H. Alcañiz Martínez

**REAL
HERRAIZ
JULIA IRENE
- 04579036N**

Firmado digitalmente por REAL HERRAIZ JULIA IRENE - 04579036N
Fecha: 2022.05.24 08:25:51 +02'00'

Fdo. Dra. Dña. Julia I. Real Herráiz

AGRADECIMIENTOS

A todas las personas que han hecho posible esta tesis doctoral, muchas gracias por su apoyo.

De forma muy especial, agradezco a mi director de tesis, Dr. D. Jesús H. Alcañiz, su guía durante la ejecución de este trabajo, y también a mi tutor, Dr. D. Pedro Castrillo, por la ayuda que siempre me ha prestado durante el programa de doctorado.

A Dra. Dña. Julia I. Real, además de su labor como directora, le agradezco tantos años de aprendizaje a su lado, por su apoyo tanto profesional como personal.

A mis padres y a mi hermano Emilio, por su amor incondicional. Por acompañarme en cada paso, por estar siempre ahí, y en definitiva, por ser lo mejor de mi vida.

A Rodrigo, por su apoyo y comprensión, por ser un mar en calma.

RESUMEN

En las líneas ferroviarias, las denominadas zonas de transición están situadas entre las estructuras civiles y los terraplenes. Debido a la diferencia de rigidez entre ambos elementos, se producen asientos diferenciales que resultan en un daño directo a la vía, ya que la sobreexcitación dinámica que sufren los vehículos ferroviarios en dichas zonas acelera la degradación vertical de la vía. Los administradores han intentado sin éxito resolver este problema mediante el uso de cuñas de transición granulares. Este tipo de soluciones consisten en disponer entre la estructura y el terraplén una serie de capas de materiales tratados con cemento y/o de mejores prestaciones mecánicas, con la finalidad de materializar una transición de rigidez que se traduzca en un perfil de asientos adecuado y progresivo. No obstante, presentan inconvenientes no deseables al resultar soluciones muy costosas que requieren estrictos controles de calidad para su correcta ejecución.

Es en este marco es donde surge el reto científico de la presente Tesis Doctoral, que pretende desarrollar una nueva solución para optimizar la transición de rigidez en las zonas de transición ferroviarias. El diseño de la nueva solución pasará por un proceso de selección de alternativas propuestas, que serán sometidas a diferentes fases de evaluación del comportamiento estructural exigido, a través de la obtención de resultados, tanto analíticos de la simulación numérica de diferentes soluciones, como experimentales de los ensayos de un banco de pruebas construido para materializar las cuñas de transición a escala, teniendo en cuenta los condicionantes técnico-económicos requeridos, hasta dar con la solución óptima mediante losas de hormigón prefabricado y proceder a su validación como cuña prefabricada de transición de rigidez mediante su implementación en un escenario real.

Adicionalmente, se estudió si la nueva cuña sería válida para ser instalada en entornos urbanos, ya que se pensaba que la transmisión de las vibraciones a través del hormigón podría ser demasiado elevada. Para ello, se realizó un estudio comparativo entre el comportamiento vibratorio empleando la nueva cuña prefabricada frente a las tradicionales cuñas granulares para comprobar cuál sería la mejor solución para entornos urbanos.

Palabras Clave: Infraestructura ferroviaria, zonas de transición, rigidez vertical, cuñas de transición, vibraciones, construcciones prefabricadas, tecnología de los ferrocarriles

ABSTRACT

On railway lines, so-called transition zones are located between civil structures and embankments. Due to the difference in stiffness between both elements, differential settlements occur that result in direct damage to the track, since the dynamic overexcitation suffered by rail vehicles in these areas accelerates the vertical deformability of the track. Railway infrastructure managers have tried unsuccessfully to solve this problem by using granular wedges. This type of solution consists of arranging between the structure and the embankment a series of layers of materials treated with cement and / or better mechanical performance, to materialize a transition of track vertical stiffness in transition zones that translates into an adequate and progressive settlement profile. However, they have undesirable drawbacks as they are very expensive solutions and require strict quality controls for their correct execution.

It is in this framework where the scientific challenge of this Doctoral Thesis arises, which aims to develop a new solution to optimize the transition of track vertical stiffness in railway transition zones. The design of the new solution will go through a selection of proposed alternatives, which will be subjected to different stages of evaluation of the required structural performance, through obtaining results, both analytical of the numerical simulation of different solutions, and experimental of the tests of a field test built to materialize the transition wedges to real scale, taking into account the technical-economic conditions required, until finding the optimal solution using precast concrete slabs and proceeding to its validation as a precast wedge of stiffness transition by means of its implementation in a real scenario.

Furthermore, it was studied whether the new wedge would be valid to be installed in urban environments, since it was thought that the transmission of vibrations through the concrete could be too high. For this, a comparative study was carried out between the vibratory performance using the new prefabricated wedge versus the traditional granular wedges to verify which would be the best solution for urban environments.

Keywords: Railway infrastructure, track transition, vertical stiffness, transition wedges, vibrations, prefabricated constructions, railway technology

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	17
ÍNDICE DE TABLAS	29
ÍNDICE DE GRÁFICAS	33
1. INTRODUCCIÓN	39
2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	43
2.1 OBJETIVO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN	45
2.2 OBJETIVOS CIENTÍFICOS	45
2.3 METODOLOGÍA PROPUESTA.....	48
3. ESTADO DEL ARTE.....	53
3.1 INVESTIGACIONES SOBRE EL ANÁLISIS DEL CAMBIO DE RIGIDEZ EN ZONAS DE TRANSICIÓN.....	56
3.1.1 Evaluación de factores condicionantes y efectos sobre la vía y su uso	58
3.1.2 Estudios experimentales y modelos numéricos.....	62
3.2 INVESTIGACIÓN DE SOLUCIONES PARA LA MITIGACIÓN EN ZONAS DE TRANSICIÓN	67
3.2.1 Actuando en la infraestructura	68
3.2.2 Actuando en la superestructura	73
4. DISEÑO Y CÁLCULO DE LA NUEVA CUÑA DE TRANSICIÓN	79
4.1 ESTUDIO DE ALTERNATIVAS.....	82

4.1.1	Enfoque inicial mediante recomendaciones técnicas.....	82
4.1.2	Prototipos planteados	86
4.2	MODELIZACIÓN NUMÉRICA.....	98
4.2.1	Dominio de estudio	98
4.2.2	Modelos planteados	121
4.2.3	Resultados obtenidos.....	133
4.2.4	Análisis simplificado de la dinámica ferroviaria.....	210
4.2.5	Consideraciones acerca de la convergencia y el tiempo	219
4.3	SELECCIÓN DE SOLUCIONES ÓPTIMAS. TOMA DE DECISIÓN	221
4.4	DIMENSIONADO DE SOLUCIONES ÓPTIMAS	228
4.4.1	Caracterización mecánica del elemento estructural.....	230
4.4.2	Dimensionado de las losas	232
4.4.3	Dimensionado de los marcos	239
5.	DISEÑO DE LA SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA	247
5.1	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS.....	250
5.1.1	Diseño del banco	256
5.1.2	Caracterización mecánica de la infraestructura de tierra.....	258
5.1.3	Construcción del banco de pruebas	263
5.2	PARÁMETROS DE MEDIDA Y AUSCULTACIÓN	266
5.2.1	Introducción	266
5.2.2	Sistemas de auscultación y monitorización	267
5.2.3	Parámetros y magnitudes del banco de pruebas.....	268

5.2.4 Montaje, auscultación y medida de parámetros de control	269
5.3 RESULTADOS OBTENIDOS	273
6. CÁLCULO DINÁMICO: ANÁLISIS DE VIBRACIONES	281
6.1 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL TRAMO DE VÍA EN ESCENARIO REAL	284
6.2 CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DEL MATERIAL MÓVIL	285
6.3 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO EMPLEADO EN ESCENARIO REAL	285
6.4 CÁLCULO DINÁMICO DEL TRAMO DE VÍA DEFINIDO CON LA SOLUCIÓN PROPUESTA	288
6.4.1 Condicionantes previos.....	288
6.4.2 Enfoque de los casos	289
6.4.3 Resultados obtenidos.....	290
6.4.4 Conclusiones del análisis dinámico	293
7. DISCUSIONES, CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	295
7.1 DISCUSIONES.....	299
7.2 CONCLUSIONES.....	303
7.3 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	303
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	307

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1.1. Ejemplos de variaciones acentuadas de rigidez vertical de la vía.
Fuente: [6] 57

Figura 3.1.2. Variaciones rigidez vertical. Fuente: [18] 61

Figura 3.1.3. Distribución de tensiones y deflexiones verticales de la traviesa a lo largo de una transición obra de fábrica-plataforma natural. Fuente: [45] 66

Figura 3.1.4. Efecto de la elasticidad de la placa de asiento en una transición obra de fábrica-plataforma natural: reacción bajo traviesa (izq.) y asiento después de $1 \cdot 10^6$ ciclos (der.). Fuente: [46]..... 67

Figura 3.2.1. Esquema funcionamiento de las cuñas de transición tradicionales.
Fuente: [48] 69

Figura 3.2.2 Ejemplo de cuña de transición a viaducto. Fuente: [49]..... 69

Figura 3.2.3. Ejemplos de estructuras de transición propuestos por algunas administraciones ferroviarias. Fuente: [49] 70

Figura 3.2.4. Sección de transición terraplén-obra de fábrica de la línea Madrid-Sevilla. Fuente: [51] 71

Figura 3.2.6. Esquema de la losa de transición. Fuente: [52]. 72

Figura 3.2.7. Funcionamiento de la losa de transición. Fuente: [52]. 72

Figura 3.2.9. Placa de asiento bajo carril. Fuente: [60]..... 74

Figura 3.2.9. Suela bajo traviesa. Fuente: [63]..... 75

Figura 3.2.10. Manta elástica en vía con balasto. Fuente: [70]..... 76

Figura 3.2.11. Detalle constructivo de zona de transición, planta y alzado Tramo de Alta Velocidad Vigo Urzaiz-Soutomaior. Fuente: [75] 77

Figura 3.2.12. Traviesas cuadro propuestas como solución superestructural de transición de vía en balasto a vía en placa. Fuente: [80]. 77

Figura 4.1.1 Esquema de transición en obra de fábrica enterrada semi-profunda. Fuente: [81]	83
Figura 4.1.2 Esquema de transición en obra de fábrica enterrada superficial. Fuente: [81]	84
Figura 4.1.3 Esquema de transición en estructura a rasante. Fuente: [81]	84
Figura 4.1.4 Detalle del esquema de transición en estructura a rasante. Fuente: [81]	85
Figura 4.1.5 Organigrama de los casos planteados. Fuente: Elaboración propia ..	85
Figura 4.1.6 Organigrama de los prototipos planteados. Fuente: Elaboración propia	86
Figura 4.1.7 Esquema 3D, vistas y cotas del modelo corto cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia	87
Figura 4.1.10 Esquema 3D, vistas y cotas del modelo largo cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia	88
Figura 4.1.13 Esquema 3D, vistas y cotas del modelo corto cuña triangular maciza. Fuente: Elaboración propia	89
Figura 4.1.16 Esquema 3D, vistas y cotas del modelo largo cuña triangular maciza. Fuente: Elaboración propia	90
Figura 4.1.19 Esquema 3D, vistas y cotas del modelo corto cuña triangular hueca formada por módulos. Fuente: Elaboración propia	91
Figura 4.1.22 Esquema 3D, vistas y cotas del modelo largo cuña triangular hueca formada por módulos. Fuente: Elaboración propia	92
Figura 4.1.25 Esquema 3D, vistas y cotas del modelo corto cuña triangular hueca formada con vigas en forma de T y losas. Fuente: Elaboración propia.....	93
Figura 4.1.28 Esquema 3D, vistas y cotas del modelo largo cuña triangular hueca formada con vigas en forma de T y losas. Fuente: Elaboración propia.....	94

Figura 4.1.31 Esquema 3D, vistas y cotas del modelo corto cuña formada por losas macizas. Fuente: Elaboración propia.....	95
Figura 4.1.34 Esquema 3D del modelo largo cuña formada por losas macizas. Fuente: Elaboración propia.....	96
Figura 4.1.37 Esquema 3D, vistas y cotas del modelo corto cuña formada por losas alveolares. Fuente: Elaboración propia.....	97
Figura 4.1.40 Esquema 3D, vistas y cotas del modelo largo cuña formada por losas alveolares. Fuente: Elaboración propia.....	98
Figura 4.2.1 Denominación de ejes en el modelo. Vista general. Fuente: Elaboración propia.....	99
Figura 4.2.2 Denominación de ejes en el modelo. Vista general. Fuente: Elaboración propia.....	100
Figura 4.2.3 Dimensiones en el eje X del modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=0,4 m). Fuente: Elaboración propia.....	101
Figura 4.2.4 Dimensiones en el eje X del modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m). Fuente: Elaboración propia.....	101
Figura 4.2.5 Dimensiones en el eje X del modelo de obra de fábrica enterrada profunda y estructuras a rasante (H=2,4 m). Fuente: Elaboración propia.....	102
Figura 4.2.6 Dimensiones en el eje Y del modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=0,4 m). Fuente: Elaboración propia.....	103
Figura 4.2.7 Dimensiones en el eje Y del modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m). Fuente: Elaboración propia.....	103
Figura 4.2.8 Dimensiones en el eje Y del modelo de obra de fábrica enterrada profunda y estructuras a rasante (H=2,4 m). Fuente: Elaboración propia.....	104
Figura 4.2.9. Dimensiones en el eje Z del modelo de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m). Fuente: Elaboración propia.....	105

Figura 4.2.10 Dimensiones en el eje Z del modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=0,4 m). Fuente: Elaboración propia.	105
Figura 4.2.11 Dimensiones en el eje Z del modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m). Fuente: Elaboración propia.	105
Figura 4.2.12 Dimensiones en el eje Z del modelo de estructuras a rasante (H=2,4 m). Fuente: Elaboración propia.	106
Figura 4.2.13 Condiciones de contorno empleadas en el modelo llevado a cabo por el Comité ORE D-117.	106
Figura 4.2.14 Esquema de SOLID95. Fuente: ANSYS.	108
Figura 4.2.15 Esquema de AVE 102. TALGO/BOMBARDIER. Fuente: [5].	109
Figura 4.2.16 Esquema de aplicación de una carga móvil, para la realización del análisis dinámico. Fuente: Elaboración propia.	110
Figura 4.2.17 Localización de las cargas en el modelo de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m). Fuente: Elaboración propia.	111
Figura 4.2.18 Localización de las cargas en el modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=0,4 m), semi-profunda (H=1 m) y estructura a rasante (H=2,4 m). Fuente: Elaboración propia.	112
Figura 4.2.19 Modelos constitutivos empleados en el estudio. Lineal y Drucker-Prager. Fuente: Elaboración propia.	113
Figura 4.2.20 Carril Vignole UIC-60, existente en la vía y esquema de modelización en ANSYS. Fuente: Elaboración propia.	116
Figura 4.2.21 Dimensiones placa de asiento en el modelo. Fuente: Elaboración propia.	116
Figura 4.2.22 Dimensiones traviesa real tipo AI-89. Fuente: [84]	118
Figura 4.2.23 Esquema traviesa real tipo AI-89. Fuente: Elaboración propia.	118

Figura 4.2.24 Contactos traviesa-balasto en paredes laterales. Fuente: Elaboración propia.	120
Figura 4.2.25 Diferencia de deformaciones experimentada en las inmediaciones del estribo. Fuente: Elaboración propia.	122
Figura 4.2.27 Organigrama de los grupos de modelización de los prototipos planteados. Fuente: Elaboración propia.	123
Figura 4.2.28 Modelos de cuñas pertenecientes a los diferentes grupos de modelización. Fuente: Elaboración propia.	124
Figura 4.2.29 Modelos de cuñas pilotadas para el caso de estructura a rasante. Fuente: Elaboración propia.	124
Figura 4.2.30 Modelos de cuñas granulares. Fuente: Elaboración propia.	125
Figura 4.2.31 Metodología empleada. Fuente: Elaboración propia.	131
Figura 4.2.32 Modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=0,4 m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.	133
Figura 4.2.33 Esquema de obra de fábrica enterrada superficial (H=0,4 m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.	133
Figura 4.2.34 Modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=0,4 m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.	135
Figura 4.2.35 Esquemas de obra de fábrica enterrada superficial (H=0,4 m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.	136
Figura 4.2.36 Modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=0,4 m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia.	139
Figura 4.2.37 Esquema de obra de fábrica enterrada superficial (H=0,4 m), cuña triangular maciza. Fuente: Elaboración propia.	139
Figura 4.2.38 Esquema de obra de fábrica enterrada superficial (H=0,4 m), cuña triangular hueca formada por módulos. Fuente: Elaboración propia.	140

- Figura 4.2.39 Esquema de obra de fábrica enterrada superficial ($H=0,4$ m), cuña triangular hueca formada con vigas en forma de T y losas. Fuente: Elaboración propia. 141
- Figura 4.2.40 Modelo de obra de fábrica enterrada superficial ($H=0,4$ m), cuña formada por losas. Fuente: Elaboración propia. 144
- Figura 4.2.41 Esquema de obra de fábrica enterrada superficial ($H=0,4$ m), cuña formada por losas macizas. Fuente: Elaboración propia. 144
- Figura 4.2.42 Esquema de obra de fábrica enterrada superficial ($H=0,4$ m), cuña formada por losas alveolares Fuente: Elaboración propia. 145
- Figura 4.2.43 Modelo de obra de fábrica enterrada superficial ($H=0,4$ m), cuña triangular pilotada. Fuente: Elaboración propia..... 150
- Figura 4.2.44 Modelo de obra de fábrica enterrada superficial ($H=1$ m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia..... 155
- Figura 4.2.45 Esquema de obra de fábrica enterrada superficial ($H=1$ m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia..... 156
- Figura 4.2.46 Modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda ($H=1$ m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia..... 158
- Figura 4.2.47 Esquemas de obra de fábrica enterrada semi-profunda ($H=1$ m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia. 158
- Figura 4.2.48 Modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda ($H=1$ m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia. 161
- Figura 4.2.49 Esquema de obra de fábrica enterrada semi-profunda ($H=1$ m), cuña triangular maciza. Fuente: Elaboración propia..... 162
- Figura 4.2.50 Esquema de obra de fábrica enterrada semi-profunda ($H=1$ m), cuña triangular hueca formada por módulos. Fuente: Elaboración propia. 162

Figura 4.2.51 Esquema de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña triangular hueca formada con vigas en forma de T y losas. Fuente: Elaboración propia.	163
Figura 4.2.52 Modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña formada por losas. Fuente: Elaboración propia.	165
Figura 4.2.53 Esquema de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña formada por losas macizas. Fuente: Elaboración propia.	166
Figura 4.2.54 Esquema de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña formada por losas alveolares Fuente: Elaboración propia.	167
Figura 4.2.55 Modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña triangular pilotada. Fuente: Elaboración propia.	172
Figura 4.2.56 Modelo de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.	178
Figura 4.2.57 Esquema de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.	178
Figura 4.2.58 Modelo de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.	180
Figura 4.2.59 Esquemas de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.	181
Figura 4.2.60 Modelo de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia.	184
Figura 4.2.61 Esquema de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña triangular maciza. Fuente: Elaboración propia.	184
Figura 4.2.62 Esquema de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña triangular hueca formada por módulos. Fuente: Elaboración propia.	185

Figura 4.2.63 Esquema de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña triangular hueca formada con vigas en forma de T y losas. Fuente: Elaboración propia.	186
Figura 4.2.64 Modelo de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña formada por losas. Fuente: Elaboración propia.	188
Figura 4.2.65 Esquema de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña formada por losas macizas. Fuente: Elaboración propia.	189
Figura 4.2.66 Esquema de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña formada por losas alveolares Fuente: Elaboración propia.	190
Figura 4.2.67 Modelo de estructura a rasante (H=2,4 m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.	195
Figura 4.2.68 Esquema de estructura a rasante (H=2,4 m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.	195
Figura 4.2.69 Modelo de estructura a rasante (H=2,4 m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.	197
Figura 4.2.70 Esquemas de estructura a rasante (H=2,4 m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.	198
Figura 4.2.71 Modelo de estructura a rasante (H=2,4 m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia.	200
Figura 4.2.72 Esquema de estructura a rasante (H=2,4 m), cuña triangular maciza. Fuente: Elaboración propia.	201
Figura 4.2.73 Esquema de estructura a rasante (H=2,4 m), cuña triangular hueca formada por módulos. Fuente: Elaboración propia.	202
Figura 4.2.74 Esquema de estructura a rasante (H=2,4 m), cuña triangular hueca formada con vigas en forma de T y losas. Fuente: Elaboración propia.	202
Figura 4.2.75 Esquema de estructura a rasante (H=2,4 m), cuña formada por losas macizas. Fuente: Elaboración propia.	205

Figura 4.2.76 Esquema de estructura a rasante (H=2,4 m), cuña formada por losas alveolares Fuente: Elaboración propia.	206
Figura 4.2.77 Modelo de tres masas utilizado para el cálculo de aceleraciones. Fuente: Elaboración propia.	210
Figura 4.2.78 Interpolación de Lagrange. Fuente: Elaboración propia.....	211
Figura 4.2.79 Extensión de la envolvente de deformaciones. Fuente: Elaboración propia.	212
Figura 4.2.80 Esquema de metodología para el caso de cuña granular H=0,4 m. Fuente: Elaboración propia.	213
Figura 4.2.81 Esquema de metodología para el caso de cuña granular H=1 m. Fuente: Elaboración propia.	214
Figura 4.2.82 Esquema de metodología para el caso de cuña granular H=2,4 m. Fuente: Elaboración propia.	215
Figura 4.2.83 Esquema de metodología para el caso de cuña granular en estribo. Fuente: Elaboración propia.	216
Figura 4.2.84 Influencia de los cambios de deformación en las aceleraciones. Fuente: Elaboración propia.	219
Figura 4.4.1. Alternativa compuesta por placas macizas. Fuente: Elaboración propia.	229
Figura 4.4.2 Alternativa compuesta por marcos. Fuente: Elaboración propia.	230
Figura 4.4.3. Recubrimiento nominal.	232
Figura 4.4.4 Hipótesis de carga 3. Fuente: Elaboración propia.....	234
Figura 4.4.5 Sección más solicitada. Fuente: Elaboración propia.	234
Figura 4.4.6 Definición de los puntos de elevación. Fuente: VALTER.	238
Figura 4.4.7 Detalle de armado. Fuente: VALTER.....	238

Figura 4.4.9 Detalle de tensiones producidas por el izado. Fuente: VALTER.....	238
Figura 4.4.10 Elemento tipo marco para cuñas de transición. Fuente: [85].....	240
Figura 4.4.11 Combinaciones ELU realizadas. Fuente: Elaboración propia	241
Figura 4.4.12 Combinaciones ELS realizadas. Fuente: Elaboración propia	242
Figura 4.4.13 Geometría y detalle de armado de la sección del marco de 2x2m. Fuente: [85]	243
Figura 4.4.12 Geometría y detalle de armado de la sección del marco de 2x1,5m. Fuente: [85]	244
Figura 4.4.13 Geometría y detalle de armado de la sección del marco de 2x1m. Fuente: [85]	245
Figura 4.4.14 disposiciones inicial y final de la cuña prefabricada formada por marcos. Fuente: elaboración propia.....	246
Figura 5.1.1 Imagen colocación instrumentación de losas. Extensómetros. Fuente: Elaboración propia.	251
Figura 5.1.2 Imagen vertido hormigón fresco. Fuente: Elaboración propia.	252
Figura 5.1.4 Secciones en alzado del banco de pruebas de cuñas formadas por losas enfrentadas con cuñas granulares. Fuente: elaboración propia.	254
Figura 5.1.5 Secciones en alzado del banco de pruebas de cuñas formadas por marcos enfrentadas con cuñas granulares. Fuente: elaboración propia.....	256
Figura 5.1.6 Sección transversal del banco de pruebas: un terraplén. Fuente: elaboración propia.....	257
Figura 5.1.7 Sección transversal del banco de pruebas: dos terraplenes contiguos. Fuente: elaboración propia.....	257
Figura 5.1.10 Imagen material granular de machaqueo (izquierda) y de terraplén (derecha). Fuente: ITC.....	259

Figura 5.1.12 Esquema de ensayo para losa. Fuente: elaboración propia.	261
Figura 5.1.13 Imágenes del ensayo a flexión en la losa. Fuente: elaboración propia.	261
Figura 5.1.15 Esquema de ensayo para marco. Fuente: elaboración propia.	262
Figura 5.1.16 Imágenes del ensayo a flexión para el marco. Fuente: elaboración propia.	262
Figura 5.1.18 Detalle de la colocación de líneas de asiento en el cimiento del banco de pruebas. Fuente: elaboración propia.	264
Figura 5.1.19 Descarga de las losas prefabricadas en el banco de pruebas. Fuente: elaboración propia.	265
Figura 5.1.20 Transición caso $0 \leq H \leq 0,5$ m. Fuente: elaboración propia.	265
Figura 5.2.3 Célula de presión	269
Figura 5.2.5 Ubicación de las células de presión en el banco de pruebas. Fuente: elaboración propia. Fuente: Elaboración propia.	270
Figura 5.2.6 Dispositivo de líneas de asiento	272
Figura 5.2.8 Ubicación de las líneas de asiento en el banco de pruebas. Fuente: elaboración propia.	272
Figura 5.2.9 Ubicación de las líneas de asiento en el banco de pruebas a distintas cotas de profundidad. Fuente: elaboración propia.	273
Figura 6.3.1 Instalación de las cuñas granular y prefabricada en línea ferroviaria L9 Alicante-Denia. Fuente: elaboración propia.	286
Figura 6.3.2 Instalación de los sensores extensiométricos. Fuente: Elaboración propia	286
Figura 6.3.3 Modelo numérico desarrollado para la cuña granular (izquierda) y prefabricada (derecho). Fuente: elaboración propia.	287

Figura 6.4.1 Puntos de medición de datos en la sección transversal de la vía. Fuente:
elaboración propia..... 290

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1.1. Número de obras más relevantes que se encuentran en algunas de las líneas de alta velocidad más importantes. Fuente: [9] 58

Tabla 3.1.3 Ejemplos de modelos de elementos finitos desarrollados por algunos autores. Fuente: [5]. 64

Tabla 4.2.1 Características de los materiales utilizados. Fuente: Elaboración propia. 115

Tabla 4.2.2 Valores adoptados para el modelo de traviesa. Fuente: Elaboración propia 119

Tabla 4.2.3 Esquemas de casos de cálculo a realizar. Fuente: Elaboración propia 132

Tabla 4.2.4 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=0,4 m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia. 134

Tabla 4.2.5 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=0,4 m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia. 137

Tabla 4.2.6 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=0,4 m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia. 142

Tabla 4.2.7 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=0,4 m), cuña formada por losas. Fuente: Elaboración propia. 146

Tabla 4.2.8 Comparación en % de la variación total de rigidez en la transición. Fuente: Elaboración propia. 148

Tabla 4.2.9 Comparación de variación de rigidez traviesa a traviesa. Fuente: Elaboración propia. 149

Tabla 4.2.10 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=0,4 m), cuña triangular pilotada. Fuente: Elaboración propia. 151

Tabla 4.2.11 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña formada por losas pilotada. Fuente: Elaboración propia	152
Tabla 4.2.12 Comparación de variación de rigidez traviesa a traviesa. Fuente: Elaboración propia.	154
Tabla 4.2.13 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=1 m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.....	157
Tabla 4.2.14 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.....	159
Tabla 4.2.15 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia.	164
Tabla 4.2.16 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña formada por losas. Fuente: Elaboración propia.	168
Tabla 4.2.17 Comparación en % de la variación total de rigidez en la transición. Fuente: Elaboración propia.	170
Tabla 4.2.18 Comparación de variación de rigidez traviesa a traviesa. Fuente: Elaboración propia.	170
Tabla 4.2.19 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña triangular pilotada. Fuente: Elaboración propia.	172
Tabla 4.2.20 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña formada por losas pilotada. Fuente: Elaboración propia.	174
Tabla 4.2.21 Comparación de variación de rigidez traviesa a traviesa. Fuente: Elaboración propia.	177
Tabla 4.2.22 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.....	179

Tabla 4.2.23 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.	182
Tabla 4.2.24 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia.	187
Tabla 4.2.25 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña formada por losas. Fuente: Elaboración propia.	191
Tabla 4.2.26 Comparación en % de la variación total de rigidez en la transición. Fuente: Elaboración propia.	193
Tabla 4.2.27 Comparación de variación de rigidez traviesa a traviesa. Fuente: Elaboración propia.	194
Tabla 4.2.28 Asientos y rigideces de modelo de estructura a rasante (H=2,4 m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.	196
Tabla 4.2.29 Asientos y rigideces de modelo de estructura a rasante (H=2,4 m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.	199
Tabla 4.2.30 Asientos y rigideces de modelo de estructura a rasante (H=2,4 m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia.	203
Tabla 4.2.31 modelo de estructura a rasante (H=2,4 m), cuña formada por losas macizas. Fuente: Elaboración propia.	206
Tabla 4.2.32 Comparación en % de la variación total de rigidez en la transición. Fuente: Elaboración propia.	208
Tabla 4.2.33 Comparación de variación de rigidez traviesa a traviesa. Fuente: Elaboración propia.	209
Tabla 4.2.34 Valores del índice de Sperling. Fuente: U.I.C.	217
Tabla 4.2.35 Tiempos de cálculo empleados para el estudio. Fuente: Elaboración propia.	221

Tabla 4.3.1 Clasificación de técnicas de resolución de los problemas de Decisión multicriterio. Fuente: Korhonen et al. 1992.	223
Tabla 4.3.2 Clasificación de alternativas y criterios utilizados. Fuente: Elaboración propia.	224
Tabla 4.3.3 Matriz de valoración de las alternativas. Fuente: Elaboración propia.	225
Tabla 4.3.4 Matriz de valoración normalizada de las diferentes alternativas. Fuente: Elaboración propia.	226
Tabla 4.3.5 Matriz de dominación, para las diferentes alternativas. Fuente: Elaboración propia.	227
Tabla 4.3.6 Valor L_i para las diferentes alternativas planteadas. Fuente: Elaboración propia.	227
Tabla 4.4.1 Tabla de longitudes de solapo y anclaje. Fuente: EHE-08.	232
Tabla 4.4.2 Tensiones calculadas para diferentes secciones. Fuente: Elaboración propia.	235
Tabla 4.4.3 Tensiones promedio. Fuente: Elaboración propia.	235
Tabla 6.1.1 Parámetros mecánicos de los materiales utilizados en el modelo numérico calibrado.	285

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 3.1.1 Variaciones longitudinales de rigidez vertical del sistema balasto-plataforma, relacionadas con las características de la plataforma. Fuente: [5]	59
Gráfica 3.1.2 Variaciones de rigidez vertical de la vía producidas por las obras de drenaje (u otros tipos) transversales a la vía, según tamaño y profundidad. Fuente: [19].	62
Gráfica 4.2.1 Zona de asientos influenciada por el estado tenso-deformacional. Fuente: Elaboración propia.	122
Gráfica 4.2.2 Asientos y envolvente de modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=0,4 m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.	134
Gráfica 4.2.3 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=0,4 m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.....	135
Gráfica 4.2.4 Asientos y envolvente de modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=0,4 m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.....	136
Gráfica 4.2.5 Asientos, rigideces y comparación con la cuña granular de modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=0,4 m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.	138
Gráfica 4.2.6 Asientos y envolvente de modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=0,4 m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia.....	141
Gráfica 4.2.7 Asientos, rigideces y comparación con la cuña granular de modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=0,4 m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia.	143
Gráfica 4.2.8 Asientos y envolvente de modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=0,4 m), cuña formada por losas. Fuente: Elaboración propia.	145
Gráfica 4.2.9 Comparativa entre los grupos de modelos. Fuente: Elaboración propia.	148

Gráfica 4.2.10 Comparación de variación de rigidez traviesa a traviesa. Fuente: Elaboración propia.	149
Gráfica 4.2.11 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña triangular pilotada y sin pilotar. Fuente: Elaboración propia.	152
Gráfica 4.2.12 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña formada por losas pilotada y sin pilotar. Fuente: Elaboración propia.	153
Gráfica 4.2.13 Comparativa entre los grupos de modelos. Fuente: Elaboración propia.	154
Gráfica 4.2.14 Comparación de variación de rigidez traviesa a traviesa. Fuente: Elaboración propia.	155
Gráfica 4.2.15 Asientos y envolvente de modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=0,4 m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.	156
Gráfica 4.2.16 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=1 m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.	157
Gráfica 4.2.17 Asientos y envolvente de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.	159
Gráfica 4.2.18 Asientos, rigideces y comparación con la cuña granular de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.	160
Gráfica 4.2.19 Asientos y envolvente de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia.	163
Gráfica 4.2.20 Asientos, rigideces y comparación con la cuña granular de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia.	165
Gráfica 4.2.21 Asientos y envolvente de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña formada por losas. Fuente: Elaboración propia.	167

Gráfica 4.2.22 Asientos, rigideces y comparación con la cuña granular de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña formada por losas. Fuente: Elaboración propia.	169
Gráfica 4.2.23 Comparativa entre los grupos de modelos. Fuente: Elaboración propia.	170
Gráfica 4.2.24 Comparación de variación de rigidez traviesa a traviesa. Fuente: Elaboración propia.	171
Gráfica 4.2.25 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña triangular pilotada y sin pilotar. Fuente: Elaboración propia.	173
Gráfica 4.2.26 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña formada por losas pilotada y sin pilotar. Fuente: Elaboración propia.	175
Gráfica 4.2.27 Comparativa entre los grupos de modelos. Fuente: Elaboración propia.	176
Gráfica 4.2.28 Comparación de variación de rigidez traviesa a traviesa. Fuente: Elaboración propia.	177
Gráfica 4.2.29 Asientos y envolvente de modelo de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.	179
Gráfica 4.2.30 Asientos y rigideces modelo de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.	180
Gráfica 4.2.31 Asientos y envolvente de modelo de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.	182
Gráfica 4.2.32 Asientos, rigideces y comparación con la cuña granular de modelo de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.	183
Gráfica 4.2.33 Asientos y envolvente de modelo de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia.	186

Gráfica 4.2.34 Asientos, rigideces y comparación con la cuña granular de modelo de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia.	188
Gráfica 4.2.35 Asientos y envolvente de modelo de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña formada por losas. Fuente: Elaboración propia.	190
Gráfica 4.2.36 Asientos, rigideces y comparación con la cuña granular de modelo de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña formada por losas. Fuente: Elaboración propia.	192
Gráfica 4.2.37 Comparativa entre los grupos de modelos. Fuente: Elaboración propia.	193
Gráfica 4.2.38 Comparación de variación de rigidez traviesa a traviesa. Fuente: Elaboración propia.	194
Gráfica 4.2.39 Asientos y envolvente de modelo de estructura a rasante (H=2,4 m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.	196
Gráfica 4.2.40 Asientos y rigideces modelo de estructura a rasante (H=2,4 m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.	197
Gráfica 4.2.41 Asientos y envolvente de modelo de estructura a rasante (H=2,4 m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.	198
Gráfica 4.2.42 Asientos, rigideces y comparación con la cuña granular de modelo de estructura a rasante (H=2,4 m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.	200
Gráfica 4.2.43 Asientos y envolvente de modelo de estructura a rasante (H=2,4 m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia.	203
Gráfica 4.2.44 Asientos, rigideces y comparación con la cuña granular de modelo de estructura a rasante (H=2,4 m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia.	204
Gráfica 4.2.45 Asientos, rigideces y comparación con la cuña granular de modelo de estructura a rasante (H=2,4 m), cuña formada por losas macizas. Fuente: Elaboración propia.	207

Gráfica 4.2.46 Comparativa entre los grupos de modelos. Fuente: Elaboración propia.	208
Gráfica 4.2.47 Comparación de variación de rigidez traviesa a traviesa. Fuente: Elaboración propia.	209
Gráfica 5.3.1 Variación de la presión a lo largo del tiempo en las cuñas formadas por marcos. Fuente: elaboración propia.....	274
Gráfica 5.3.2 Variación de la presión a lo largo del tiempo en las cuñas formadas por losas. Fuente: elaboración propia.....	275
Gráfica 5.3.3 Perfil de asientos en el caso $2 H=0.4m$ para cada cuña ensayada. Fuente: elaboración propia.....	276
Gráfica 5.3.4 Asientos verticales registrados en los ensayos. Fuente: elaboración propia.	277
Gráfica 5.3.5 Comparación de asientos entre cuñas granular y prefabricada para el caso $H=0m$. Fuente: elaboración propia.	277
Gráfica 5.3.6 Comparación de asientos entre cuñas granular y prefabricada para el caso $H=0,4m$. Fuente: elaboración propia.	278
Gráfica 5.3.7 Comparación de asientos entre cuñas granular y prefabricada para el caso $H=1m$. Fuente: elaboración propia.	278
Gráfica 5.3.8 Comparación de asientos entre cuñas granular y prefabricada para el caso $H=2,4m$. Fuente: elaboración propia.	279
Gráfica 6.3.1 Modelo numérico desarrollado para la cuña granular (izquierda) y prefabricada (derecho). Fuente: elaboración propia	288
Gráfica 6.4.1 Aceleraciones en la vía inducidas por el paso de un tren a velocidad de 80 km/h. Fuente: elaboración propia.	291
Gráfica 6.4.2 Aceleraciones en la capa de subbalasto inducidas por el paso de un tren a velocidad de 80 km/h. Fuente: elaboración propia.	292

Gráfica 6.4.3 Aceleraciones a 0,9m de profundidad de la capa de subbalasto inducidas por el paso de un tren a velocidad de 80 km/h. Fuente: elaboración propia.	293
--	-----

1. INTRODUCCIÒN

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, si se hace un repaso al Estado del Arte de la técnica a nivel tanto nacional como internacional sobre zonas de transición ferroviaria, no se detecta ninguna solución o procedimiento que permita superar de manera óptima la problemática asociada a la diferencia de rigidez entre los elementos, llegando de forma general a la conclusión de que todavía no se ha alcanzado una solución óptima que permita una transición de rigidez optimizada entre tramos de terraplén y obra civil. Algunos de los conceptos en los que la Técnica se encuentra actualmente trabajando son los siguientes:

- Cuñas granulares: es la solución estándar, recomendada por el Administrador De Infraestructuras Ferroviarias (ADIF). Consisten en la disposición sobre el terraplén en la zona de transición de material tratado con cemento y/o material seleccionado con mejores prestaciones mecánicas, con la finalidad de graduar progresivamente la rigidez de la infraestructura, y consecuentemente suavizar el perfil de asientos producidos en estas zonas.

Aunque este planteamiento cuenta con una buena base científica, todavía presenta inconvenientes desde el punto de vista constructivo y de ejecución. Los principales inconvenientes de este sistema son los siguientes: requiere de una inversión importante por los elevados costes económicos que implica su ejecución; se necesitan plazos de ejecución excesivos que, en muchas ocasiones, abocan a un incumplimiento de estos; existen dificultades para efectuar un control de calidad de los materiales adecuado; el control de calidad de la ejecución de la cuña es problemática; las condiciones ambientales afectan notablemente durante el proceso de construcción de la cuña granular; y se manifiesta una incertidumbre en el comportamiento de la cuña durante la fase de explotación.

- Otras soluciones actuando en la infraestructura: por ejemplo, se tienen las losas de transición, que consisten en una placa que descansa sobre el terreno y colocada junto al estribo apoyada sobre una ménsula corta en su parte superior. En este sistema se permite la deformación de la zona de transición hasta adoptar la forma de una rampa.

El problema fundamental de esta tecnología es que puede producirse un despegue de la losa, actuando como una viga biapoyada, lo que pone en riesgo a la losa al comenzar a trabajar en flexión, esfuerzo para el que no ha estado diseñado a

priori, y por consecuencia puede darse el colapso del elemento con el correspondiente asiento diferencial pronunciado y el posterior deterioro de la zona de transición.

Otra solución actuando sobre la infraestructura es mediante el empleo de pilotes en la cimentación de la zona de transición, solución muy eficaz pero muy costosa, y en ocasiones inviable en función de la longitud de los pilotes.

- *Soluciones actuando en la superestructura:* entre las distintas soluciones existentes se tienen los elementos elásticos incorporados en la superestructura, como suelas bajo traviesa y mantas elásticas, cuya finalidad es reducir los excesos de rigidez experimentados cuando se aumentan los espesores de las capas de asientos.

El principal problema de este tipo de elementos usados en el campo del ferrocarril es que pueden deteriorarse por diversos factores medio ambientales como temperatura, oxidación o hidrólisis, teniendo una vida útil de aproximadamente 20 años, razón principal por la que no es recomendable llevar a cabo una de estas soluciones.

Otras soluciones consisten en modificar la disposición de las traviesas, aumentando su longitud y disminuyendo su separación, o colocando carriles adicionales, consiguiendo una transición más progresiva en la variación de la rigidez. No obstante, su efecto está afectado por condicionantes funcionales para permitir el bateo del balasto, por lo que la disposición de traviesas y carriles es limitada.

En base a las deficiencias encontradas en cada una de las soluciones anteriores, es un hecho demostrable que la problemática que pretende afrontar la doctoranda sigue sin estar resuelta de forma óptima. Es, por tanto, motivación de la presente tesis doctoral, llevar a cabo una investigación que verse sobre el desarrollo de una nueva solución que asegure la transición de rigidez óptima en una zona de transición, a partir del diseño de un nuevo elemento estructural de hormigón armado.

2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

OBJETIVOS Y METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Los objetivos que se plantea la doctoranda para dar respuesta a la línea de investigación anteriormente planteada se desglosan en dos: objetivo general de la Investigación, y objetivos científicos:

2.1 OBJETIVO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN

El Objetivo General de la Investigación es el desarrollo de una nueva solución constructiva para optimizar la transición de rigidez en las zonas de transición, con el objetivo de mitigar el deterioro de la vía debido a las acciones dinámicas generadas en dichas zonas mediante un acondicionamiento capaz de adquirir un comportamiento estructural adecuado que distribuya gradualmente los asientos diferenciales derivados por dichos cambios de rigidez para suavizar el paso de los vehículos ferroviarios a través de estas zonas de transición. Para ello, la doctoranda plantea el desarrollo de un nuevo diseño de un elemento estructural de transición de rigidez que reúna, junto con el requisito técnico fundamental mencionado, unas condiciones constructivas que doten a la solución de facilidad de colocación, libertad de disposición y capacidad de adaptación efectivas.

La obtención de dicho Objetivo General de Investigación se materializará al conseguir los siguientes Objetivos Científicos.

2.2 OBJETIVOS CIENTÍFICOS

Los objetivos científicos planteados por la doctoranda son los siguientes:

- **Diseño y cálculo del elemento responsable de la transición de rigidez que se ubicará a lo largo del tramo en el que se localiza la sección que genera el problema.**

La nueva solución diseñada en el marco de la presente tesis doctoral pretende ser una solución viable para asegurar la transición de rigidez en las zonas de transición. En este sentido, deberá de reunir una serie de características geométricas y mecánicas que le permitan desempeñar su papel de forma funcional y eficaz. Dichas características habrá que identificarlas en la presente investigación.

La doctoranda planteará de inicio diferentes diseños de los elementos estructurales empleados para la solución como cuña de transición, los cuáles serán evaluados desde el punto de vista técnico-económico, analizando su comportamiento estructural como cuña de transición con modelos numéricos y valorando las ventajas e inconvenientes de cada diseño propuesto, para finalmente seleccionar las mejores soluciones tras un análisis multicriterio. Los factores de decisión contemplados dependerán de aspectos funcionales, como la facilidad productiva o de industrialización, la manejabilidad de las piezas en fábrica, la dificultad de transporte y descarga y puesta en obra; aspectos económicos como los costes de fabricación, transporte y puesta en obra; y aspectos técnicos como el comportamiento estructural y efectividad para la adecuada transición de rigidez.

Cada cuña prefabricada planteada se modelizará numéricamente, incluyendo un modelo adicional de control mediante cuña granular, solución convencional recomendada por el Administrador De Infraestructuras Ferroviarias, en el que se describen diferentes configuraciones en función de la distancia entre la capa de subbalasto y la losa superior de la estructura que atraviesa el terraplén, es decir, la altura de tierras (H) que quedaría por encima de la estructura una vez finalizada la ejecución de la plataforma. Por cada solución analizada en cada configuración y por cada variación en función de que la cuña sea más larga o corta, o tenga o no cimentación, se realizará un modelo. Estos se basarán en el método de elementos finitos, que permite representar la estructura modelizada mediante una simulación numérica y calcular el estado tensional y de deformaciones tras un estado de cargas aplicado. Para que el modelo represente con alta fidelidad la estructura modelizada requiere de una correcta definición geométrica y de las propiedades de los materiales empleados. Para ello se realizará un estudio exhaustivo de los elementos que conforman la infraestructura ferroviaria y de sus propiedades mecánicas, así como de la solución de la cuña prefabricada aplicada, con el fin de conseguir una modelización precisa y correcta de cada cuña de transición planteada, la cual será ensayada numéricamente frente a cargas verticales sobre la vía debido a cargas permanentes por la infraestructura y a cargas variables causadas por el paso de los trenes. Los resultados obtenidos tras los ensayos numéricos de cada cuña planteada se compararán entre sí, que serán tenidos en cuenta en el análisis multicriterio para seleccionar las cuñas prefabricadas finalistas.

Por último, se dimensionarán los elementos estructurales de las cuñas prefabricadas seleccionadas para resistir las acciones más desfavorables para las diversas situaciones de proyecto contempladas, tanto en fase de explotación como en fase de construcción y ejecución.

- **Diseño de la solución constructiva, que consistirá en la armonización del conjunto formado por: el elemento de transición de rigidez diseñado, la infraestructura de terraplén en la que se apoya la superestructura y la obra de fábrica (generalmente, un puente) que conecta con el terraplén.**

Para las soluciones que presenten un mejor comportamiento se pretende avanzar en su análisis estudiando el comportamiento experimental de las mismas mediante su construcción a escala real en un banco de pruebas, reproduciendo una zona de transición aislada. Para ello se emplazarán las obras en una zona de actuación cuyo terreno será caracterizado mecánicamente mediante una exhaustiva campaña de ensayos. El banco de pruebas se diseñará de forma que cada solución finalista construida mediante cuña prefabricada se pueda comparar con una solución mediante cuña granular. De este modo se construirá por cada terraplén una cuña prefabricada finalista y otra granular, una a cada lado de la estructura que atraviese el terraplén, actuando esta estructura como obra de drenaje. Se dispondrá de un dispositivo instrumental para preparar un ensayo a cargas verticales sobre la superficie del terraplén en varios puntos alejados de la estructura de drenaje, y para obtener mediciones experimentales. De los resultados obtenidos se escogerá aquella solución que mejor comportamiento estructural muestre, observando el perfil de asientos medido experimentalmente tras los ensayos de cargas verticales.

- **Análisis del comportamiento dinámico de la nueva solución constructiva para estudiar la viabilidad de instalación en entornos urbanos**

Finalmente, y en base al cumplimiento previo de los objetivos científicos anteriormente planteados, se realizará un cálculo dinámico de la solución óptima construida en un escenario real, y comparada con la cuña granular también ejecutada, ambas cuñas ubicadas en un tramo de vía que será habilitada al servicio de tráfico ferroviario, y en el que se evaluará la idoneidad del emplazamiento de la solución optimizada en entornos urbanos. Previo al cálculo se realizará el proceso

de validación de la solución optimizada como apta estructuralmente para la transición de rigidez en las zonas de transición. Para ello se llevará a cabo una campaña experimental similar a la realizada en el banco de pruebas para medir las deformaciones producidas por el uso de la cuña prefabricada. Asimismo, se llevará a cabo una caracterización mecánica del tramo de vía y del material móvil que recorrerá dicho tramo. Con la información experimental recopilada se realizará un modelo numérico de la cuña de transición ejecutada basado en el modelo desarrollado anteriormente y se calibrará con los datos registrados tanto de la caracterización mecánica como de las mediciones de los ensayos a cargas verticales. De este modo, con el modelo calibrado y validado se procederá al cálculo dinámico en cuestión, en el que se compararán los resultados de vibraciones de ambas cuñas granular y prefabricada modelizadas en un ensayo numérico que simule la circulación de un vehículo ferroviario modelizado mediante un sistema de masas simplificado.

2.3 METODOLOGÍA PROPUESTA

Para el desarrollo de esta investigación se planean tres hitos, los cuales se corresponden con los tres grandes objetivos científicos expuestos anteriormente.

1. Con respecto al primer hito: *diseño y cálculo del elemento responsable de la transición de rigidez*. Se abordarán los siguientes puntos:

- Elección y caracterización mecánica del hormigón con el que se fabricará la unidad base, a partir de la cual se diseñará el elemento responsable de la transición.
- Diseño y cálculo de la unidad base, a partir de la cual se diseñará el elemento responsable de la transición.
- Diseño y cálculo del elemento responsable de la transición de rigidez. Este elemento se conformará a partir de un determinado número de unidades base y de acuerdo con una disposición concreta de las mismas.

2. Con respecto al segundo hito: *diseño de la solución constructiva*, se estudian los siguientes puntos:

- Caracterización mecánica de la infraestructura de tierra sobre la que se colocará la nueva solución constructiva.

- Diseño del elemento de rigidización, en su caso, a construir en la infraestructura de tierra.
 - Cálculo estructural dinámico de la infraestructura de fábrica a la que aplica la nueva solución constructiva. Identificación y caracterización de los grados de libertad de la misma.
 - Diseño del elemento compatibilizador de movimientos (o minimizador de esfuerzos) a implementar en la sección de contacto entre la infraestructura de tierra y la infraestructura de fábrica.
3. En cuanto al tercer hito: *análisis del comportamiento dinámico de la nueva solución constructiva*, se estudian los siguientes puntos:
- Caracterización mecánica (parámetros estáticos y dinámicos) del tramo de vía en el que se realizará el análisis.
 - Caracterización dinámica del material móvil que circulará, en condiciones normales de explotación, por el tramo de vía del tramo de análisis.
 - Cálculo dinámico del tramo de vía definido, en el que se ha instalado la solución constructiva propuesta en el presente trabajo.
 - Análisis comparativo de la respuesta dinámica de la nueva solución constructiva frente a una cuña granular.

Con el propósito de dar respuesta a la consecución y alcance de cada uno de los Hitos anteriores, el presente documento se ha estructurado de una forma práctica que ayude en todo momento al lector a ubicarse dentro del proceso investigador llevado a cabo.

Como punto de partida de la investigación, se ha llevado a cabo un minucioso Estado del Arte que refleja el estado actual de la técnica. El objetivo de este punto es formar unos antecedentes claros sobre los que cimentar de forma sólida el cuerpo investigador de la tesis. En primer lugar, se realizará un estudio de las técnicas existentes en la actualidad para la transición de rigidez en zonas de transición ferroviaria. Dentro de este bloque, se realizará una mayor descripción a la solución recomendada por el Administrador De Infraestructuras Ferroviarias (ADIF), basado en cuñas granulares consistentes en la disposición sobre los terraplenes ubicados en las zonas de transición de material tratado con cemento o material seleccionado de mejores prestaciones mecánicas.

En base a las conclusiones alcanzadas una vez se desarrolle el EdA anteriormente comentado, se iniciará la tarea investigadora propiamente dicha. El primer capítulo de índole investigadora consistirá en el diseño y cálculo del elemento estructural responsable de la transición de rigidez. En dicho apartado, se plantearán una serie de alternativas diseñadas para materializar la transición óptima de rigidez, que serán evaluados mecánicamente mediante modelos numéricos, con todos los componentes de la infraestructura ferroviaria involucrados perfectamente modelizados, con geometrías y propiedades de los materiales bien definidos, para realizar un estudio comparativo del comportamiento estructural obtenido analíticamente entre dichas soluciones diseñadas y unas soluciones de control, también modelizadas y que se diseñarán según las recomendaciones de ADIF. Tras los resultados analíticos observados después de simular el efecto de las cargas permanentes y del tráfico de vehículos ferroviarios, se someterán todas las alternativas diseñadas a un análisis multicriterio, valorando tanto el comportamiento estructural obtenido numéricamente como aspectos técnico-económicos de los mismos.

Acto seguido, y una vez se han seleccionado las soluciones finalistas, se procede a realizar un ensayo experimental a escala real en un banco de pruebas, donde se construirán las cuñas prefabricadas finalistas, junto con las cuñas granulares de control recomendadas por ADIF, tras el proceso de selección multicriterio anterior, reproduciendo una zona de transición aislada. De este modo se podrá comprobar experimentalmente el comportamiento estructural real de cada cuña de transición bajo cargas estáticas sobre la coronación del terraplén. Para ello se caracterizará mecánicamente el terreno donde se ubicará el banco de pruebas, y se dispondrá de un dispositivo instrumental capaz de medir los asientos en varios puntos de la zona de transición del banco de pruebas, en cada una de las cuñas granulares y prefabricadas seleccionadas construidas, construyéndose asimismo las soluciones de control consistentes en las cuñas granulares. Como conclusión a este apartado, y en base a los resultados experimentales obtenidos, se seleccionará la solución óptima de cuña prefabricada como resultado del proceso investigador.

A continuación, se realizará un análisis dinámico de la solución óptima construida, pero en esta ocasión en un escenario real, en un tramo de vía que será habilitado al tráfico ferroviario. Previo al análisis dinámico se realizará la validación de la solución empleando el modelo numérico desarrollado anteriormente, pero

adaptado al presente caso, y con su correspondiente calibración. Para ello se caracterizará mecánicamente el tramo de vía y el material móvil que circulará sobre la misma para simular numéricamente el comportamiento estructural de la cuña de transición, junto con una campaña experimental similar a la empleada en el banco de pruebas. Con la información experimental obtenida se realizará la calibración del modelo numérico. Con el modelo numérico validado y calibrado se verificará, por un lado, la aptitud estructural para lograr una transición de rigidices efectiva en la zona de transición y, por otro lado, se procederá a la evaluación dinámica del tramo de vía para valorar si las vibraciones generadas por el tráfico pueden suponer un riesgo si el emplazamiento de la solución se encuentra en entornos urbanos.

Finalmente, y como punto final a la presente tesis, se expondrán las conclusiones alcanzadas fruto del proceso investigador desarrollado, trazando una comparativa de estas con los objetivos iniciales de la investigación anteriormente comentados. Así mismo, se comentarán futuras líneas de investigación que emanen de los resultados alcanzados por la doctoranda.

3. ESTADO DEL ARTE

ESTADO DEL ARTE

En el presente apartado se realiza un estudio del estado actual de la técnica asociada a sistemas para asegurar la transición de rigidices en zonas de transición. Es importante indicar, que previa exposición del Estado del Arte, se aportará la información necesaria en cuanto a antecedentes y particularidades, de modo que se permita un mayor entendimiento de la problemática en cuestión.

En primer lugar, se comentará el estado de avance del conocimiento respecto al comportamiento estructural de la vía en zonas de transición en lo que a la transición de rigidices se refiere, evaluando factores condicionantes y efectos que implican los cambios de rigidices sobre la vía, así como estudios experimentales y modelos numéricos empleados para su análisis.

En segundo lugar, se expondrán de forma detallada distintas soluciones para salvar la problemática generada en los cambios de transición, destinadas a minimizar el deterioro de la vía en estas zonas debido a acciones dinámicas originadas por el transcurso del vehículo ferroviario a través de los asientos diferenciales de la vía. Las soluciones investigadas pueden clasificarse en dos grandes grupos en función de la zona de actuación: soluciones actuando sobre la superestructura o sobre la infraestructura.

3.1 INVESTIGACIONES SOBRE EL ANÁLISIS DEL CAMBIO DE RIGIDEZ EN ZONAS DE TRANSICIÓN.

En los inicios del ferrocarril a principios del siglo XIX, la infraestructura de la vía estaba formada por una capa de balasto apoyada sobre la plataforma. En esta configuración de vía se ponían de manifiesto debilidades que afectaban tanto al deterioro prematuro de las vías como al confort y seguridad del viajero [1] [2] [3].

Con la mejora de la técnica y para dar respuesta a las necesidades demandadas por la sociedad, surgió la llamada alta velocidad. Este modo de transporte se caracteriza por la circulación a muy altas velocidades a través de vías conformadas [4], en general, por una sucesión de capas de forma entre el balasto y la plataforma con el objetivo de repartir mejor las tensiones que llegan a la plataforma ferroviaria. La utilización de estos sistemas multicapas conducen a un aumento sensible de la rigidez vertical de la vía lo cual tiene un impacto en los costes de mantenimiento. Es por esto, que se traduce como crucial actuar en la superestructura, y especialmente en las placas de asiento para tener una vía de alta calidad a la vez que rentable [5].

Como consecuencia de lo comentado habrá ciertos puntos del trazado ferroviario en los que inevitablemente se han de producir variaciones de la rigidez vertical. Estos cambios abruptos de la rigidez vertical de la vía tienen lugar en las transiciones entre el terraplén y las estructuras de vía rígidas (por ejemplo, túneles, obras de paso o puentes), y cuando se pasa de la vía con balasto a la vía sin balasto (es decir, de la vía convencional a la vía en placa), dando origen a comportamientos estructurales de la vía que pueden ser muy diferente antes y después de la sección de transición, lo que lleva a una amplificación de las fuerzas dinámicas que actúan sobre el vehículo y la vía.

En estas secciones, por cuestiones de trazado, se ha de disponer de un “elemento” que garantice la transición y que permita el cambio gradual de rigidez, con el fin de minimizar, o incluso eliminar, las posibles consecuencias que se derivarían de una transición brusca.

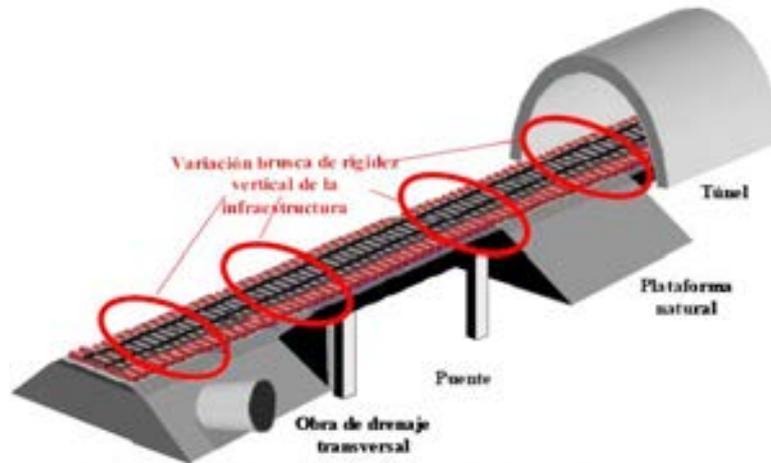


Figura 3.1.1. Ejemplos de variaciones acentuadas de rigidez vertical de la vía.
Fuente: [6]

Algunos de los puntos de la vía donde pueden producirse estos cambios de rigidez son, por ejemplo, los estribos de los puentes, las proximidades de los túneles, los cambios de una vía en balasto a una vía en placa, las obras de drenaje transversal en el cuerpo de los terraplenes, los pasos inferiores para vehículos o animales, etc. [7]

Las zonas de transición son muy habituales en un trazado ferroviario, más aún en un país como España donde la orografía del territorio es sumamente compleja y requiere de obras importantes para poder salvar los desniveles del terreno. Tal y como exponen los autores Melis Maynar M., Jiménez Vega M. y Cuéllar Villar D. en “Inventario de puentes ferroviarios de España” [8] y en “Inventario de túneles ferroviarios de España”, existen alrededor de 1.350 puentes de fábrica (sillería, mampostería, ladrillo), metálicos o de hormigón, y más de 1.700 túneles con una longitud de unos 800 km distribuidos en 14 corredores ferroviarios nacionales.

<i>Líneas actuales de AV</i>	<i>Número de obras de paso</i>
Madrid - Sevilla	32 viaductos y 17 túneles
Córdoba – Málaga	19 viaductos y 8 túneles
Madrid – Valladolid	18 viaductos y 5 túneles y 102 pasos a nivel
Madrid – Barcelona	149 viaductos y 162 túneles
Madrid - Toledo	1 viaducto

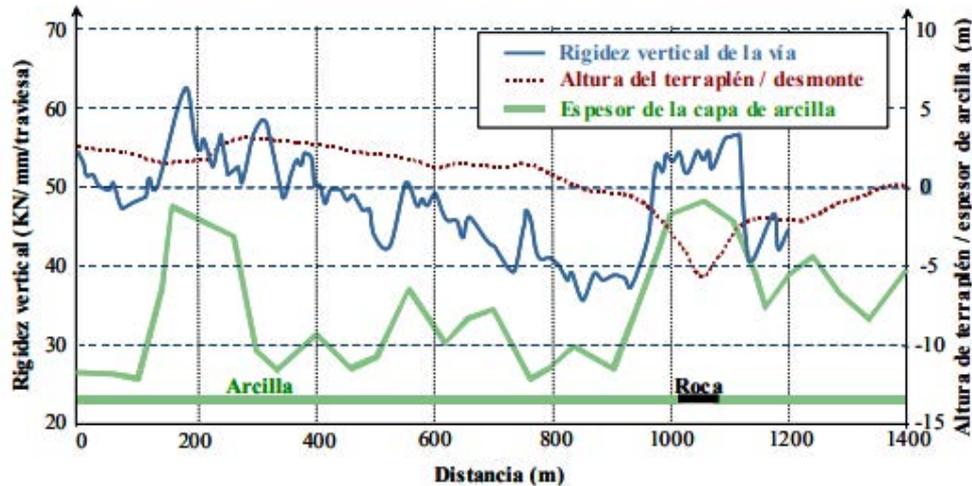
Tabla 3.1.1. Número de obras más relevantes que se encuentran en algunas de las líneas de alta velocidad más importantes. Fuente: [9]

Hay que tener en cuenta que por cada obra de paso existen dos obras que se deben ejecutar, una para cada estribo.

3.1.1 Evaluación de factores condicionantes y efectos sobre la vía y su uso

Los mencionados cambios de rigidez pueden presentarse de distintas formas a lo largo de la infraestructura de la vía debido a elementos que condicionan su comportamiento estructural:

- Rigidez vertical aleatoria: ésta se encuentra a lo largo de la vía estando relacionada con las irregularidades del sistema, como pueden ser la separación de las traviesas [10], cambios en la capa de balasto [11], la existencia de un puente o túnel [12], y otros factores que modifican el comportamiento de la estructura, como la distribución y composición del material donde asienta la plataforma.



Gráfica 3.1.1 Variaciones longitudinales de rigidez vertical del sistema balasto-plataforma, relacionadas con las características de la plataforma. Fuente: [5]

- Juntas de carril: la rigidez vertical en las juntas de carril tiene un valor inferior a la que ofrece el carril. Cuando un tren pasa por la junta a alta velocidad se originan grandes deflexiones en esta región, llevando a incrementar los esfuerzos transmitidos por las ruedas, y, por tanto, contribuyendo al deterioro de la pista.
- Desvíos: en esta parte de la vía se obtienen irregularidades de rigidez e inercia. La rigidez de flexión en el desvío difiere de los valores presentes a lo largo de la vía por motivos como la variación de longitud y distancia de traviesas, o por la mayor masa y rigidez del propio carril, en comparación con los circundantes.

Las variaciones de este parámetro mecánico provocan incrementos de las cargas dinámicas y, por tanto, asientos diferenciales en distintos puntos de la vía, que pueden tener repercusiones importantes [13]. Las transiciones de rigidez están frecuentemente asociadas a la distorsión de la geometría, a la degradación del material y a la pérdida de confort de los pasajeros ([14], [15] y [16]), lo que implica un mantenimiento frecuente y una mala calidad de la plataforma ferroviaria. A modo de ejemplo se recogen los siguientes problemas [17] que habitualmente pueden aparecer en la zona de transición, si no se disponen de los elementos oportunos para evitarlos:

- **Deterioro del vehículo:** el incremento de la fuerza de contacto rueda-carril puede dar lugar a la aparición, o al crecimiento, de determinados defectos en las ruedas del material móvil, los cuales, a su vez, pueden incrementar el deterioro de la vía debido al incremento de cargas dinámicas.
- **Incremento de las necesidades de mantenimiento de la vía:** en este sentido, nuevamente, el incremento de la fuerza de contacto rueda-carril provoca un deterioro acelerado de la superestructura ferroviaria que supone, evidentemente, unas necesidades adicionales de mantenimiento, con el consiguiente coste económico que éstas suponen (en equipos, medios auxiliares, personal...) y la alteración en la normal explotación de la línea. En este contexto, en Paixao.A, et al. en 2013 [1] se estimó que el 10% de la inversión anual europea en mantenimiento de vías se destina a operaciones de mantenimiento en zonas de transición, mientras que estas solo representan el 2,8% de la longitud de la red.
- **Confort del viajero:** un cambio repentino de rigidez puede provocar un aumento del nivel vibratorio que este experimenta y, por tanto, penaliza su nivel de comodidad (de acuerdo con la norma UNE-ENV 12299).
- **Seguridad:** de acuerdo con el criterio de Nadal o con el criterio japonés, un defecto de nivelación vertical puede provocar un incremento considerable del índice Y/Q y, por tanto, un mayor riesgo de descarrilo.
- **Costes:** una realización adecuada de las cuñas requiere un tiempo elevado y un coste no despreciable, además de una laboriosidad de construcción, cosa que provoca que en muchos casos no se llegue a construir adecuadamente, con el riesgo de que los problemas puedan tener una relevancia notable debido a la falta de un dispositivo que permita una transición gradual.

Los factores más relevantes de influencia en el comportamiento de la vía en estas transiciones son fundamentalmente:

- **Factores externos:** Tales como cargas del tráfico ferroviario, la velocidad de circulación de los trenes, vibraciones producidas por los mismos, condiciones meteorológicas y ambientales, así como en especial, la presencia de agua y las variaciones de temperatura.

- **Factores geotécnicos:** la magnitud de las deformaciones del terraplén depende fundamentalmente de los materiales utilizados en su construcción y de su puesta en obra.
- **Factores de la estructura:** tipología de la estructura, rigidez de la misma, movimientos laterales e interacción vía-estructura y movimientos diferenciales del estribo debidos a variaciones de temperatura.
- **Factores de la vía:** tipo de armamento (carril, placa de asiento, sujeción y traviesas), así como de balasto, o en su caso, las características de la vía en placa.
- **Factores relacionados con la explotación de la vía:** limitaciones impuestas por las administraciones ferroviarias relativas a los asientos diferenciales o a la calidad geométrica que se le exige a la vía, en función de las características del tráfico que circula por ella.
- **Factores relacionados con el tipo de material móvil:** Las características diversas que componen el material móvil que se desplaza por la línea genera cargas diferentes debido a la configuración del material rodante y de sus distintas velocidades de paso por la zona.

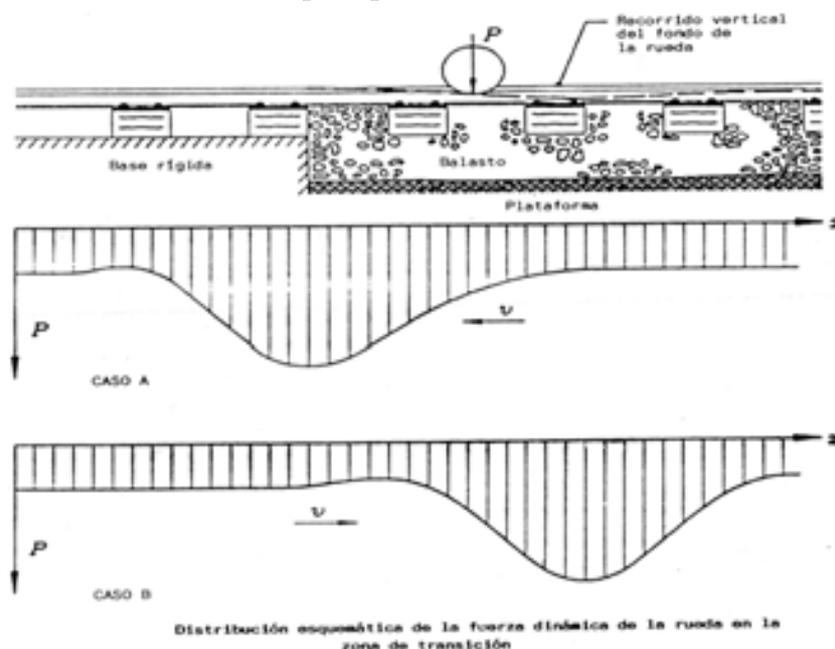
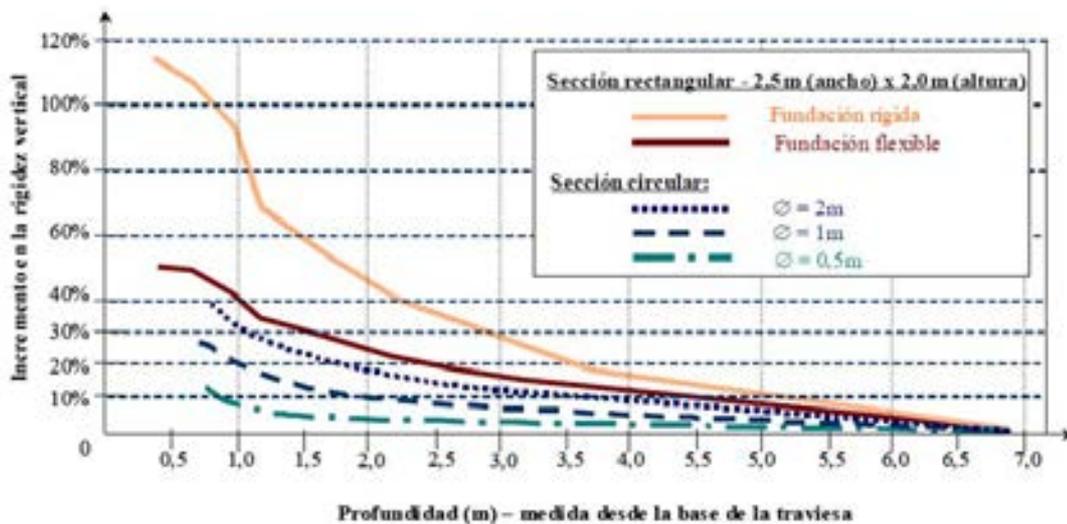


Figura 3.1.2. Variaciones rigidez vertical. Fuente: [18]

En el caso concreto de obras de drenaje transversal en el cuerpo de los terraplenes, tales como son los tubos o cajones, la incidencia de estos puede provocar un incremento de la rigidez vertical de un 40% o incluso llegar hasta un 90%, en el caso de una fundación rígida, tal y como se deduce de la observación de la figura siguiente estudiada por Romo et. al [19].



Gráfica 3.1.2 Variaciones de rigidez vertical de la vía producidas por las obras de drenaje (u otros tipos) transversales a la vía, según tamaño y profundidad. Fuente: [19].

De acuerdo con el estudio realizado por este autor, la presencia de tuberías hidráulicas u otras de diámetro superior a 1 metro pueden tener una influencia notable sobre la variación de rigidez, superando a veces un incremento del 20% de la rigidez vertical cuando éstas se encuentran a una profundidad reducida, por lo que su influencia es más notable sobre la plataforma.

3.1.2 Estudios experimentales y modelos numéricos

En el ámbito ferroviario, el MEF fue empleado en estudios paramétricos por autores como Robnett et al. [20], López Pita [21], Raymond et al. (1979), Sauvage y Larible [22], Desai y Siriwardane [23], Profillidis [24] y Sahu et al. [25], citando apenas algunos de los más relevantes [26] [6] [21] [28] [29]. En concreto, los estudios

llevados a cabo en la E.N.P.C (École Nationale des Ponts et Chaussées) en la década de los ochenta con el programa ROSALIE (Profillidis, 1986) se integraron en los trabajos del comité D-117 de la ORE que validaron los resultados obtenidos con los alcanzados en extensas campañas de mediciones experimentales llevadas a cabo en Francia, Gran Bretaña y Austria. Estos resultados sirvieron de base a los ábacos de dimensionamiento de las estructuras de apoyo de la vía desarrollados por la UIC en el actual catálogo de secciones estructurales [30] [31] [32].

En el siguiente cuadro se resumen algunos de los estudios llevados a cabo con modelos de elementos finitos para analizar las repercusiones de distintos parámetros de diseño en la resistencia vertical de la estructura de vía.

AUTORES	MODELO DE ELEMENTOS FINITOS	PRINCIPALES CONCLUSIONES
López Pita [21]	Modelización de la sección transversal de balasto - elasticidad plana- (MEF)	La heterogeneidad transversal del balasto, debido a los procesos habituales de compactación, afecta la deformabilidad elástica de la vía
Universidad de Illinois Robnett, Knuston, Tayabji y Thompson [33]	ILLITRACK- Programa que modeliza la vía según el plano longitudinal (viga continua soportada por muelles- traviesas- que asientan sobre una malla de elementos finitos rectangulares pseudo-planos que representan el sistema balasto-plataforma) y transversal	Ventajas de una buena plataforma y de una capa de subbalasto compuesta por materiales estabilizados. La variación de rigidez vertical del sistema balasto-plataforma tiene menos preponderancia cuando la rigidez del emparrillado es elevada

Svec, Raymond y Turcke [34]	Modelo tridimensional de la estructura de soporte de la vía	La incidencia de varios ejes (con relación a una sola carga) aumenta con la disminución del módulo de deformación de la plataforma
Sauvage y Larible [22]	Modelización tridimensional del sistema mecánico superestructura- capas de asiento- plataforma	El coeficiente de rigidez de la capa de balasto varía poco en función del espesor de la(s) subcapa(s)
Profillidis [24]	Modelo elasto-plástico tridimensional (MEF) del sistema mecánico superestructura- capas de asiento- plataforma	Solo el 40% de la carga es soportada por la traviesa subyacente. La flexibilidad de la traviesa depende de su naturaleza y calidad de la plataforma. Validación de la ley de comportamiento elastoplástica con criterio de rotura de Drucker-Prager
Sahu et al. [25]	Modelo elástico lineal tridimensional (MEF) de la estructura de vía	La influencia del espesor de subbalasto en el módulo de vía puede ser relevante (hasta 25%). Efecto del E del balasto y subbalasto muy reducido

Tabla 3.1.2 Ejemplos de modelos de elementos finitos desarrollados por algunos autores. Fuente: [5].

En los últimos años se han realizado intensas investigaciones para identificar las causas ([35], [36]) que ayudan a comprender mejor los procesos que influyen en la dinámica de la transición de la vía, por medios de estudios de campo,

experimentos de laboratorio, y modelización numérica. A este respecto, Li y Davis [37] y Li et Al [38] estudiaron los problemas de degradación asociados a las transiciones mediante el análisis de varios casos de transiciones de puentes en los EE.UU. Una extensa campaña de recolección de datos de campo combinada con una metodología basada en la modelización numérica mediante modelos de elementos finitos tridimensionales (3D) de una transición de terraplén a obra de fábrica es presentada en Coelho [39] con el objetivo de analizar su comportamiento y mejorar los procedimientos de mantenimiento.

Además, un caso similar fue estudiado en Varandas [40] con datos de campo y un modelo numérico-dinámico unidimensional que dio cuenta de la deformación de la vía a largo plazo y la posibilidad de vacíos de balasto bajo las traviesas.

Por otro lado, diferentes modelos de elementos finitos bidimensionales fueron desarrollados por Lei y Zhang [41] para el análisis de una transición entre una vía de balasto y una vía en placa; y De Miguel [42] para un estudio detallado del comportamiento dinámico de las zonas de transición, con especial atención a la transición del terraplén a la obra de paso. Además, Galván [43] estudió el comportamiento general de las transiciones ferroviarias, así como la influencia de la rigidez de las suelas bajo carril y de la distancia entre traviesas mediante un modelo de elementos finitos en tres dimensiones. Finalmente, Mishra et al. [44] desarrollaron un enfoque integrado basado en una combinación de instrumentación en terreno, un modelo dinámico 3D y el método de elementos discretos. El estudio señaló la relevancia de considerar el balasto como un medio de partículas, en lugar de un medio continuo, como se hizo en el modelado mediante elementos finitos.

Cabe destacar el hecho de que a partir de los trabajos desarrollados por el comité ORE D-117, en el año 1999 se desarrollaron las “Recomendaciones para el proyecto de plataformas ferroviarias” entre el Ministerio de Fomento, el CEDEX y RENFE. En estas se dan pautas a seguir para realizar el diseño de un modelo numérico para el caso de líneas férreas de ancho español, así como las características propias de éste.

A modo de ejemplo práctico, en [45] se desarrolla un modelo de elementos finitos para simular el comportamiento de transiciones entre terraplenes y estructuras para mejorar los métodos disponibles para modelar diseños de vías férreas. La característica más distintiva del modelo propuesto es su intento de

simular el comportamiento real de los diversos materiales que componen la estructura de la pista en una transición. Para lograr esto, se utilizó un modelo tridimensional con condiciones de contorno que se asemejan más a las condiciones reales; asumiendo que la superficie que define el talud del terraplén es libre y tiene en cuenta el comportamiento elastoplástico del suelo.

En la siguiente figura se exponen los resultados obtenidos para la distribución de tensiones verticales, así como la distribución de deflexiones verticales elásticas bajo traviesa.

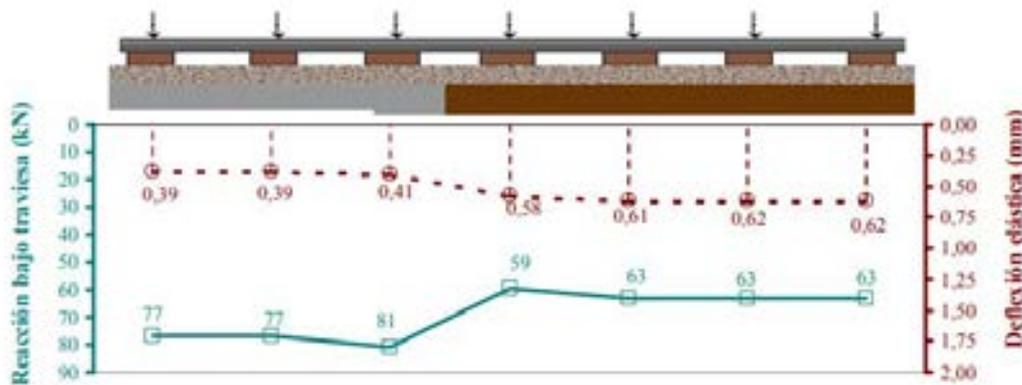


Figura 3.1.3. Distribución de tensiones y deflexiones verticales de la traviesa a lo largo de una transición obra de fábrica-plataforma natural. Fuente: [45]

Las importantes diferencias en la evolución del asiento, según se plantee desde la óptica de las tensiones sobre el balasto (ley de Hettler o Shenton) o desde la deflexión vertical (ley "micro-ballast"), confirman que, más allá de una correcta evaluación del nivel de sobrecargas dinámicas resultante con la evolución del asiento, la dificultad reside en la evaluación del asiento en sí mismo (conociendo los esfuerzos), el cual puede tener múltiples configuraciones.

Ante esta dificultad, se pueden efectuar algunas consideraciones cualitativas, asumiendo que no se produce ningún asiento diferencial de la plataforma. En la Figura 3.1.4 se visualizan las diferencias comparativas en cuanto a la distribución de tensiones verticales y el asiento previsto a lo largo de la transición (para $1 \cdot 10^6$ ciclos de carga) para 3 tipos de elasticidad de la placa de asiento habitualmente empleadas en líneas de alta velocidad. El asiento vertical del balasto expuesto se obtuvo aplicando la ley de Hettler (expresiones 4.8 y 4.9), considerando una misma

constante de asiento ($c=0,43$) y un mismo factor de escala ($s=0,001$) en la sección rígida y en la flexible.

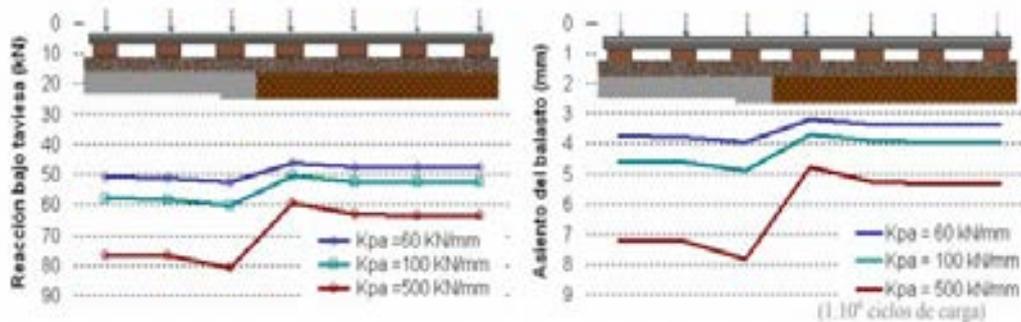


Figura 3.1.4. Efecto de la elasticidad de la placa de asiento en una transición obra de fábrica-plataforma natural: reacción bajo traviesa (izq.) y asiento después de $1 \cdot 10^6$ ciclos (der.). Fuente: [46]

Independientemente de la magnitud del asiento acumulado, la mencionada figura pone de relieve el importante papel que puede tener la elasticidad de la placa de asiento en la evolución del deterioro en una sección de transición entre obra de fábrica y plataforma natural de una línea de alta velocidad. La homogeneización de esfuerzos a lo largo de la misma se traduce en una muy notable reducción del asiento medio y principalmente en una reducción de los asientos diferenciales entre ambas secciones.

3.2 INVESTIGACIÓN DE SOLUCIONES PARA LA MITIGACIÓN EN ZONAS DE TRANSICIÓN

La mayoría de las soluciones intentan generar cambios suaves de rigidez de una zona a otra, unas optan más por arreglar los problemas de origen geotécnico, otras actúan sobre la disposición de las capas de la vía, sobre los elementos de la vía como traviesas, placas de asiento, almohadillas bajo carril o bajo traviesa, actuando sobre la infraestructura o sobre la superestructura.

Algunas de las soluciones que se pueden encontrar hoy en día frente a este problema se basan en realizar cambios graduales en la rigidez de la vía para que no haya diferencias sustanciales en asientos ni en rigidez. De esta forma, se han analizado varias alternativas en la literatura (para una descripción general de los

diferentes métodos, ver Indraratna et al, 2019 [47]). Globalmente, se pueden identificar dos tipos de soluciones:

- Actuando en la infraestructura
- Actuando en la superestructura

3.2.1 Actuando en la infraestructura

3.2.1.1 Cuñas de transición tradicionales

Como ejemplo de solución actuando en la infraestructura, encontramos como solución más común la realización de las llamadas cuñas de transición tradicionales. Su principal función, entre otras, es la de graduar la variación de rigidez vertical de la vía, de manera que se consiga una transición “progresiva” conforme el vehículo se aproxima a la estructura. Esto se realiza variando los materiales que componen la plataforma disponiendo progresivamente de materiales de mayor dureza hasta que finalmente se realiza la transición completa a hormigón, que es el que mayor dureza tiene. Incluso se llegan a emplear materiales granulares tratados con cemento, que no tienen asiento por la cohesión que les proporciona este aglomerante.

En el siguiente caso se muestra un esquema del funcionamiento de una cuña de transición:



Figura 3.2.1. Esquema funcionamiento de las cuñas de transición tradicionales. Fuente: [48]

Además, la norma IGP-I.2. de Adif establece algunas recomendaciones para la instalación de cuñas de transición. Se establecen diferentes casos según el tipo de transición que encontremos. También se establecen casos en los que se establece una transición con otros tipos de obras de fábrica (como redes de drenaje).

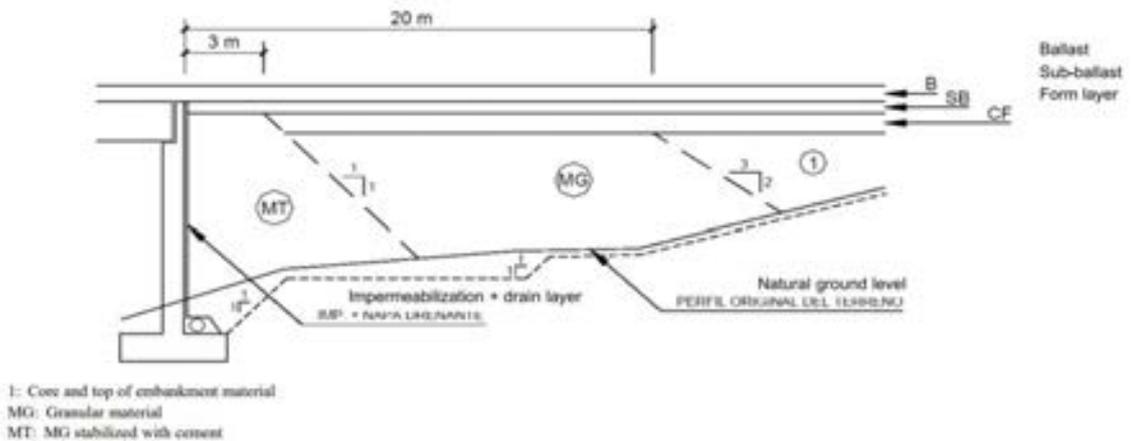


Figura 3.2.2 Ejemplo de cuña de transición a viaducto. Fuente: [49]

Esta solución se resuelve de distinta forma según el ámbito geográfico. Como ejemplo, en el cuadro siguiente se muestran algunas de las diferentes características que adopta cada país para llevar a cabo las cuñas de transición [50].

ADMINIST. (PAIS)	ESQUEMA DE LA SECCIÓN DE TRANSICIÓN	CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES
DB (Alemania)		<ul style="list-style-type: none"> ① Plano de rodadura ② Grava ($C_u \geq 5$ grado de compactación $D_{pr} \geq 1,03$) ③ Módulo de deformación $E_{v2} \geq 120$ MN/m² Sub-balasto ④ Sub-capa ⑤ Dimensión máx. correspondiente a un terraplén en materiales coherentes ⑥ Terraplén o suelo natural (desmorte) ⑦ Dispositivo de drenaje ⑧ Relleno en hormigón
SNCF (Francia)		<ul style="list-style-type: none"> ① Plano de rodadura ② Zona de transición en grava-cemento ③ Sub-balasto ④ Capa de coronación ⑤ Dispositivo de drenaje ⑥ Grava-cemento (o grava bien graduada, según la importancia de la línea) ⑦ Grava compactada a 95% OPM ⑧ Terraplén ⑨ Material impermeable compactado
FS (Italia)		<ul style="list-style-type: none"> ① Plano de rodadura ② Capa de sub-balasto asfáltica de 12cm ③ 30-40cm de grava ④ 20cm de "misto-cemento" ⑤ 25cm de grava

Figura 3.2.3. Ejemplos de estructuras de transición propuestos por algunas administraciones ferroviarias. Fuente: [49]

Sin embargo, incluso con la adopción de algunos de los esquemas que se muestran, siguen existiendo importantes variaciones de rigidez que hacen que el problema persista en muchos casos. Además, el diseño de las cuñas está basado en recomendaciones constructivas que no pueden tener en cuenta parte de las variables que intervienen en el fenómeno, con tendencia a adoptar diseños muy conservadores.

En España:

Actualmente la tipología de las cuñas, su forma constructiva y la metodología de ejecución y ensayo vienen tipificadas por el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF) en el Pliego de Prescripciones Técnicas Tipo para los Proyectos de Plataforma (PGP 2006), así como en las Instrucciones y Recomendaciones para la Redacción de Proyectos de Plataforma (IGP 2006), es decir, actualmente la documentación existente únicamente marca una serie de recomendaciones constructivas.

Seguidamente se muestran una imagen donde puede verse una cuña de transición para ejecutar según ADIF con diferentes características. Hay que destacar que las cuñas de transición deben diseñarse con carácter individualizado, para cada puente o viaducto de ferrocarril, teniendo en cuenta el perfil real del terreno adyacente al estribo y sus características.

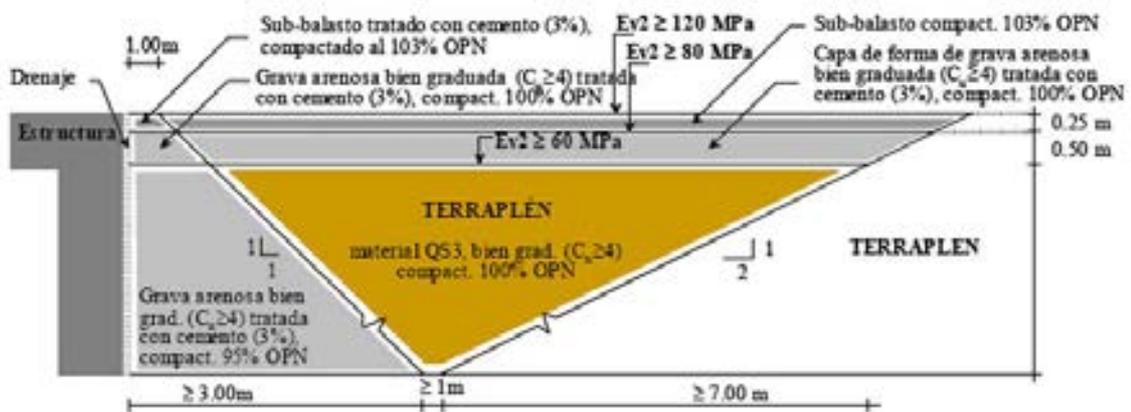


Figura 3.2.4. Sección de transición terraplén-obra de fábrica de la línea Madrid-Sevilla. Fuente: [51]

3.2.1.2 Losas de transición

Esta solución consiste en disponer un elemento rígido que se apoya en un extremo en el estribo y por el otro descansa sobre el terraplén. Este elemento es una losa de hormigón armado, que tiene el mismo ancho que la plataforma de la vía, una longitud variable y el espesor necesario para resistir las cargas del tráfico.

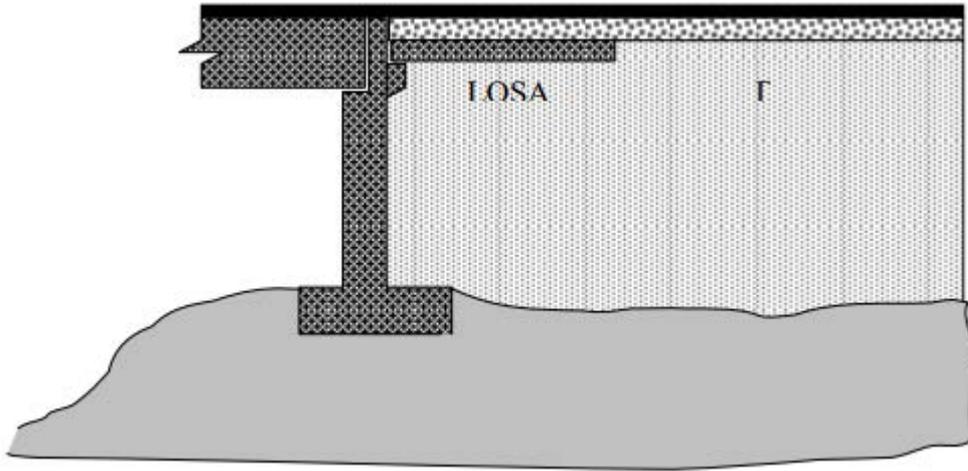


Figura 3.2.5. Esquema de la losa de transición. Fuente: [52].

El funcionamiento de la losa se basa en su capacidad de giro respecto al estribo, en el que se apoya libremente en un extremo. Cuando el terraplén asienta, el otro extremo de la losa sigue su movimiento, girando en torno a su apoyo en el estribo. Así, se materializa una rampa de acceso hasta el estribo, de manera que la superficie del firme tiene una deformación gradual entre el terraplén y el estribo. Por lo tanto, se suprime el escalón en el borde del estribo y la superficie de rodadura adopta una suave pendiente ascendente hacia la estructura. Aunque el terraplén experimente el natural proceso de asentamiento, el tren que circula va ganando altura de forma gradual, sin que se note la presencia del punto duro de la estructura.

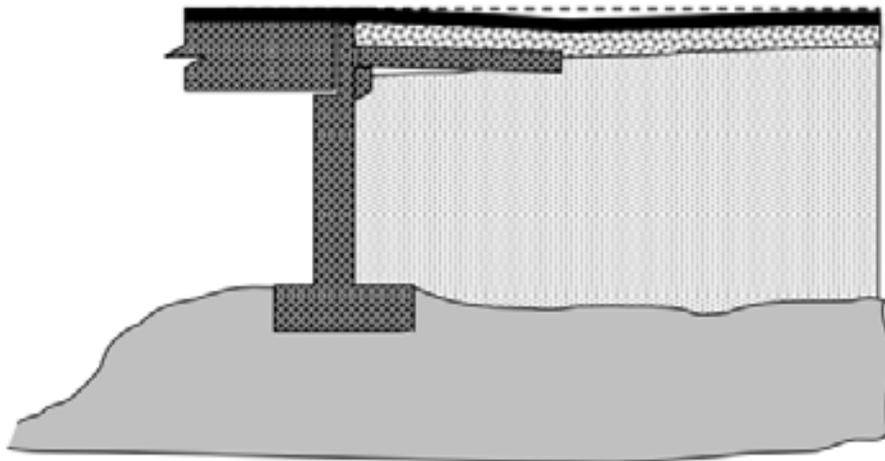


Figura 3.2.6. Funcionamiento de la losa de transición. Fuente: [52].

Es un sistema muy utilizado y bastante eficaz, siempre y cuando el asiento del terraplén no sea excesivo provocando que la pendiente de acceso sea muy elevada.

El segundo problema que afecta a las losas de transición es el de su integridad [53] [54]. Al producirse el asiento del terraplén, la losa se despegaba del terreno y funciona aproximadamente como una viga biapoyada en el estribo en un extremo y sobre el terraplén en el otro [55]. Esto produce unos esfuerzos importantes al paso de los trenes, que además son variables. En algunas ocasiones, especialmente cuando los asientos son importantes, se produce la rotura de la losa de transición, que deja de cumplir su función. En este caso, las obras necesarias para devolver la integridad al firme son muy importantes.

3.2.1.3 Pilotes en la cimentación

Esta técnica genera un aumento de la rigidez y una disminución de la deformación, ya que apenas permite la generación de asientos. En cambio, su inconveniente principal es que es una solución cara [56] y su efectividad depende de su longitud.

Por ello, entre sus aplicaciones óptimas, se encuentra la opción de combinar sus longitudes para conseguir una transición lo más tendida posible, realizando una cimentación continua de tipo muro bajo un terraplén granular (probablemente realizado con geotextil) con una placa de hormigón continua como soporte del carril [9] y usando columnas de grava para drenar y fortalecer el terreno.

3.2.2 Actuando en la superestructura

3.2.2.1 Incorporando elementos elásticos

Otra posible solución a la variación de rigidez a lo largo de la pista es la incorporación de elementos elásticos en el sistema del ferrocarril [57].

Estas soluciones están formadas por componentes elásticos múltiples y pueden situarse entre diversos elementos dentro tanto del sistema con balasto como en la vía en placa [50]. Los dispositivos más estudiados son las placas de asiento situadas bajo carril, suelas bajo traviesas (USP, under-sleeper pads [58] [59]) y mantas elásticas fijadas entre el balasto y el subbalasto (SBM, sub-ballast mats).

➤ **Placas de asiento situadas bajo carril**

Las placas elásticas están conformadas por un componente elástico que se interpone entre el carril y la traviesa para una mejor repartición de la carga y aumentar al mismo tiempo la elasticidad de la superestructura de grava, lo cual repercute positivamente en el desgaste de los componentes de la superestructura y en la comodidad del viaje.

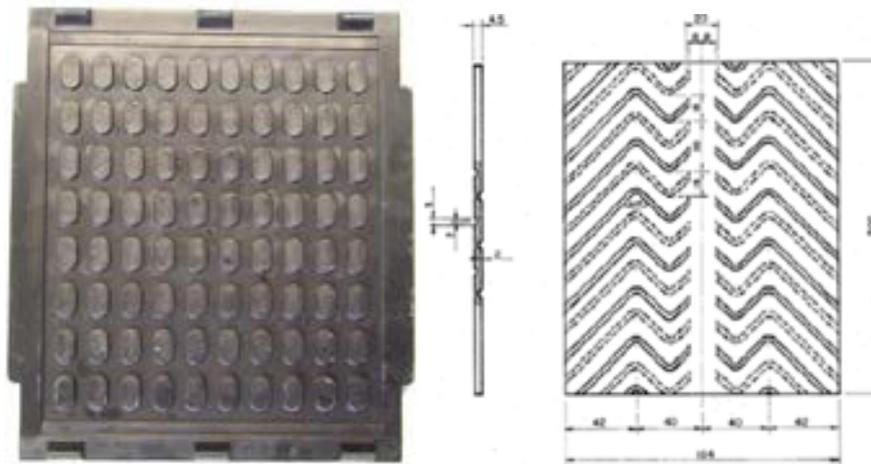


Figura 3.2.7. Placa de asiento bajo carril. Fuente: [60]

➤ **Suelas bajo traviesa**

El uso de suelas elásticas entre el balasto y las traviesas es una solución cada vez más extendida puesto que contribuyen a reducir las vibraciones procedentes de las traviesas de hormigón, cuyo poder de amortiguamiento se encuentra por debajo del deseado desde el punto de vista estructural. Con la incorporación de suelas bajo traviesa es esperado que la carga actuante se distribuya en una mayor área de balasto [61]. Según Riessberger [52], normalmente las traviesas apoyan sobre el balasto con sólo el 3-4% de su superficie. Sin embargo, al incorporar suelas elásticas bajo las traviesas, la superficie de contacto aumenta un 30%, consiguiéndose así una mayor reducción de presión sobre el balasto y menor efecto de abrasión [62].



Figura 3.2.8. Suela bajo traviesa. Fuente: [63]

La presencia de este elemento elástico proporciona una disminución del 50% de la carga dinámica actuante en la traviesa [55] [56] [57] [58].

➤ **Mantas elásticas**

Otra medida adoptada para la amortiguación de vibraciones y absorción de energía procedente del paso de trenes, es la introducción de un tapiz elástico entre la capa de balasto y la subestructura. Esta medida es esencial en zonas donde se requieren componentes elásticos en la estructura ferroviaria para reducir vibraciones y niveles sonoros [59], debido a las propiedades elásticas que este material aporta al sistema.

A estas mantas se les exige que tengan capacidad de deformación y disipación de energía mecánica procedente del sistema ferroviario. Estas propiedades son función, por una parte, del espesor y densidad de manta y, por otra parte, del tamaño y tipo de componentes que constituyen este material [69].

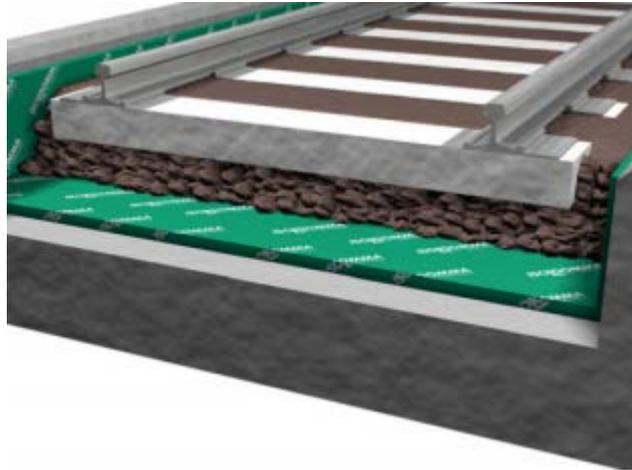


Figura 3.2.9. Manta elástica en vía con balasto. Fuente: [70]

3.2.2.2 Modificando la disposición de las traviesas

Aumentar gradualmente la longitud de traviesas y disminuir el espaciamiento entre ellas da más rigidez, por lo que mediante una transición en tamaños y separaciones de traviesa podemos conseguir al mismo tiempo una transición más progresiva en la variación de la rigidez [71] [72] [73] [74].

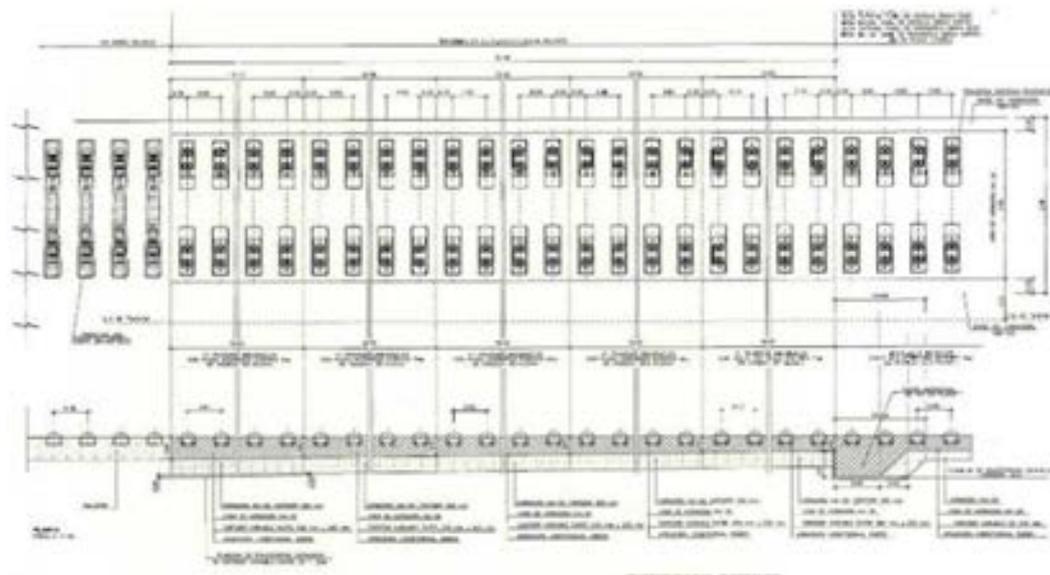


Figura 3.2.10. Detalle constructivo de zona de transición, planta y alzado Tramo de Alta Velocidad Vigo Urzaiz-Soutomaior. Fuente: [75]

Por otro lado, también podemos utilizar traviesas de material compuesto [76] ya que estas permiten reducir de forma satisfactoria el módulo de vía de una estructura. Minimizan la rigidez de la vía en la estructura hasta la aproximación. Usando traviesas de madera se ha observado que las presiones sobre las capas inferiores aumentan más que con traviesas de hormigón.

Otra solución consiste en el uso de traviesas cuadro [77], la cual consiste en colocar este tipo de traviesas en toda la longitud de transición [78] [79].

Su forma especial en doble H proporciona un apoyo continuo al carril (poseen 4 sujeciones por traviesa), aumentando la rigidez en el plano horizontal y generando una gran estabilidad en la alineación y la resistencia al pandeo mayor que los sistemas convencionales.



Figura 3.2.11. Traviesas cuadro propuestas como solución superestructural de transición de vía en balasto a vía en placa. Fuente: [80].

3.2.2.3 Colocando carriles adicionales

La utilización de carriles adicionales permite rigidizar la zona de aproximación en el terraplén, generando un panel de vía más resistente y

aumentando su rigidez (proporciona soluciones modestas para vías con valores bajos de rigidez.

4. DISEÑO Y CÁLCULO DE LA NUEVA CUÑA DE TRANSICIÓN

DISEÑO Y CÁLCULO DE LA NUEVA CUÑA DE TRANSICIÓN

En el presente apartado se van a desarrollar los trabajos de diseño y modelización llevados a cabo para la obtención de la nueva cuña de transición.

Para dar respuesta al apartado se seguirá la siguiente estructura. En primer lugar, se plantean una serie de alternativas para dar solución a la problemática de los cambios de rigideces en las zonas de transición. Para ello se diseñan 6 prototipos de cuñas prefabricadas, con diferentes variantes, y se analizaron cuatro configuraciones de sección de la infraestructura en función de recomendaciones del Administrador De Infraestructuras Ferroviarias ADIF, donde vienen implementadas las cuñas prefabricadas diseñadas.

A continuación, se expondrá la modelización numérica aplicada para simular los casos diseñados mediante el método de elementos finitos, donde se hace un análisis exhaustivo de las dimensiones y propiedades de los componentes y elementos intervinientes en la infraestructura ferroviaria, con el objetivo de obtener una simulación numérica del comportamiento estructural del conjunto frente a cargas verticales sobre la vía, para luego comparar los resultados entre sí y con soluciones convencionales también simuladas numéricamente, finalizando con la selección de aquellas soluciones que mejor transición de rigidez y que mejores cualidades técnico-económicas presentan.

Acto seguido se hará un análisis multicriterio para seleccionar las mejores soluciones en función de los resultados numéricos obtenidos y de condicionantes técnico-económicos que doten a la solución de prestaciones efectivas en cuanto al proceso de fabricación y ejecución y costes derivados.

Por último, se definirán de forma definitiva las propiedades mecánicas de las soluciones finalistas del análisis multicriterio, y se dimensionarán para resistir las cargas ante las situaciones más desfavorables, ya sea durante la fase de explotación debido a cargas permanentes y variables por peso propio de la infraestructura o el uso de la vía, o durante la fase de construcción debido a cargas inducidas por el izado de las piezas que conforman la cuña de transición.

4.1 ESTUDIO DE ALTERNATIVAS

4.1.1 Enfoque inicial mediante recomendaciones técnicas

La solución constructiva debe contemplar una serie de requisitos para ser capaz de integrarse en el entorno terreno-obra de paso-estribo con eficacia, formando una estructura estable en su conjunto, resistente y capaz de transmitir de forma correcta los esfuerzos que le llegarán desde la superestructura. Asimismo, la solución debe estar al alcance de la tecnología actual de construcción, y que consiga el objetivo último de realizar una transición gradual de rigidez siguiendo pautas de eficiencia estructural y economía.

El enfoque del diseño vendrá precedido por las instrucciones y recomendaciones que establece el IGP-2006 de ADIF (“Instrucciones y recomendaciones para la redacción de proyectos de plataforma”), en el que se establece la necesidad de emplear zonas de transición de rigidez en los terraplenes de líneas de AV contiguos a un estribo de estructura, a fin de reducir el riesgo de asientos diferenciales. Según el IGP esto se consigue ejecutando capas de terraplén al aproximarse a la estructura, en longitud decreciente a medida que sube el terraplén (formando una “cuña”), con un material granular de las condiciones fijadas en el Pliego de prescripciones técnicas tipo para los proyectos de plataforma (PGP-2011), ya sea tratado con cemento (MT) o sin tratar (MG), según los casos que se definen en los esquemas adjuntos.

Dichos esquemas engloban cuatro casos, que se diferencian en función de la altura del relleno existente desde el tablero o losa superior de la obra de fábrica a la cota inferior de la capa de subbalasto.

a) Estructura enterrada, con $H > 2,0$ m. La cuña se ejecuta con material MG a ambos lados de la estructura, así como sobre su losa superior con un espesor de 80 cm, en la forma representada (talud 3/2) en la siguiente figura.

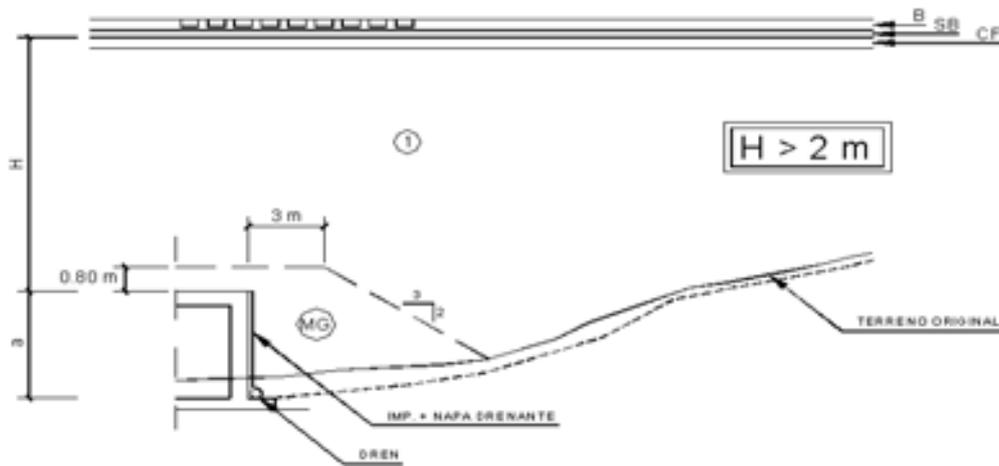


Figura 3.1 Esquema de transición en obra de fábrica enterrada profunda. Fuente: IGP 2006

b) Estructura enterrada, con $0,50 < H \leq 2,0$ m. La cuña está constituida, como en el caso anterior, por material MG a ambos lados de la estructura, pero se rellena con el mismo material hasta la cota de apoyo de la capa de forma, según muestra la siguiente figura.

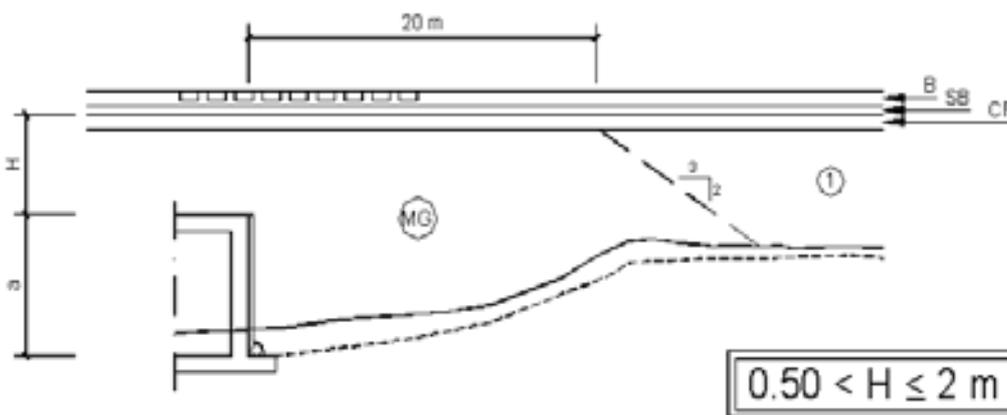


Figura 4.1.1 Esquema de transición en obra de fábrica enterrada semi-profunda. Fuente: [81]

c) Estructura enterrada, con $0 < H \leq 0,50$ m. La cuña está constituida por material MG (talud 3/2) más material MT tratado con cemento (talud 1/1) a ambos

lados de la estructura y sobre la losa superior hasta el apoyo de la capa de forma, según muestra la siguiente figura.

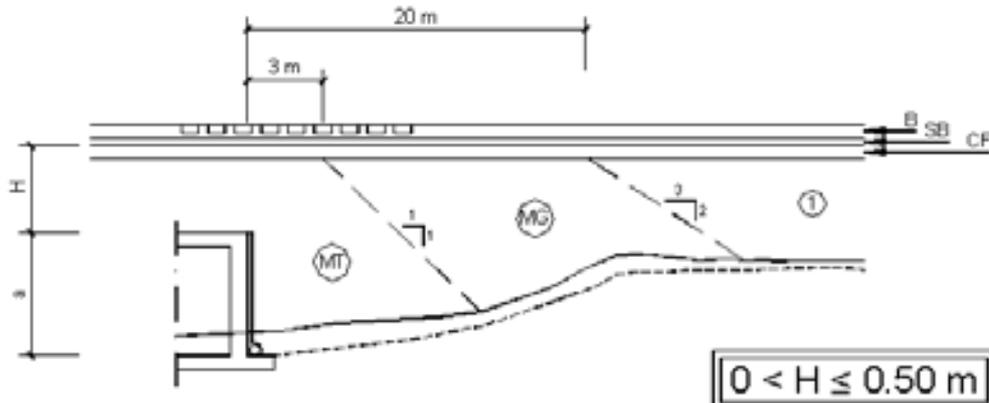


Figura 4.1.2 Esquema de transición en obra de fábrica enterrada superficial. Fuente: [81]

d) Estructura a rasante (cota sobre el tablero insuficiente para capa de forma+subbalasto+balasto). En este caso, el proyectista debe ajustar la cota de la estructura a fin de que sobre el tablero se coloque sólo balasto, en espesor mínimo de 40 cm y máximo de 50 cm. La cuña está constituida por material MG (talud 3/2) más material MT tratado con cemento (talud 1/1) a ambos lados de la estructura, en la forma representada en las siguientes figuras.

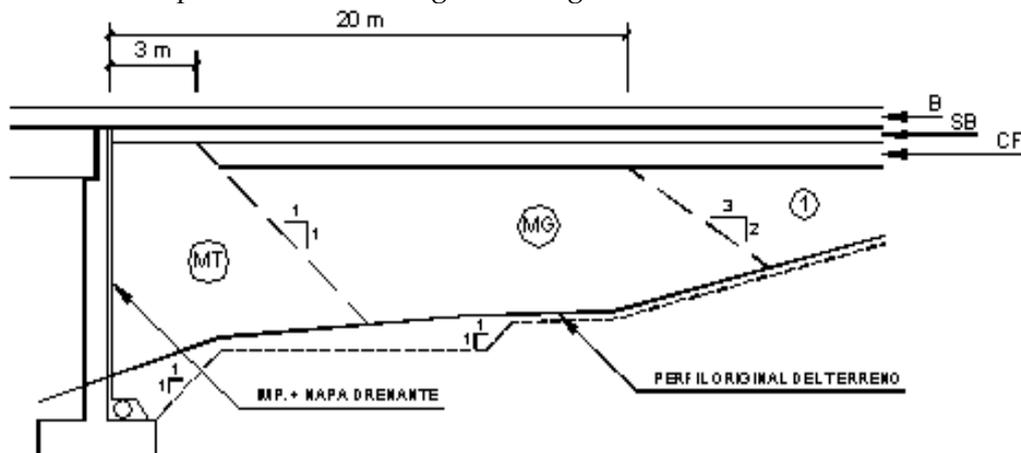


Figura 4.1.3 Esquema de transición en estructura a rasante. Fuente: [81]

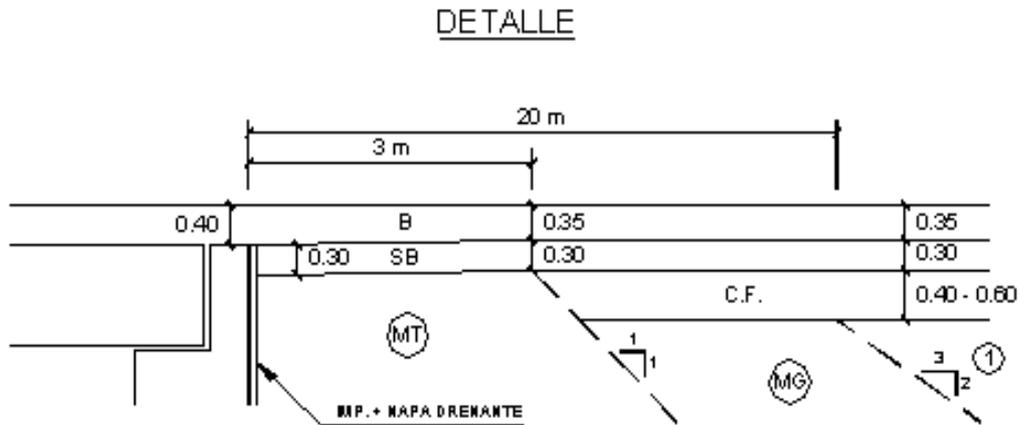


Figura 4.1.4 Detalle del esquema de transición en estructura a rasante. Fuente: [81]

Viendo los casos que se exponen en dichas recomendaciones, cabe pensar que se deben estudiar al menos estos cuatro casos escogiendo un valor para el parámetro H que englobe al conjunto. En el caso de estribo se ha escogido una altura de estribo de 5,1 m de altura, puesto que esta engloba el menor gálibo establecido en normativa, y un mayor valor de este parámetro incrementa exponencialmente el tiempo de cálculo.

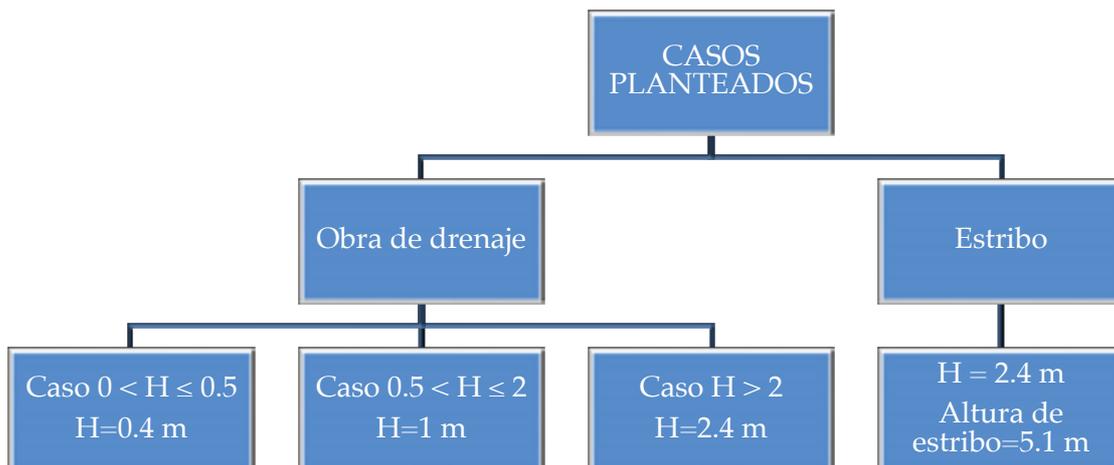


Figura 4.1.5 Organigrama de los casos planteados. Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Prototipos planteados

Las premisas que marcan los prototipos de cuñas prefabricadas de hormigón planteados, así como sus dimensiones, son las de crear una estructura estable en su conjunto, capaz de resistir y transmitir de forma correcta los esfuerzos que le llegarán desde la superestructura, realizable con la tecnología actual (o similar a la actual) de las empresas de prefabricados de hormigón, y que consiga el objetivo último de realizar una transición gradual de rigidez siguiendo pautas de eficiencia estructural y economía.

Por esto mismo se pensó en seis prototipos, con seis formas geométricas a estudiar en un modelo tridimensional de la plataforma ferroviaria construida mediante el método de los elementos finitos.

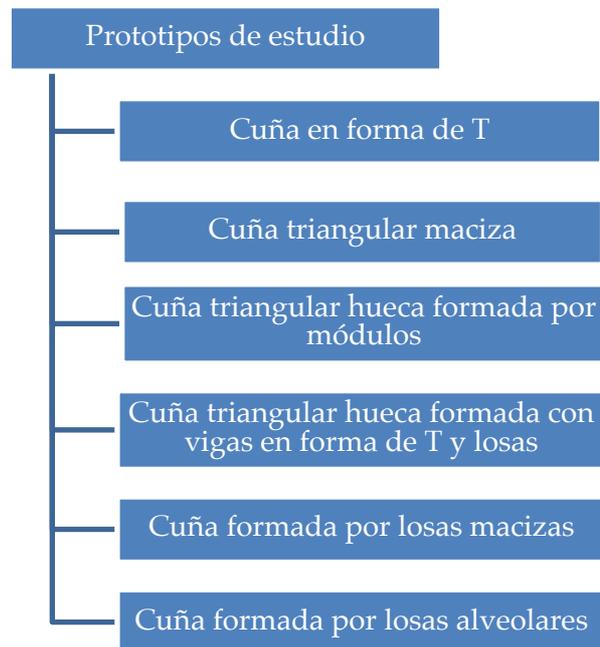


Figura 4.1.6 Organigrama de los prototipos planteados. Fuente: Elaboración propia

A continuación, se exponen las características geométricas y las disposiciones principales en cada uno de los prototipos planteados:

4.1.2.1 Cuña en forma de T

Este prototipo está pensado para realizarse con dos vigas en T de canto variable unidas por sus alas inferiores, disponiéndolas de tal forma que sus almas estén situadas en la vertical del carril.

➤ **Modelo corto (17,07 m)**

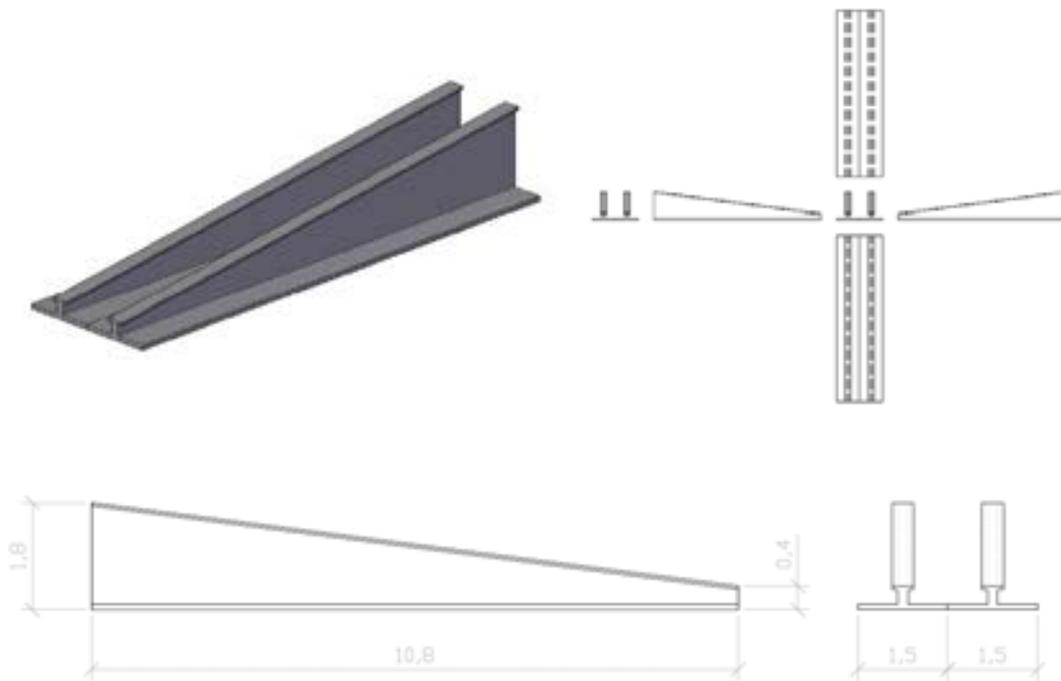


Figura 4.1.7 Esquema 3D, vistas y cotas del modelo corto cuña en forma de T.
Fuente: Elaboración propia

➤ **Modelo largo (27,87 m)**

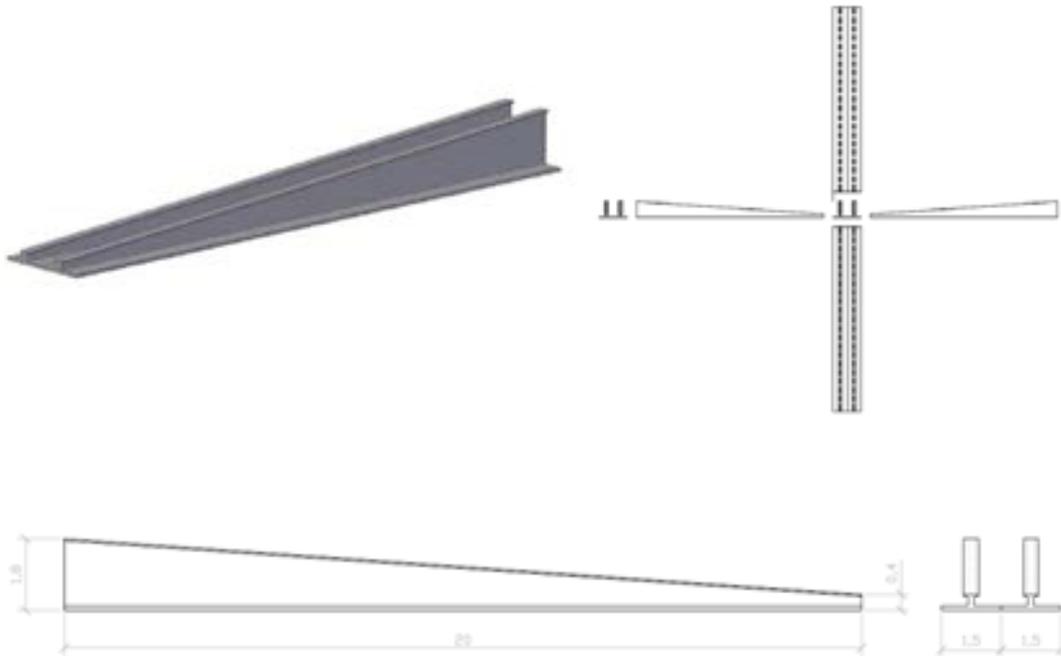


Figura 4.1.8 Esquema 3D, vistas y cotas del modelo largo cuña en forma de T.
Fuente: Elaboración propia

4.1.2.2 Cuña triangular maciza

Este prototipo está pensado para realizarse con módulos macizos.

➤ **Modelo corto (17,07 m)**

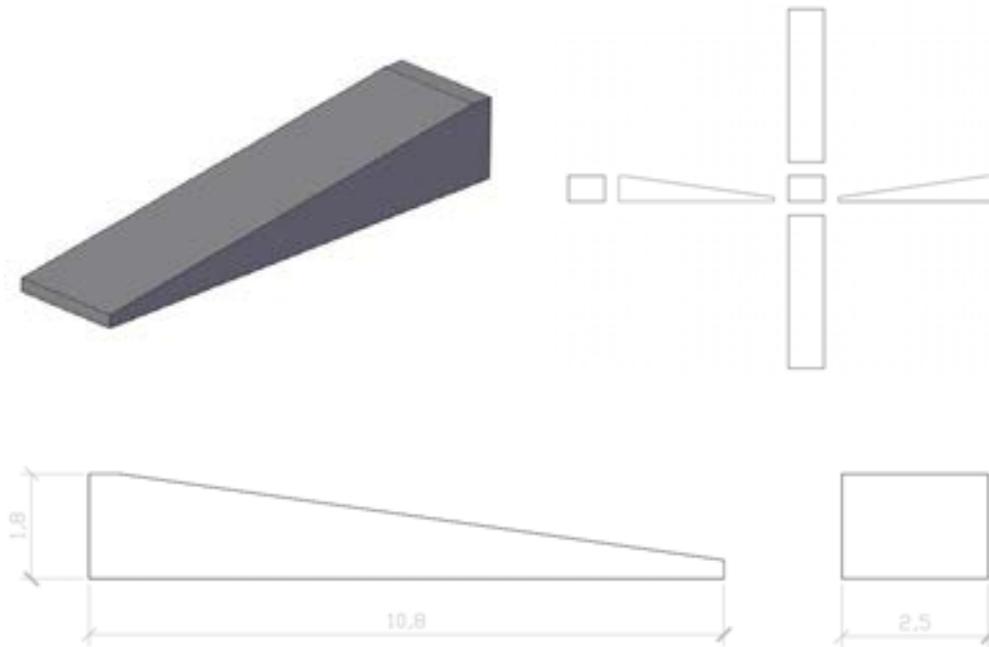


Figura 4.1.9 Esquema 3D, vistas y cotas del modelo corto cuña triangular maciza.

Fuente: Elaboración propia

➤ **Modelo largo (27,87 m)**

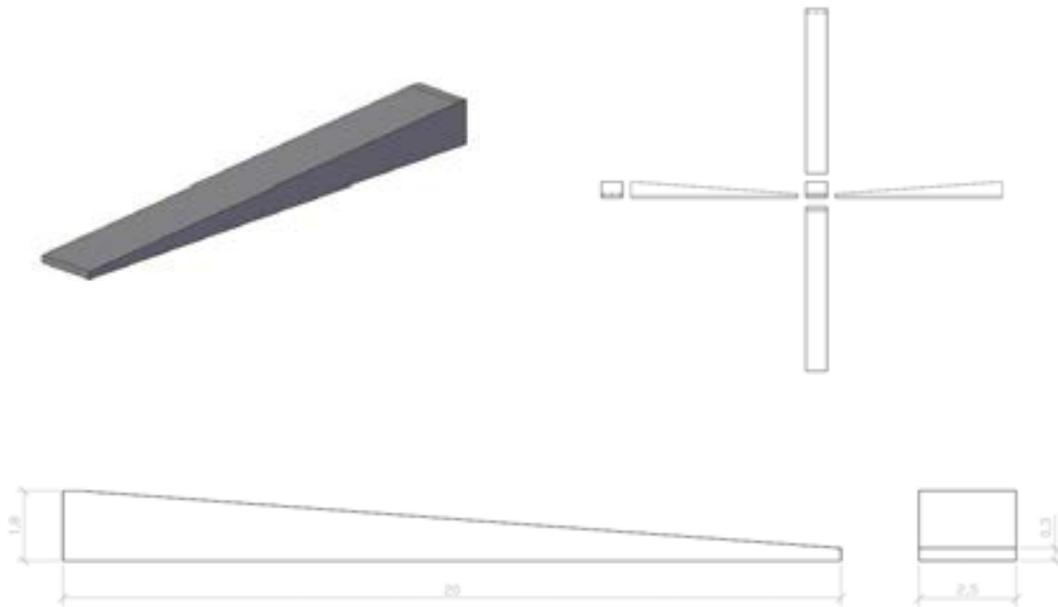


Figura 4.1.10 Esquema 3D, vistas y cotas del modelo largo cuña triangular maciza.
Fuente: Elaboración propia

4.1.2.3 Cuña triangular hueca formada por módulos

Este prototipo está pensado para realizarse con módulos huecos.

➤ **Modelo corto (17,07 m)**

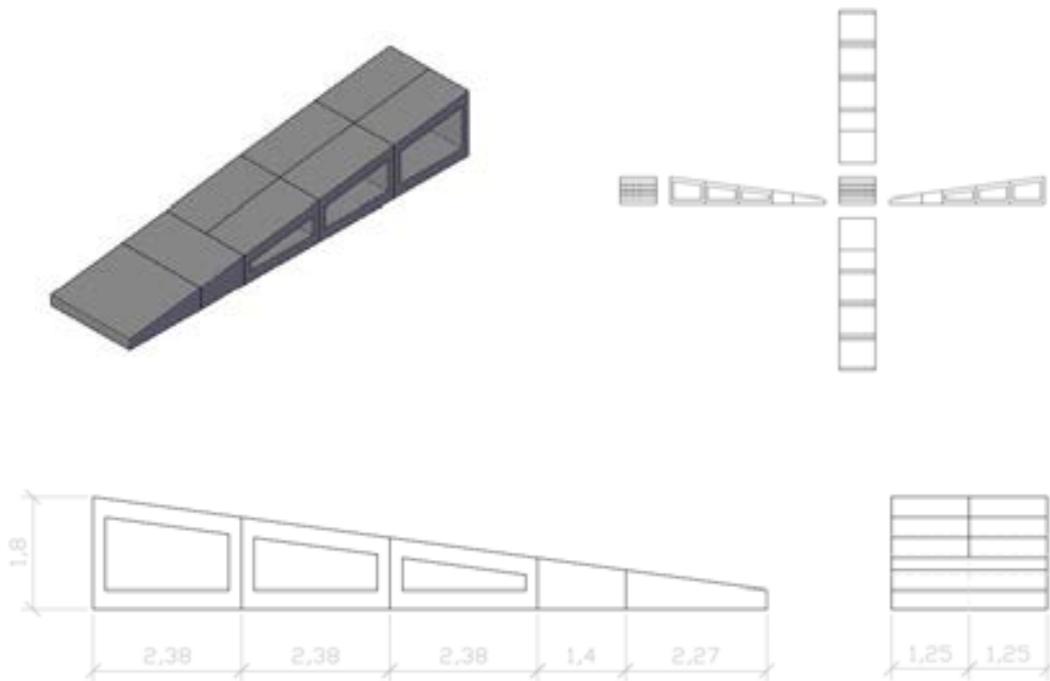


Figura 4.1.11 Esquema 3D, vistas y cotas del modelo corto cuña triangular hueca formada por módulos. Fuente: Elaboración propia

➤ **Modelo largo (27,87 m)**

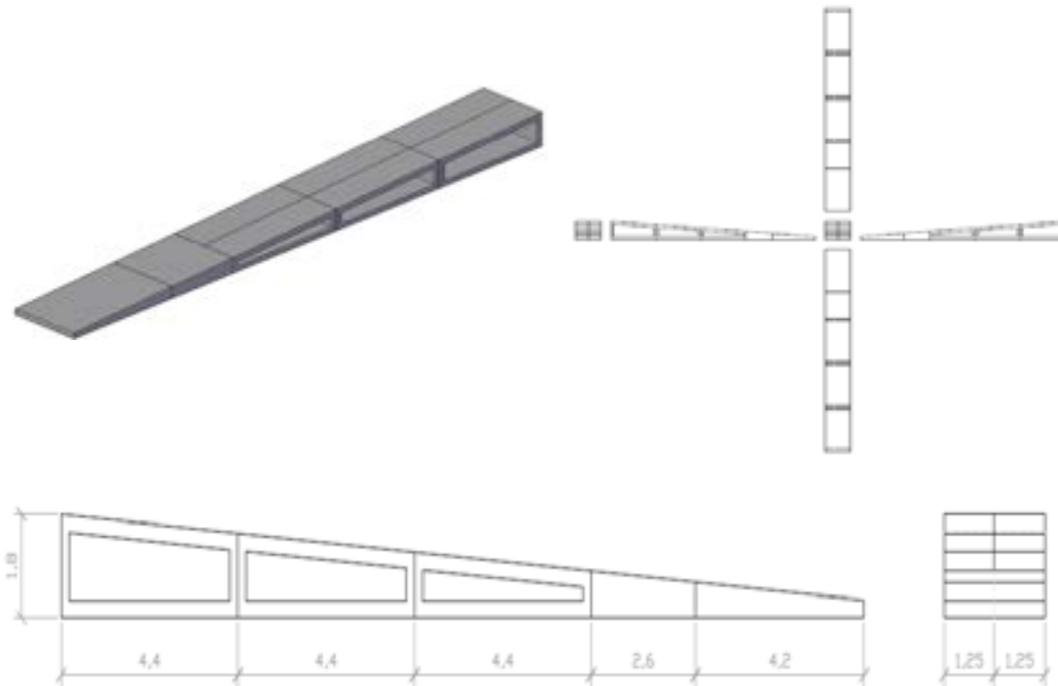


Figura 4.1.12 Esquema 3D, vistas y cotas del modelo largo cuña triangular hueca formada por módulos. Fuente: Elaboración propia

4.1.2.4 Cuña triangular hueca formada por vigas en forma de T y losas.

Este prototipo está pensado para realizarse con dos vigas en T de canto variable unidas por sus alas inferiores, disponiéndolas de tal forma que sus almas estén situadas en la vertical del carril. En su parte superior se apoyan losas que transmitan a las almas las tensiones que reciban de la zona por encima de ellas.

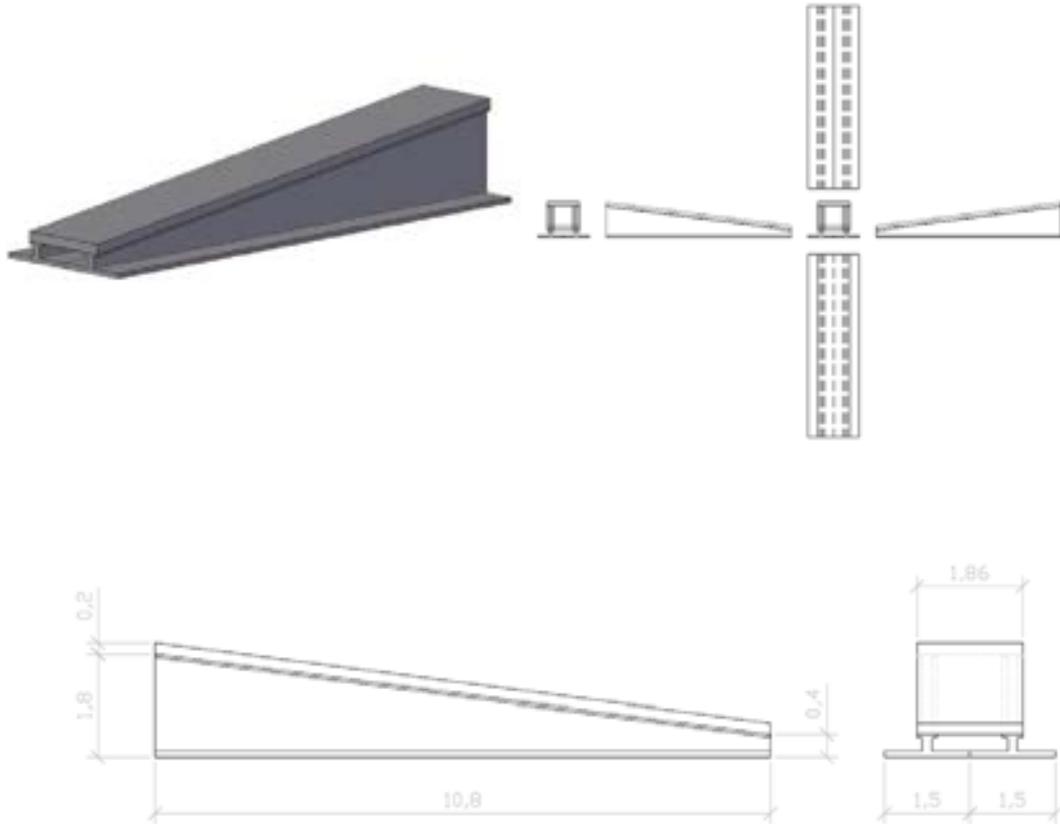
➤ **Modelo corto (17,07 m)**

Figura 4.1.13 Esquema 3D, vistas y cotas del modelo corto cuña triangular hueca formada con vigas en forma de T y losas. Fuente: Elaboración propia

➤ **Modelo largo (27,87 m)**

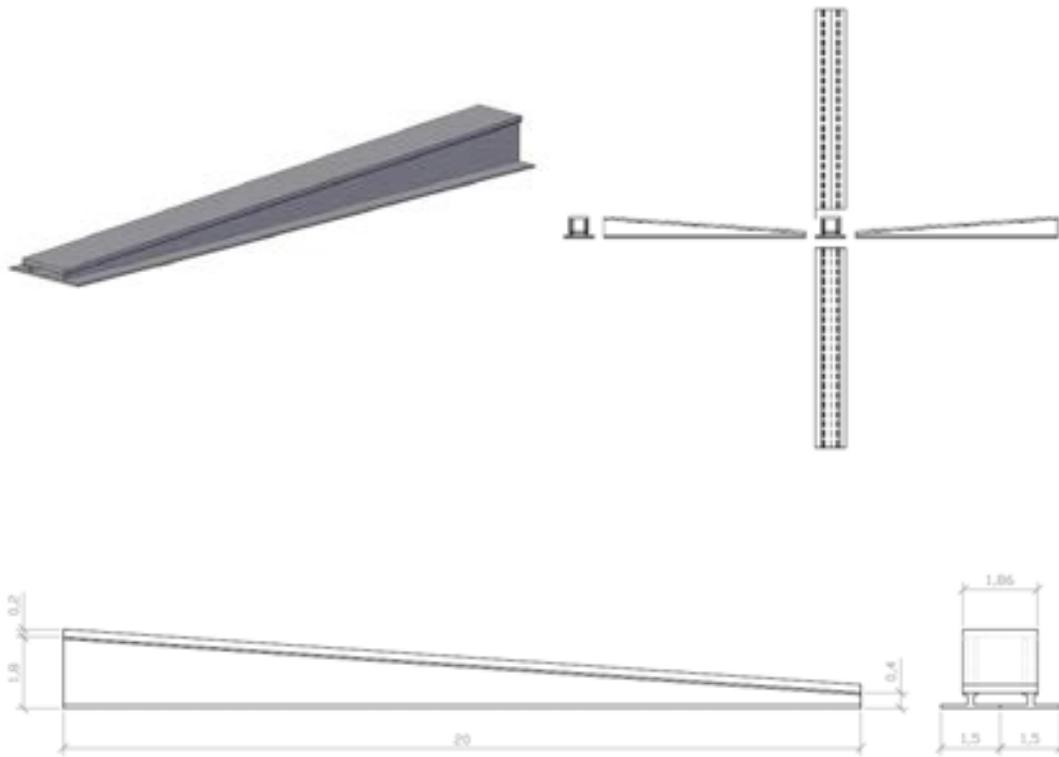


Figura 4.1.14 Esquema 3D, vistas y cotas del modelo largo cuña triangular hueca formada con vigas en forma de T y losas. Fuente: Elaboración propia

4.1.2.5 Cuña formada por losas macizas

Este prototipo está pensado para realizarse mediante losas macizas.

➤ **Modelo corto (17,07 m)**

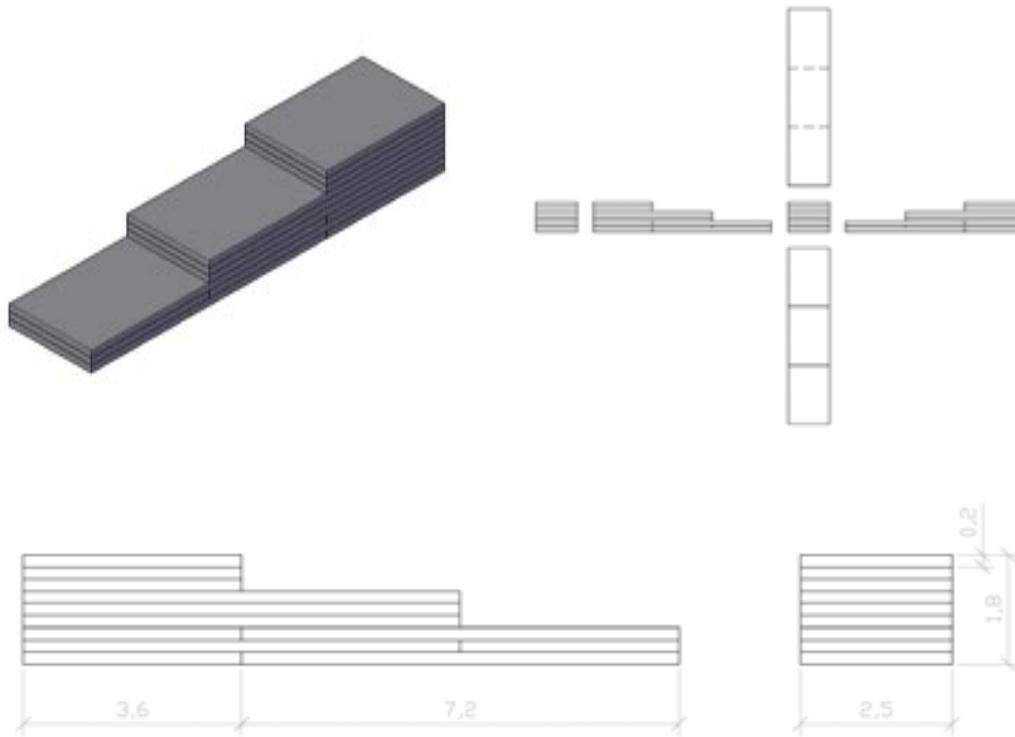


Figura 4.1.15 Esquema 3D, vistas y cotas del modelo corto cuña formada por losas macizas. Fuente: Elaboración propia

➤ **Modelo largo (27,87 m)**

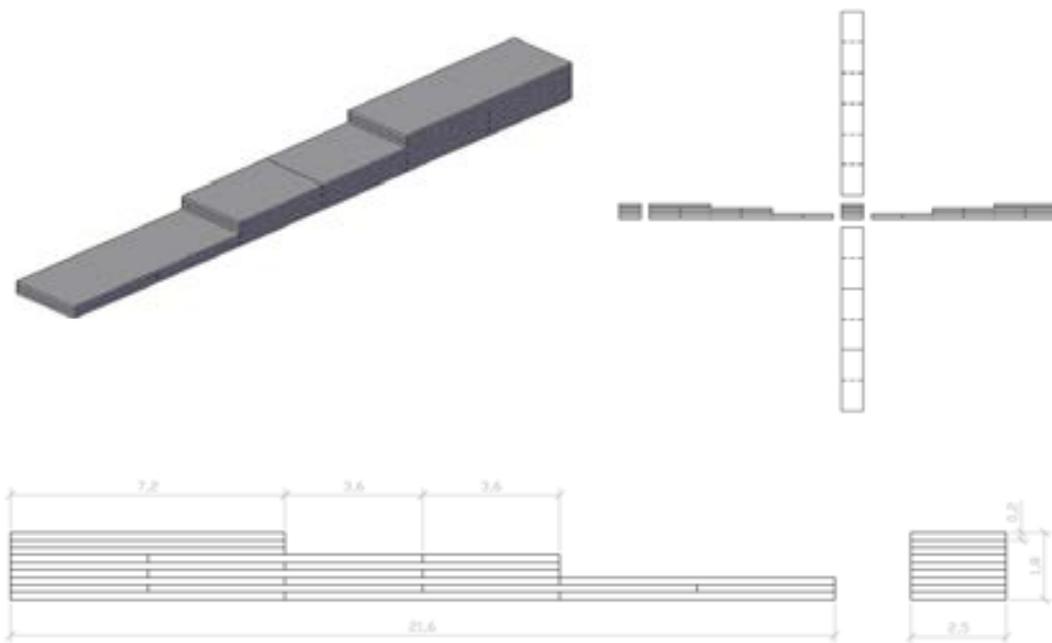


Figura 4.1.16 Esquema 3D del modelo largo cuña formada por losas macizas.
Fuente: Elaboración propia

4.1.2.6 Cuña formada por losas alveolares

Este prototipo está pensado para realizarse mediante losas alveolares.

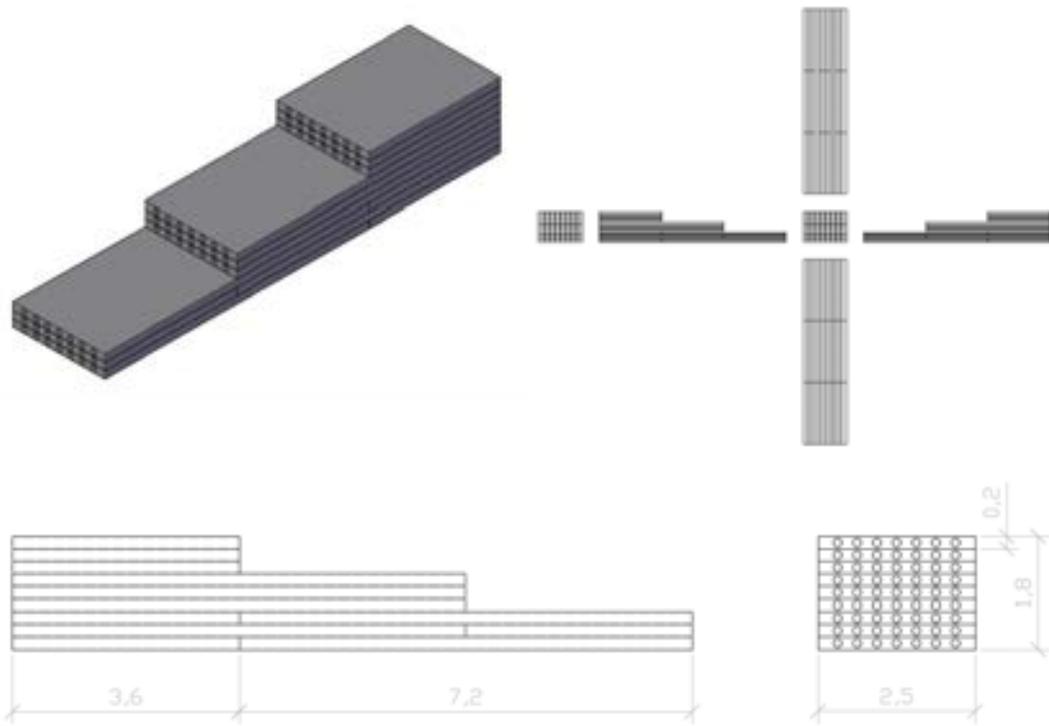
➤ **Modelo corto (17,07 m)**

Figura 4.1.17 Esquema 3D, vistas y cotas del modelo corto cuña formada por losas alveolares. Fuente: Elaboración propia

➤ **Modelo largo (27,87 m)**

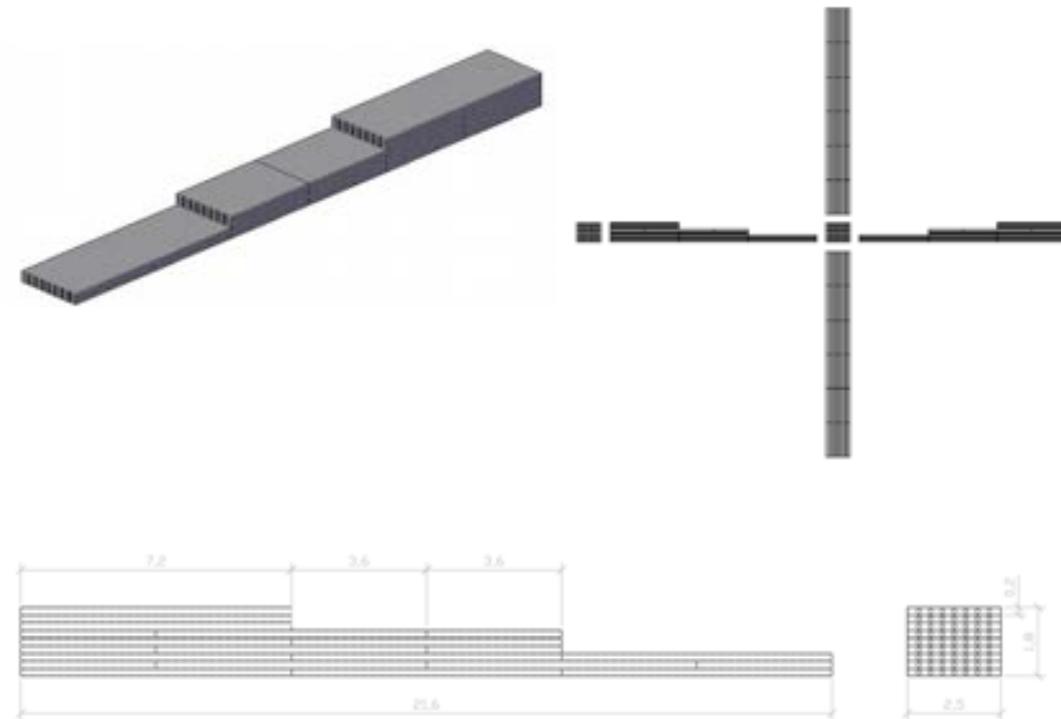


Figura 4.1.18 Esquema 3D, vistas y cotas del modelo largo cuña formada por losas alveolares. Fuente: Elaboración propia

4.2 MODELIZACIÓN NUMÉRICA

4.2.1 Dominio de estudio

Antes de entrar en detalle acerca de la definición del dominio de estudio hay que tener presente que la longitud de una transición entre un terraplén y una estructura depende, generalmente, del tipo de estructura a la que se accede y de la altura del terraplén que se encuentra en esta zona.

Particularmente, en el caso de alturas de terraplén en torno a los 15 metros, las cuñas de transición conformadas mediante materiales granulares y que vienen definidas en el IGP (“Instrucciones y Recomendaciones para Redacción de

Proyectos de Plataforma”), concretamente en el apartado 1.2 relativo a las recomendaciones sobre cuñas de transición, pueden llegar a alcanzar longitudes bastante considerables en sentido longitudinal, suficientemente grandes como para presentar muchas dificultades para ser analizadas detalladamente mediante un modelo de cálculo numérico.

Por ello, para permitir que el modelo numérico completo pueda ser abordado con un coste computacional aceptable, es necesario considerar unas dimensiones de cuña lo suficientemente pequeñas como para ser abordable respecto a tiempo de cálculo, y lo suficientemente grande como para representar de forma aproximada la complejidad del fenómeno estudiado en esta tesis. En este sentido, las medidas geométricas del modelo están condicionadas por diferentes factores.

Concretamente, las direcciones que se han considerado para el cálculo del modelo son las siguientes: el eje “x” marca la dirección de la traviesa, es decir, el sentido transversal, el eje “y” la vertical mientras que el eje “z” constituye la dirección del carril y sobre la cual discurre la vía férrea.

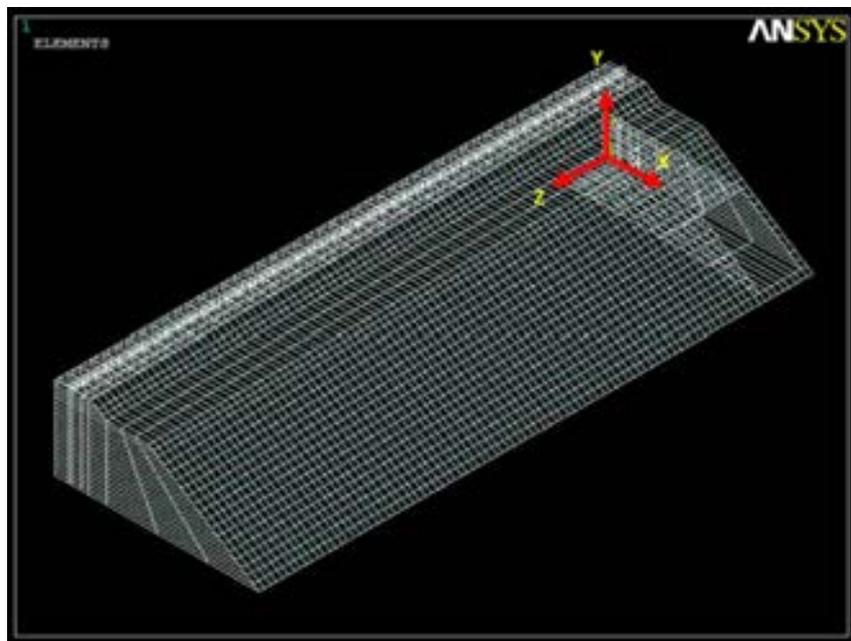


Figura 4.2.1 Denominación de ejes en el modelo. Vista general. Fuente: Elaboración propia.

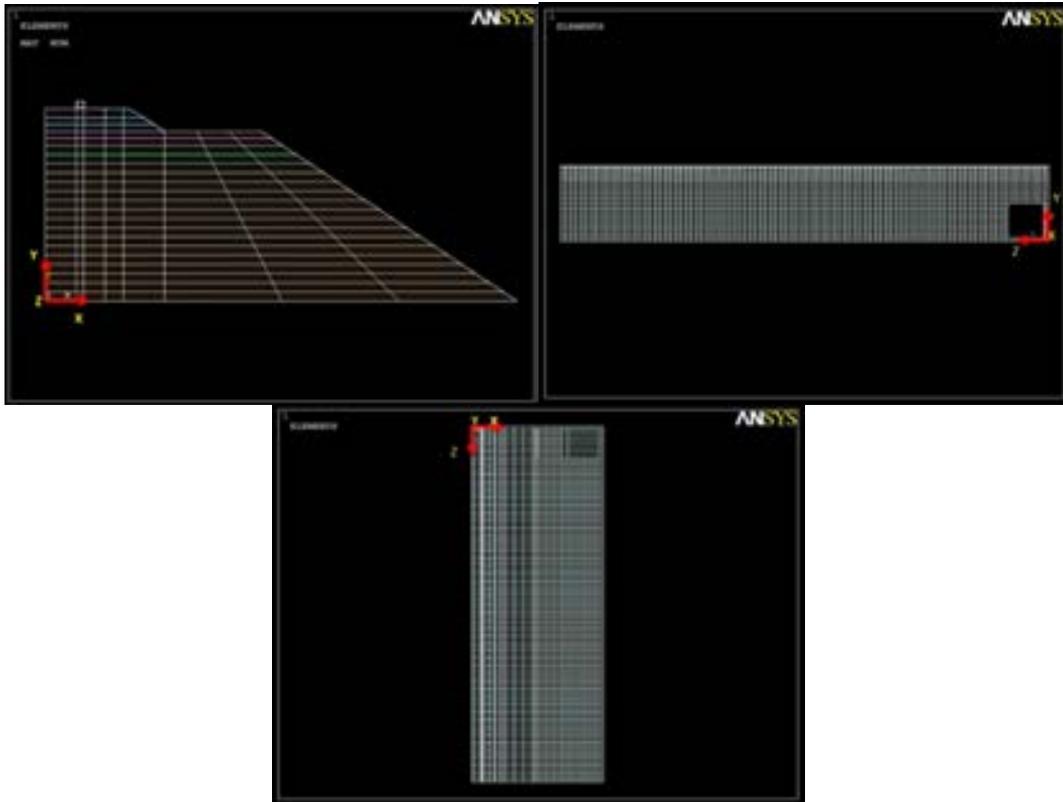


Figura 4.2.2 Denominación de ejes en el modelo. Vista general. Fuente: Elaboración propia

➤ **Eje X (transversal)**

En este eje, las medidas adoptadas para la sección transversal son las definidas en el apartado “3.2 Planos de trazado” del IGP-2006 de ADIF para la vía de alta velocidad. Por lo tanto, observando la sección transversal de la vía y considerando que estamos en una situación de tramo rectilíneo, puede aplicarse simetría con respecto al plano $X=0$ (el plano longitudinal correspondiente al eje de la vía), reduciendo de manera significativa los costos computacionales dada la disminución considerable del dominio. De esta forma, la dimensión transversal del modelo viene determinada por la longitud de media traviesa, más la distancia al plano lateral exterior del modelo.

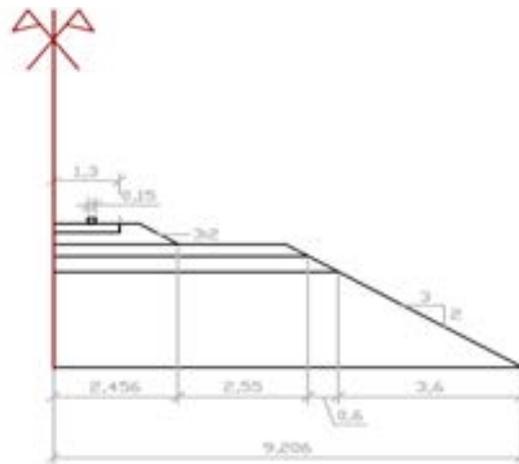


Figura 4.2.3 Dimensiones en el eje X del modelo de obra de fábrica enterrada superficial ($H=0,4$ m). Fuente: Elaboración propia.

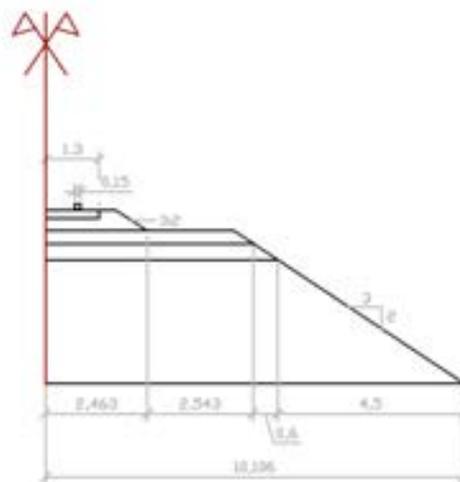


Figura 4.2.4 Dimensiones en el eje X del modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda ($H=1$ m). Fuente: Elaboración propia.

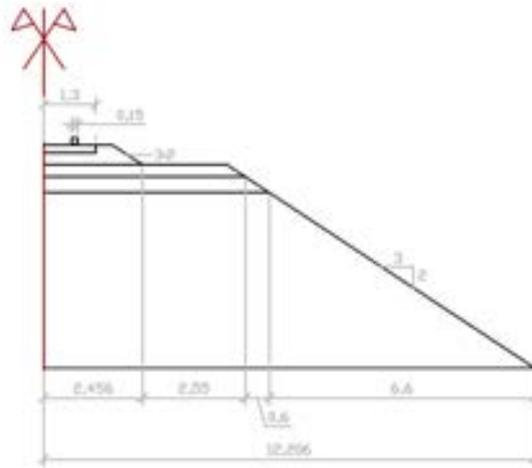


Figura 4.2.5 Dimensiones en el eje X del modelo de obra de fábrica enterrada profunda y estructuras a rasante ($H=2,4$ m). Fuente: Elaboración propia.

En lo que respecta al valor del talud para el terraplén, según la bibliografía consultada, este valor oscila en función del material que constituye el mismo, alcanzando habitualmente valores entre $H/V= 3/2$ y $H/V= 2/1$. De esta forma, para el modelo aquí propuesto se ha optado por tomar el valor de la pendiente igual a $3:2$, debido a que dicho valor corresponde al más desfavorable de los valores frecuentemente utilizados en la vía que se pretende analizar.

➤ Eje Y (vertical)

En la dirección vertical del modelo, correspondiente al eje Y se han considerado los espesores de los distintos elementos que conforman la vía tales como el carril, placa de asiento, traviesa, balasto, subbalasto, capa de forma y terraplén hasta cota de cimiento. En el modelo se dispone un mínimo de una capa de elementos por cada clase de material, estableciendo mayor número de capas de elementos en aquellos materiales cuyas deformaciones plásticas son mayores.

Concretamente, los espesores de cada una de las capas que conforman la vía son de 30 centímetros para el balasto y subbalasto, 40 cm para la capa de forma, siendo la altura del terraplén variable, en función del caso de estudio que se analiza, variando desde los 2,4 metros hasta los 4,4 metros en el mayor de los casos. Dichos espesores de terraplén proporcionan una precisión suficiente para los cálculos que se deben realizar, tal y como se cita en las "Recomendaciones para el Proyecto de

Plataformas Ferroviarias” elaborado por el Ministerio de Fomento en el año 1999, demostrado mediante un análisis de sensibilidad en dicho documento.

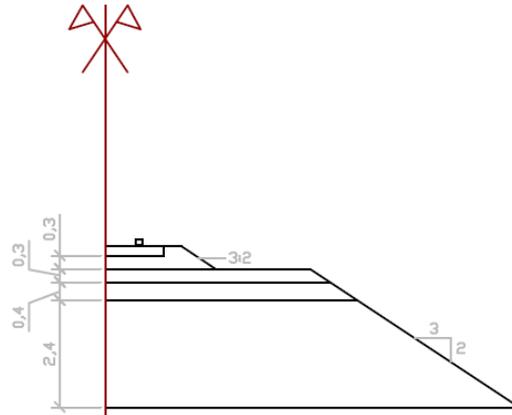


Figura 4.2.6 Dimensiones en el eje Y del modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=0,4 m). Fuente: Elaboración propia.

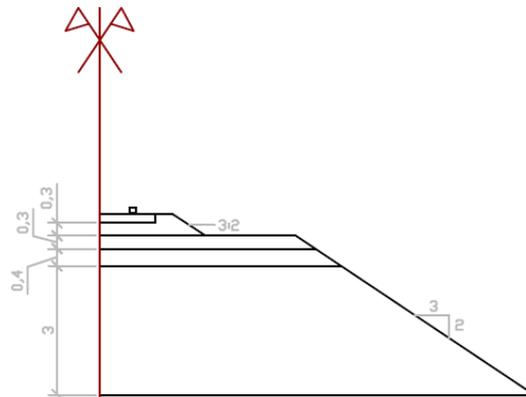


Figura 4.2.7 Dimensiones en el eje Y del modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m). Fuente: Elaboración propia.

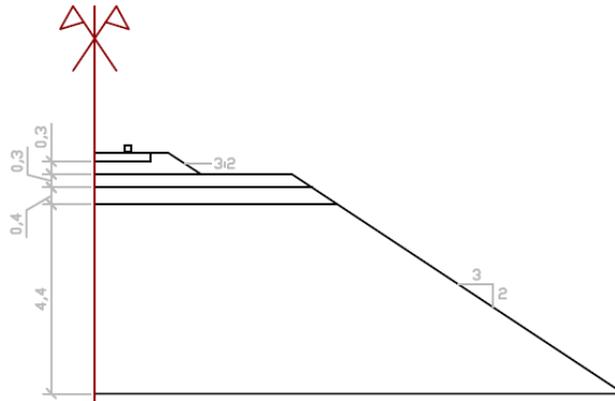


Figura 4.2.8 Dimensiones en el eje Y del modelo de obra de fábrica enterrada profunda y estructuras a rasante (H=2,4 m). Fuente: Elaboración propia.

➤ Eje Z (longitudinal)

La longitud del modelo considerado viene definida en función de las cuñas que se desean representar. Además de esta condición, hay que tener en consideración que la zona de influencia considerada en sentido longitudinal corresponde a unas 4 traviesas a cada lado del punto de aplicación de la carga considerada, debido a que la transmisión de la carga se atenúa rápidamente en las 3 traviesas, siendo del 7% adyacentes a la considerada, no siendo significativo el efecto más allá de las traviesas citadas anteriormente ([82] y Comité ORE D-117, Rapport n°28, 1983).

Por lo tanto, la longitud total del modelo queda delimitada por la longitud de las cuñas de transición que se desean representar en cada caso, más la longitud de 5 traviesas al inicio del modelo, y otras 5 traviesas al final del mismo, que permiten de forma adecuada tener en consideración la zona de influencia de las cargas aplicadas en los puntos más cercanos a estos contornos laterales. La separación entre ejes de traviesas se ha considerado de 60 cm. Así pues, dadas las características de las cuñas que se pretenden analizar se obtienen dos modelos, uno para el caso "Obra de fábrica enterrada profunda (H=2.4 m)", con longitud de 17,07 metros puesto que la longitud de cuña granular necesario para este caso es más corta; y otro de 27,87 metros para el resto de los casos estudiados, tal y como se observa a continuación:

Modelo longitud 17,07 m

Figura 4.2.9. Dimensiones en el eje Z del modelo de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m). Fuente: Elaboración propia.

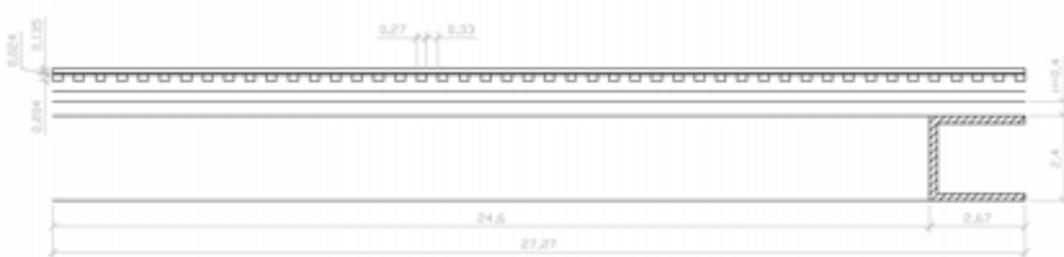
Modelos longitud 27,87 m

Figura 4.2.10 Dimensiones en el eje Z del modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=0,4 m). Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.2.11 Dimensiones en el eje Z del modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m). Fuente: Elaboración propia.

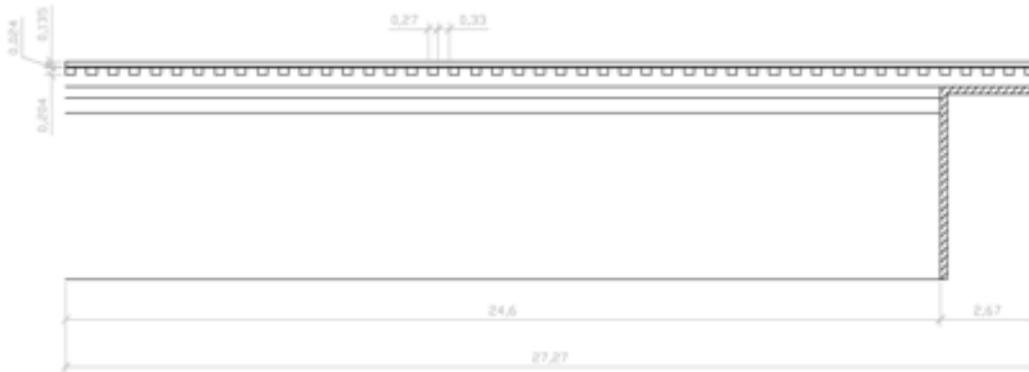


Figura 4.2.12 Dimensiones en el eje Z del modelo de estructuras a rasante ($H=2,4$ m). Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.1 Condiciones de contorno

Para determinar las condiciones de contorno que deben aplicarse al modelo, se han tomado como referencia aquéllas que han sido consideradas en los modelos numéricos del Comité O.R.E. D-171 y las recogidas en las Recomendaciones realizadas por el Ministerio de Fomento (1999).

En concreto, las condiciones de contorno establecidas son las siguientes: las restricciones de los desplazamientos en sentido perpendicular a los planos que definen los límites laterales del modelo, bien como, naturalmente, en los planos de simetría. En la base inferior del modelo están coartados todos los desplazamientos verticales, asumiendo como es habitual en este tipo de modelos, que el sistema asienta en un terreno que no se mueve.

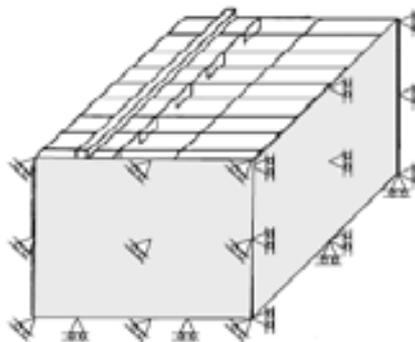


Figura 4.2.13 Condiciones de contorno empleadas en el modelo llevado a cabo por el Comité ORE D-117.

En cuanto a la obra de drenaje a la cual se accede desde el terraplén, en las zonas de contacto, es decir, la pared lateral y la superior, se ha considerado que los puntos en contacto tienen igualdad en los desplazamientos perpendiculares al plano de contacto, mientras que el resto de los desplazamientos se desvinculan, permitiendo que cada nodo tenga un propio desplazamiento transversal. Por otro lado, en el caso del estribo se han considerado desplazamientos perpendiculares nulos al contorno del estribo, puesto que se ha considerado este indeformable en comparación con el resto de los elementos del modelo, con el fin de que el modelo proporcione una simulación satisfactoria.

4.2.1.2 Elementos de cálculo empleados

Para llevar a cabo el cálculo numérico es necesario realizar la discretización del modelo propuesto. Para ello, se han tenido en cuenta las particularidades de la vía férrea, así como la experiencia en información recogida en la construcción de los modelos de elementos finitos teniendo como base prioritaria las consideraciones recogidas en el modelo realizado por el O.R.E y en las Recomendaciones realizadas por el Ministerio de Fomento (1999).

El elemento tridimensional de referencia, comúnmente aceptado para gran parte de trabajos estructurales realizados hasta el momento, es el tetraedro de cuatro nudos (pirámide de base triangular). En este caso, las funciones de interpolación sobre el elemento son lineales y, consecuentemente, los esfuerzos y deformaciones son constantes. Otros elementos usuales son el hexaedro de ocho nodos o el pentaedro de seis nudos: las funciones de interpolación son en este caso trilineales en base incompleta. Por último, unos elementos de mayor precisión son los tetraedros de diez nodos o los hexaedros de 27 nodos, cuyas funciones de interpolación son cuadráticas incompletas.

Para obtener una buena representación de la estructura de la vía, se deben descartar los elementos con función de interpolación lineal (tetraedro) y, si es posible, evitar los elementos con funciones de interpolación bilineales o trilineales. Los elementos cuadráticos son naturalmente los más adecuados, siendo el hexaedro de veinte nudos el elemento más aconsejable en el caso de una modelización tridimensional de estructuras de suelo, conduciendo a resultados muy satisfactorios a coste de cálculo razonable, según especifican algunos autores como Prat et al. (1995) en sus estudios.

Los elementos “brick” de 8 nodos, reducirían tiempo de cálculo en el modelo, pero no se han seleccionado en esta tesis ya que la experiencia ha puesto de manifiesto que no poseen una respuesta aceptable cuando intervienen mecanismos de flexión. Sin embargo, no sucede lo mismo para el caso de elementos con 20 nodos. Este elemento se ajusta muy bien al comportamiento de los materiales del sistema ferroviario, debido a que puede reflejar el comportamiento tanto a compresión como a tracción de elementos como el hormigón, balasto, etc.

Por todo ello, en este modelo se han usado los elementos SOLID95, formados por hexaedros de 20 nodos, que se ajustan correctamente al cálculo que se pretende realizar.

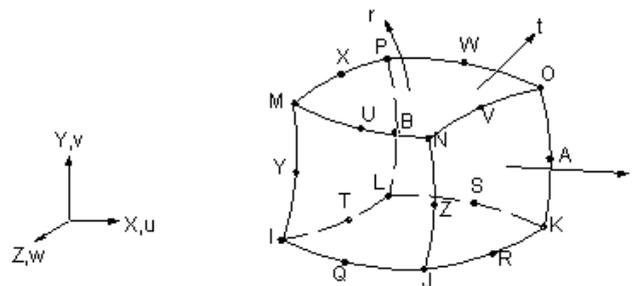


Figura 4.2.14 Esquema de SOLID95. Fuente: ANSYS.

4.2.1.3 Aplicación de la carga

Al hablar de la aplicación de la carga, puesto que se van a modelar materiales con un comportamiento no-lineal, es necesario que la aplicación de las cargas se efectúe en varias etapas. En una primera etapa se considera tan solo el peso propio de los materiales hasta alcanzarse el equilibrio de tensiones, mientras que en las etapas posteriores además se consideran las cargas debidas al tren. Las tensiones y desplazamientos que interesan obtener son los correspondientes únicamente a la aplicación de las cargas del tren, ya que este estado de carga es el que determina el dimensionamiento de la infraestructura. Por lo tanto, el estado de carga que necesitamos conocer se obtiene por diferencia entre los totales, después de aplicar la gravedad junto a la carga del tren, y los valores correspondientes a la primera etapa (solo gravedad).

Para este caso concreto de estudio, la carga utilizada de referencia es de 85 KN, fuerza que representa a la carga aplicada por cada rueda acoplada al eje más

cargado de un vehículo ferroviario de pasajeros de alta velocidad, correspondiente a 17 toneladas, siendo esta carga aplicada representativa de los ejes que circularán por la línea que se intenta modelizar.

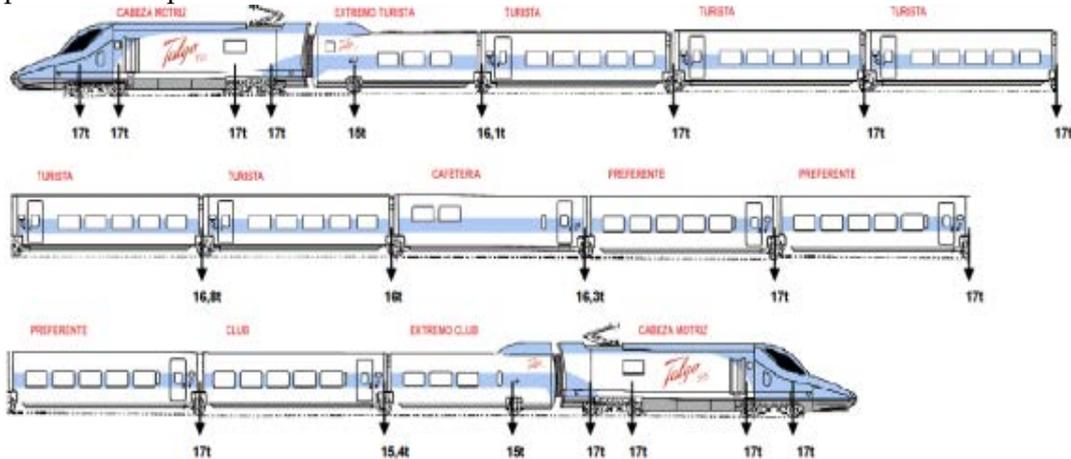


Figura 4.2.15 Esquema de AVE 102. TALGO/BOMBARDIER. Fuente: [5].

La aplicación de la carga en el modelo se puede realizar de forma estática o dinámica. Esta última se realiza introduciendo una carga constante moviéndose a lo largo de la vía con una velocidad definida, introduciendo un análisis dinámico (un transitorio). El procedimiento más directo y sencillo para modelar el tránsito de una carga puntual a lo largo de una estructura es aquel para el cual se utilizan los denominados “escalones” de carga. Para definir correctamente cada una de estas fases se deben localizar los nodos que se encuentran a lo largo de la trayectoria que recorre la carga, definiendo un tiempo de referencia t_0 , origen del movimiento, determinar los sucesivos tiempos de llegada de la carga a cada uno de los nodos y en función de la velocidad de la carga v , de los tiempos de llegada a los nodos y de la distancia entre los nodos, definir los escalones de carga correspondientes a cada nodo.

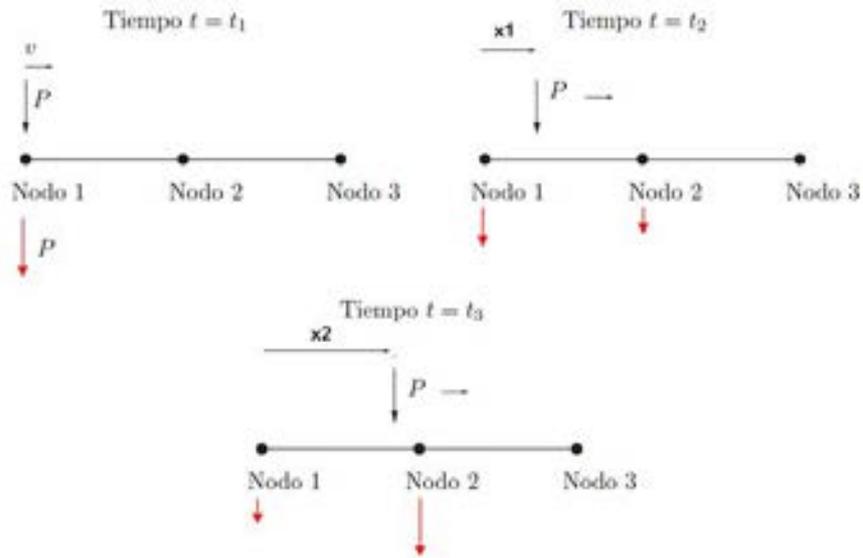


Figura 4.2.16 Esquema de aplicación de una carga móvil, para la realización del análisis dinámico. Fuente: Elaboración propia

En el fondo, se trata de asociar a cada nodo, para un instante dado en la sollicitación, la carga puntual que se le aplica, bien sea porque actúan sobre él o porque se encuentren entre dos nodos, y se le aplique una parte proporcional a cada uno de ellos.

Para desplazar la carga se ha desarrollado un algoritmo implementado en ANSYS. Puesto que el programa de cálculo sólo permite la aplicación de las cargas en aquellos puntos donde están definidos nodos, y para evitar que la carga solamente se aplique en estos puntos, se ha realizado la programación de tal forma que mediante las ecuaciones de equilibrio aplicadas en cada instante se distribuye la carga aplicada por el vehículo ferroviario a los dos nodos contiguos más próximos. De esta forma, la carga puede desplazarse a lo largo del tramo de estudio, obteniéndose las fuerzas resultantes a aplicar en cada instante mediante el equilibrio de fuerzas verticales, dado un incremento de tiempo determinado, que es función de la velocidad a la que se desplaza la carga.

La utilización de este tipo de análisis incrementa el tiempo de cálculo de forma exponencial, por lo que el gran número de modelos distintos a analizar en esta tesis hizo inviable la posibilidad de usarlos. Es por esto que se optó por la

aplicación de diversas cargas estáticas en unos determinados puntos característicos del modelo a lo largo del eje de la vía.

Así pues, considerando la geometría de las cuñas, se ha considerado oportuno realizar un número de casos de carga distribuidos convenientemente tal que del estudio de los mismos se pueda obtener una información relevante del comportamiento global del modelo. Estos puntos de aplicación, tal y como se muestran a continuación, están localizados a lo largo de las cuñas, de forma que se aprecien los cambios de rigidez, y en las inmediaciones del inicio y final de estos mismos elementos.

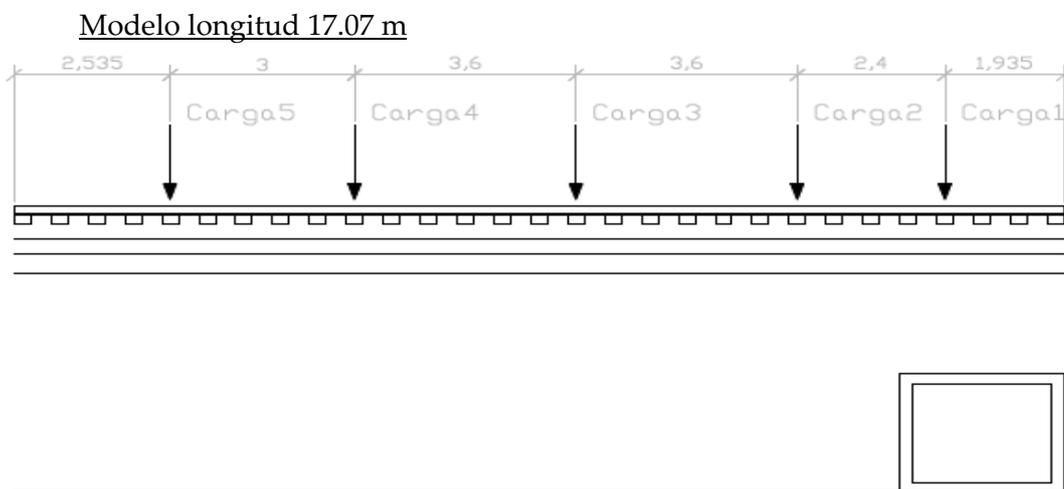


Figura 4.2.17 Localización de las cargas en el modelo de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m). Fuente: Elaboración propia.

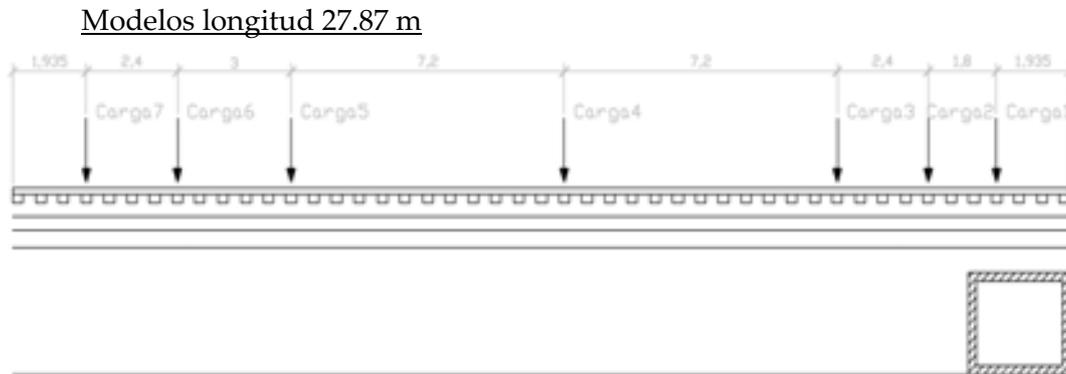


Figura 4.2.18 Localización de las cargas en el modelo de obra de fábrica enterrada superficial ($H=0,4$ m), semi-profunda ($H=1$ m) y estructura a rasante ($H=2,4$ m). Fuente: Elaboración propia.

Mediante la comparación de las deformaciones que se producen en los diferentes puntos de aplicación de la carga, para cada caso de estudio, se pretende comparar cómo se produce la variación de rigidez de la vía, teniendo en cuenta las particularidades de cada modelo realizado. Mediante esta comparación se pretenden observar las diferencias de comportamiento de cada prototipo, y para cada caso de estudio, permitiendo confrontar las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos, tras el tratamiento adecuado de la gran cantidad de datos generada tras el cálculo de todos los casos de carga planteados.

4.2.1.4 Modelos constitutivos de los materiales

Durante las últimas décadas de investigación, los modelos constitutivos de los materiales han buscado mejorar la respuesta que proporcionan, con el fin de representar fielmente el comportamiento de los mismos en la realidad. Actualmente existen una gran variedad de modelos constitutivos disponibles que van desde los más sencillos, de tipo elástico lineal, a los más complejos, tales como los elastoplásticos [83].

Todos estos modelos constitutivos, normalmente, están disponibles en la gran mayoría de los programas comerciales de elementos finitos que existen actualmente en el mercado, siendo sus parámetros fáciles de determinar a partir de ensayos sencillos de laboratorio o en campo. En el caso del carril, placa de asiento,

travesía, y el hormigón de la obra de fábrica se han usado modelos de comportamiento elástico lineal.

Adicionalmente a estos, el material granular tratado con cemento también se rige por un comportamiento elástico lineal, siguiendo las recomendaciones recogidas en el “Manual de firmes de capas tratadas con cemento”, del Ministerio de Fomento (2003), en el cual se determina que este tipo de material posee un comportamiento elástico marcadamente lineal, manteniéndose esta elasticidad al menos hasta alcanzar un rango cercano a la tensión de rotura, pudiéndose considerar, por lo tanto, el módulo de elasticidad prácticamente constante para el nivel de carga aplicado.

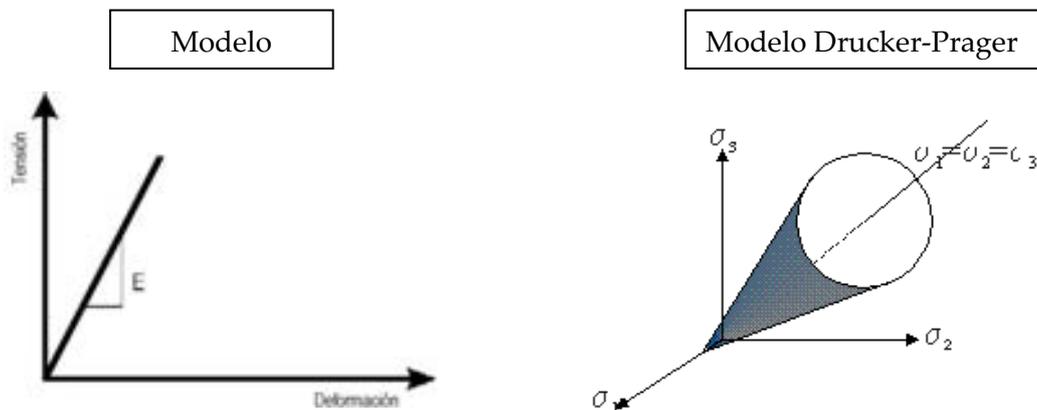


Figura 4.2.19 Modelos constitutivos empleados en el estudio. Lineal y Drucker-Prager. Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, los materiales que forman las capas de material granular, tales como el balasto, subbalasto, capa de forma y el terraplén (en sus distintas posibilidades de calidad), poseen un comportamiento elastoplástico, con un criterio de plastificación definido mediante una superficie de fluencia de Drucker-Prager, teniendo en consideración para su determinación tanto la cohesión como el ángulo de rozamiento del material en cuestión. Hay que destacar que los modelos más sencillos y más frecuentemente empleados en materiales elastoplásticos son, entre otros, los conocidos como Von Mises, Tresca, Drucker-Prager y Mohr-Coulomb.

Para los materiales que se pretende analizar en este caso y cuyo comportamiento depende fundamentalmente de la presión de confinamiento a la

que se ve sometido el material, hay que usar modelos que consideren este hecho. De esta forma, los modelos constitutivos que tienen en cuenta estos condicionantes son los de Drucker-Prager y Mohr-Coulomb, para los que se establece una limitación del comportamiento del material para estados de tensión hidrostática de tracción debido a que los suelos, generalmente, no son capaces de resistir tracciones.

Dicho esto, el modelo de cálculo utilizado para los materiales elastoplásticos ha sido el de Drucker-Prager, puesto que este modelo ya ha sido el escogido en varios de los modelos elastoplásticos realizados para plataformas ferroviarias realizados anteriormente, siendo además validado por el Comité O.R.E D-171 y proporcionando las características y ventajas anteriormente citadas.

4.2.1.5 Características mecánicas de los materiales

Para realizar el cálculo numérico en ANSYS se hace necesario introducir el valor numérico de las características mecánicas de los diferentes elementos que forman el conjunto superestructura e infraestructura ferroviaria. Para los materiales granulares tales como el balasto, el subbalasto y el material tratado con cemento se han adoptado los valores recogidos en las prescripciones ferroviarias de RENFE, prescripciones como el PG3, y recogidos en la mayoría de los estudios realizados hasta al momento, que se muestran en la tabla siguiente.

Por otro lado, el valor numérico de las características mecánicas del carril, placa de asiento y traviesa ha sido obtenido a través de los correspondientes fabricantes de cada uno de los elementos, teniendo en cuenta que los valores adoptados para la placa de asiento y la traviesa dividida en tres elementos se han modificado convenientemente, tal y como se ha describirá posteriormente.

Material	E (N/m ²)	v	c (N/m ²)	φ (°)	q (N/m ³)
Acero carriles	2.1×10^{11}	0,3	-	-	7.5×10^4
Placa elástica	2.952×10^8	0,45	-	-	2×10^4
Traviesa elemento 1	8.01×10^{10}	0,25	-	-	$2,4 \times 10^4$
Traviesa elemento 2	5.02×10^{10}	0,25	-	-	$2,4 \times 10^4$

Traviesa elemento 3	$3,68 \times 10^{10}$	0,25	-	-	$2,4 \times 10^4$
Balasto	1.3×10^8	0,2	0	45	1.9×10^4
Subbalasto	1.2×10^8	0,3	0	35	1.9×10^4
Capa de forma	8×10^7	0,3	0	35	2×10^4
Terraplén	2.5×10^7	0,3	10000	20	2×10^4
Material granular tratado	1.6×10^8	0,25	-	-	2.3×10^4
Material QS3	8×10^7	0,3	0	35	2×10^4

Tabla 4.2.1 Características de los materiales utilizados. Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.6 Modelización de los diferentes elementos

➤ **Carril**

Para conseguir una respuesta lo más real en cuanto a la modelización del carril, el objetivo principal es representar lo más fielmente posible su resistencia a flexión, mediante elementos paralelepípedos. El carril estudiado es un carril Vignole modelo UIC-60, de 60 kg por metro lineal, con una anchura de cabeza igual a 72 mm, una anchura de patín igual a 150 mm y una altura de 172 mm.

Este carril se modela mediante un paralelepípedo. Para conseguir representar la respuesta real del carril, se adoptan las anchuras del patín correspondientes al carril real, es decir, de 150 mm, siendo la altura definida de tal forma que el momento de inercia respecto del eje horizontal resulte idéntico, en este caso de 135 mm, con el fin de obtener la misma respuesta a flexión que la experimentada en el carril original.

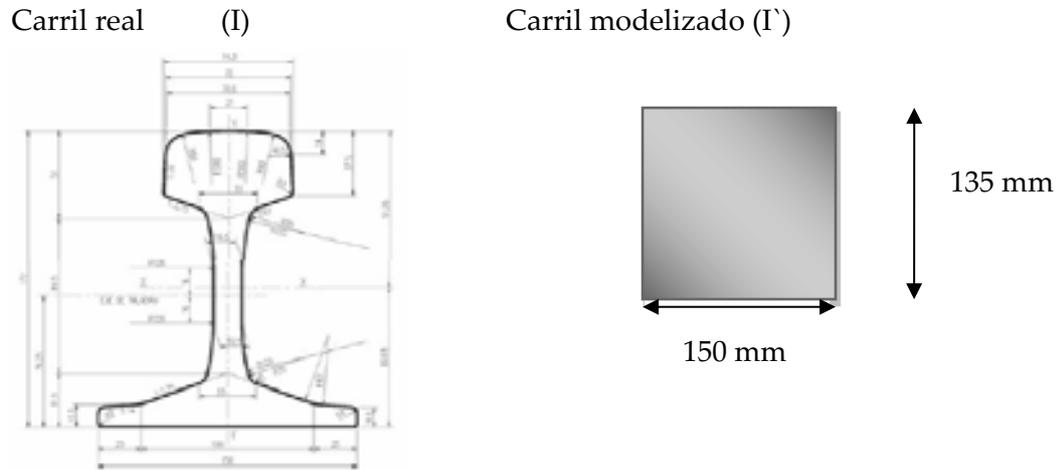


Figura 4.2.20 Carril Vignole UIC-60, existente en la vía y esquema de modelización en ANSYS. Fuente: Elaboración propia.

➤ Placas de asiento

Por lo que respecta a las dimensiones en planta de las placas de asiento elásticas situadas bajo los carriles, se suele tener en consideración que el ancho de las mismas es coincidente con el del patín del carril y el ancho de la traviesa sobre la que descansa. De esta forma, la placa de asiento posee unas dimensiones de 150 x 270 mm, mientras que la dimensión vertical de las mismas y el módulo de elasticidad vienen fijados de manera que la rigidez vertical del elemento coincida con la rigidez de la placa de asiento real.

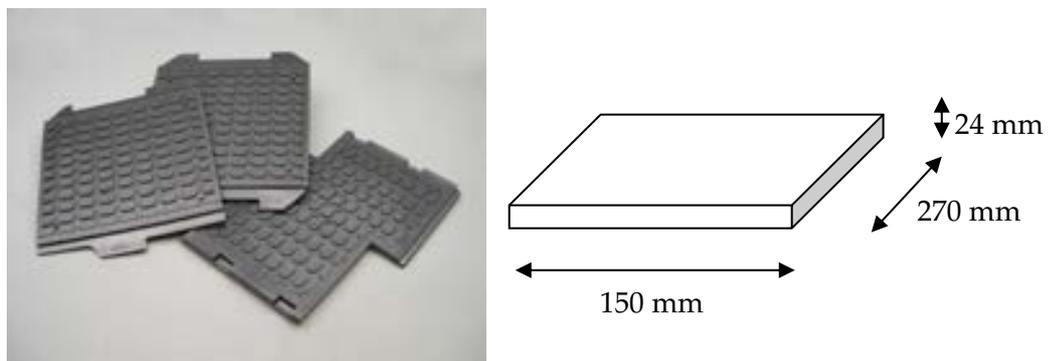


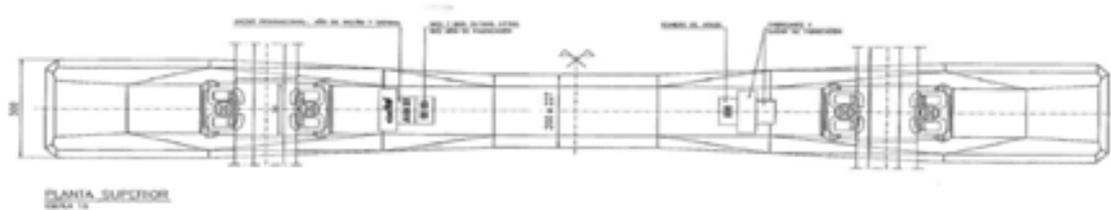
Figura 4.2.21 Dimensiones placa de asiento en el modelo. Fuente: Elaboración propia.

Hay que destacar que el espesor de la placa modelada es de 24 mm, frente a los 6 mm de la placa real. Esta desigualdad se debe fundamentalmente a las limitaciones que el modelo de elementos finitos tiene asociadas a la hora de modelar dominio. Para analizar correctamente el modelo hay que mantener, en la medida de lo posible, una uniformidad en las dimensiones de los elementos que lo conforman, sobre todo entre elementos en contacto. Puesto que las dimensiones totales de análisis son considerables, debe evitarse introducir elementos con proporciones muy reducidas. Por ello, el espesor de la placa se ha aumentado hasta los 24 mm, modificando el módulo de elasticidad convenientemente, mediante la fórmula de la rigidez a axil, proporcionando un comportamiento igual al de la placa real.

➤ **Traviesas**

Las Recomendaciones para el proyecto de plataformas ferroviarias elaboradas por el Ministerio de Fomento (1999) plantean que, puesto que la sección de la traviesa no es constante en toda su longitud, se adopten, para los distintos elementos que la representan, las dimensiones de su sección más representativa. Ahora bien, en las zonas en las que corresponda, se deben efectuar ajustes del módulo de elasticidad de cada uno de estos elementos, de manera que la rigidez a flexión del elemento sea aproximadamente igual a la rigidez a flexión de la traviesa en dicha zona. Para esta tesis, las traviesas que se han escogido son traviesa tipo AI-89.

Para la modelización de dichas traviesas y teniendo en consideración las recomendaciones del Ministerio de Fomento, se ha dividido la traviesa real en tres elementos fundamentales que la representan en su totalidad, puesto que la sección transversal de la misma varía a lo largo de su longitud.



Traviesa tipo AI-89

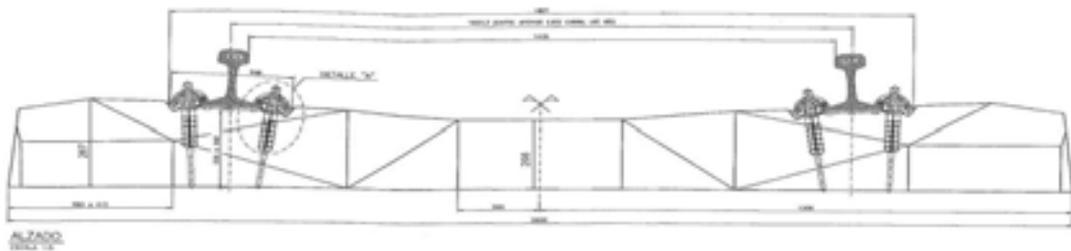


Figura 4.2.22 Dimensiones traviesa real tipo AI-89. Fuente: [84]

Las dimensiones para cada uno de estos tres elementos representativos de la geometría compleja en los que se descompone la traviesa real se obtienen mediante la interpolación de sus dimensiones reales, de tal forma que se obtienen 3 paralelepípedos que representan la traviesa real, calculándose las inercias de cada uno de ellos.

Esquema traviesa real

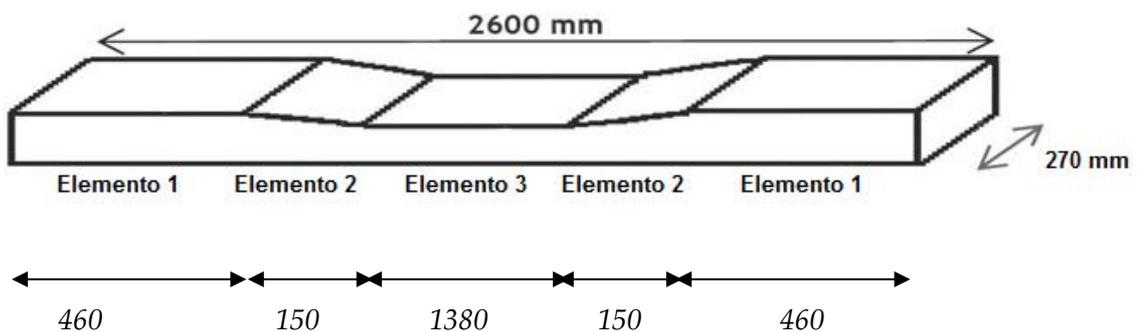


Figura 4.2.23 Esquema traviesa real tipo AI-89. Fuente: Elaboración propia.

	Traviesa real			Traviesa modelada		
	Elemento 1	Elemento 2	Elemento 3	Elemento 1	Elemento 2	Elemento 3
E (Kg/cm²)	5,00E+05	5,00E+05	5,00E+05	7,98E+05	5,00E+05	3,66E+05
I (cm⁴)	30170	18900	13830	18900	18900	18900
E*I (Kg*cm²)	1,51E+10	9,45E+09	6,92E+09	1,51E+10	9,45E+09	6,92E+09

Tabla 4.2.2 Valores adoptados para el modelo de traviesa. Fuente: Elaboración propia

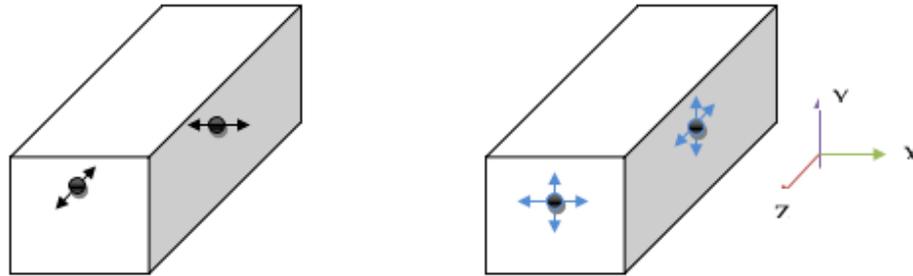
➤ **Contacto traviesa-balasto**

Para obtener unos buenos resultados, hay que considerar que en las zonas de contacto traviesa-balasto se produce una alta concentración de las deformaciones. Esta concentración de las deformaciones hace necesario el refinado del mallado en aquellas zonas donde se origina. Sumado a esto, el problema se agrava puesto que el tamaño de los granos del balasto es comparable al tamaño de la traviesa, por lo que las hipótesis en las que se basa el método de los elementos finitos pierden en cierta medida validez. Sin embargo, hay algunos casos en los que no es posible aplicar esta medida, aumentando la complejidad del modelo. Una posible alternativa, recogida en las recomendaciones del Ministerio de Fomento y adoptada por la UIC, para diseñar las zonas de contacto, consiste en el uso de grados de libertad ligados.

El uso de grados de libertad ligados necesita introducir nodos diferentes para cada material, en la superficie de contacto que los separa. A estos nodos, asociados cada uno de ellos a uno de los dos materiales en contacto respectivamente, se les obliga a experimentar el mismo desplazamiento en la dirección perpendicular al plano de contacto. De esta forma se resuelve de forma satisfactoria las discontinuidades tensionales que aparecen en la interfase entre dos materiales con diferencias significativas de rigidez.

Concretamente, las paredes verticales y horizontales de las traviesas en contacto con el balasto tienen vinculado el mismo desplazamiento en la dirección perpendicular al plano de dichas paredes, pudiendo existir un desplazamiento

relativo entre las otras dos direcciones, perpendiculares a la citada y contenidas en los planos que conforman las paredes.



Movimientos ligados

Movimientos desligados

Figura 4.2.24 Contactos traviesa-balasto en paredes laterales. Fuente: Elaboración propia.

➤ **Capas granulares**

Para la geometría de la capa de balasto, subbalasto, material granular (sea cual sea su calidad) y material granular tratado no existen simplificaciones en cuanto a la geometría y dimensiones de los mismos, teniendo en cuenta las simplificaciones realizadas por simetría. En el caso de las cuñas granulares, y debido a las condiciones del mallado, las transiciones entre materiales se realizan de forma escalonada. Este hecho condiciona también la modelación de los prototipos propuestos, cuya pendiente longitudinal en el eje de la vía también será escalonada.

➤ **Contacto material granular-elementos de hormigón**

Dado que en nuestros modelos existen diversos contactos entre dos materiales tan distintos como un material granular y los diferentes elementos de hormigón (sea la obra de drenaje o las propias cuñas prefabricadas de hormigón), siguiendo diferentes recomendaciones al respecto, se decidió crear un contacto entre estas superficies igual al creado entre traviesa y balasto. De esta forma se resuelve de forma satisfactoria las discontinuidades tensionales que aparecen en la interfase entre dos materiales con diferencias significativas de rigidez.

4.2.1.7 Creación del modelo

Para introducir la geometría en ANSYS, se ha creado una sección transversal plana a partir de puntos (keypoints), líneas y áreas. Después, dicha sección se ha

ido extruyendo en la dimensión longitudinal de la vía, generándose de este modo los volúmenes correspondientes que forman el modelo completo.

Tras la generación de los volúmenes, se aplica al modelo la fusión de puntos, uniendo aquellos cuyas coordenadas están dentro de una cierta tolerancia definida, teniendo en cuenta que en las zonas de contacto (travesía-balasto, material granular-obra de drenaje, material granular-cuña prefabricada) deben existir nodos duplicados con el fin de permitir aplicar las restricciones anteriormente citadas.

Tras esta operación se realiza el mallado completo, siendo en este caso igual el número de volúmenes y el de elementos, puesto que cada volumen está formado por un único elemento, estando listo el modelo para el cálculo numérico a falta de aplicar las condiciones de contorno y las cargas.

4.2.2 Modelos planteados

4.2.2.1 Consideraciones previas

A lo largo del desarrollo de esta tesis han surgido una serie de problemas e inconvenientes que se han debido superar para completar el estudio. Inicialmente, los modelos planteados para las cuñas de transición disponían de 3 metros bajo el terraplén convencional. El principal problema existente en estos modelos se centra alrededor del estado tensional que provoca la gravedad en el material del cimiento, conformado por estos 3 metros iniciales, puesto que la aplicación de la gravedad lleva al terreno a un estado de tensiones elevado, tal que la aplicación de la carga no produce un valor de la deformación tan elevado como la que se desarrolla cuando el suelo posee un nivel tenso-deformacional menos importante. Sumado a esto, puesto que en los estribos la rigidez es muy elevada respecto al valor alcanzado en el terraplén, no se permite descender a la vía lo suficiente como para adaptarse a la deformación experimentada por el resto de la vía sobre un terreno mucho más blando, teniendo en consideración que el balasto está pegado al resto del modelo, por lo que tiende a “colgar” el resto del modelo calculado respecto a esta zona.

Por otro lado, a la vista de los resultados obtenidos en los cálculos realizados para los modelos con un cimiento igual a 3 metros, puede pensarse que la presencia de la obra de drenaje alojada en el cuerpo del terraplén, dado que el peso que

gravita sobre los materiales bajo la misma es sustancialmente menor, estos no están sometidos a un estado tensional tan elevado, pudiéndose deformar más que los que se encuentran cercanos y que soportan el peso de todo el material situado por encima de ellos, obteniendo resultados tal como se muestran a continuación.

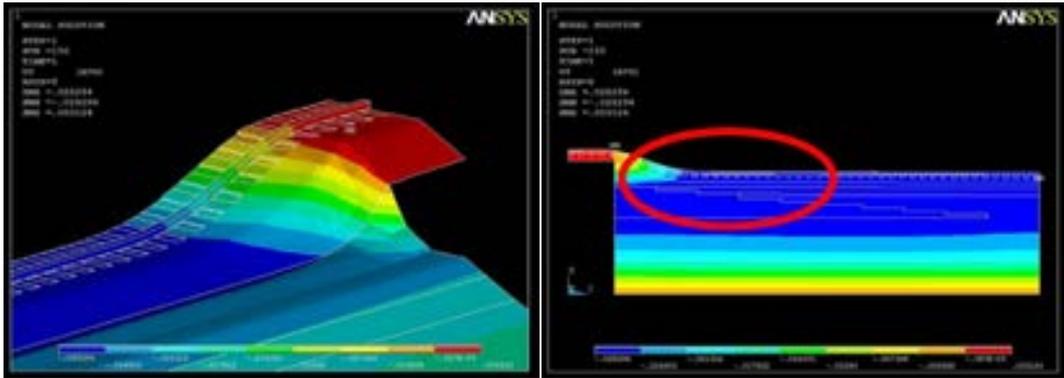
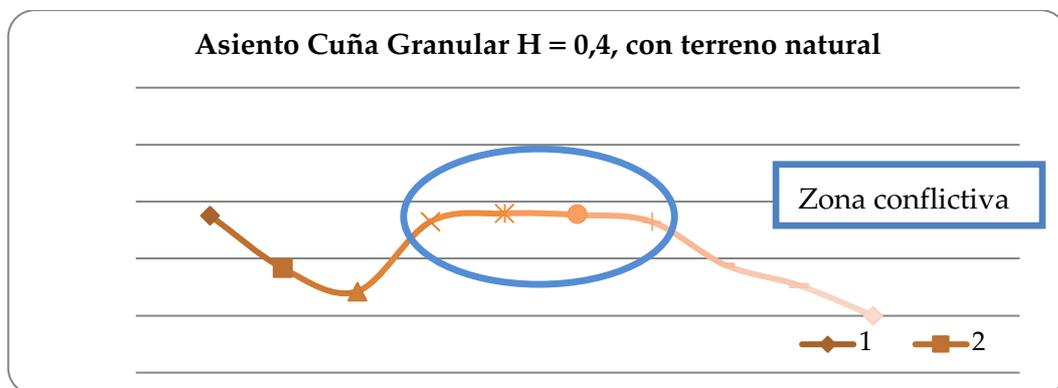


Figura 4.2.25 Diferencia de deformaciones experimentada en las inmediaciones del estribo. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4.2.1 Zona de asientos influenciada por el estado tenso-deformacional. Fuente: Elaboración propia.

Tras la observación de estos problemas aparecidos en los modelos con 3 metros de cimienta se ha considerado conveniente eliminar este material, colocando las condiciones de contorno bajo la base del terraplén.

En otro sentido, respecto a los modelos iniciales compuestos por 46 y 28 traviesas se ha decidido aumentar una traviesa más, llegando a las 47 y 29 traviesas, en cada caso, con el fin de asegurar que las condiciones de contorno no influyen

de forma significativa los cálculos obtenidos cuando la carga se sitúa en las proximidades de los mismos, evitando de esta forma que los resultados calculados se vean influenciados por las condiciones impuestas en los extremos del modelo planteado.

4.2.2.2 Modelización de prototipos

Como se ha comentado anteriormente, una vez tenemos el modelo creado modelaremos los prototipos planteados para testear cuales son los más óptimos.

Los prototipos que se han planteado se pueden modelar por separado, pero el gran número de casos en los que se incurriría sería demasiado elevado para poder ser calculado y analizado en el tiempo disponible. Es por este motivo por el que se agruparan los diversos modelos en tres grupos de modelización posible siguiendo el esquema siguiente:

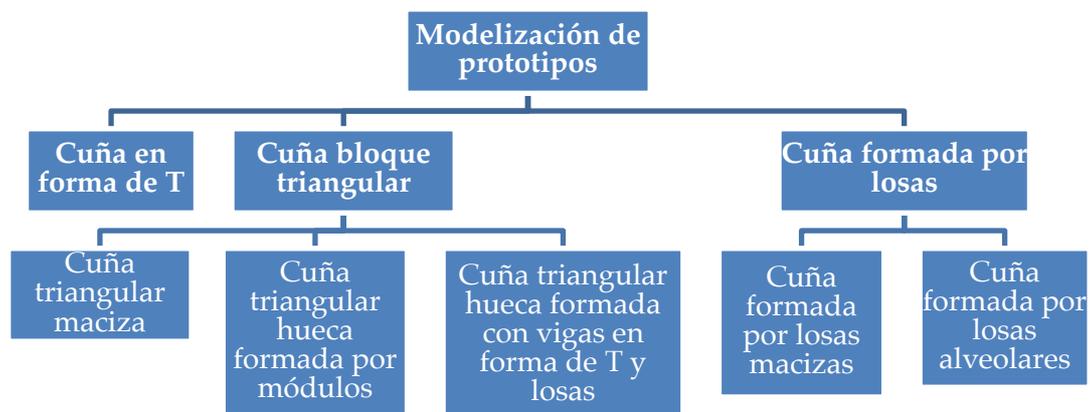


Figura 4.2.26 Organigrama de los grupos de modelización de los prototipos planteados. Fuente: Elaboración propia

Los siguientes modelos muestran un ejemplo de modelización de estos grupos que engloban los diversos prototipos:

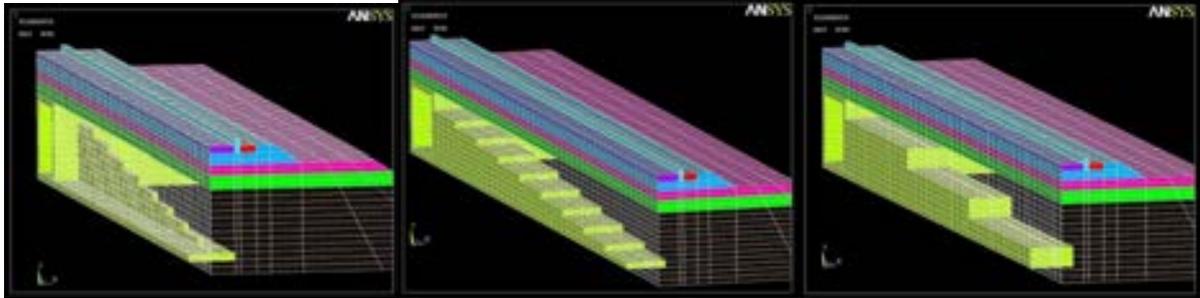


Figura 4.2.27 Modelos de cuñas pertenecientes a los diferentes grupos de modelización. Fuente: Elaboración propia

En el caso de estructura a rasante, más comúnmente conocida como estribo, se ha determinado necesario desde un principio que la cuña debía ser pilotada para que funcionase como transición de rigidez. Estos pilotes no han sido dimensionados, simplemente tienen la utilidad de restringir el movimiento vertical de la cuña para asegurar su funcionalidad como transición de rigidez. El dimensionamiento de dichos pilotes se realizará posteriormente a la selección del mejor prototipo.

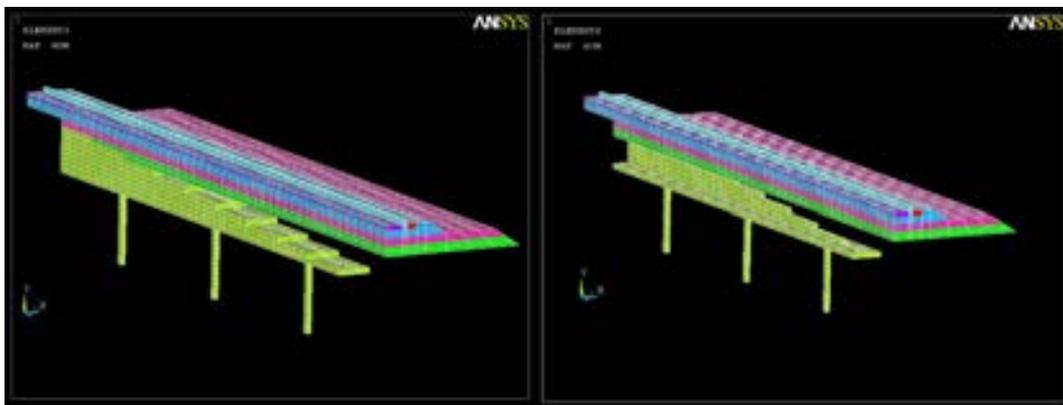
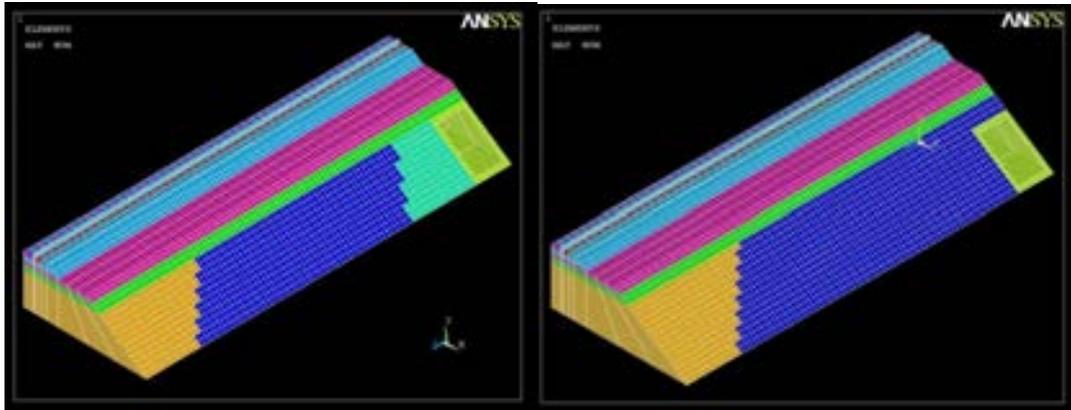


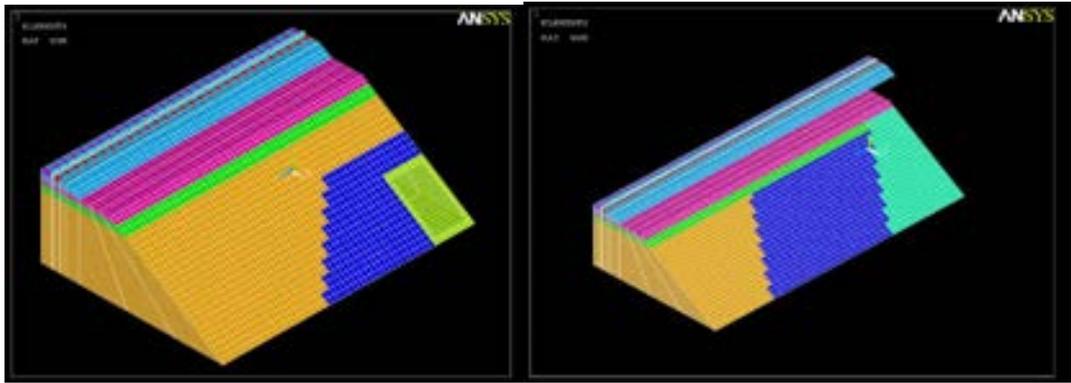
Figura 4.2.28 Modelos de cuñas pilotadas para el caso de estructura a rasante. Fuente: Elaboración propia

Además de realizar los modelos planteados en los diferentes casos que expone ADIF, se han creado unos modelos de cuña granular conforme a las indicaciones de ADIF con los que poder comparar los prototipos de cuñas prefabricadas de hormigón.



H=0,4 m

b) H=1 m

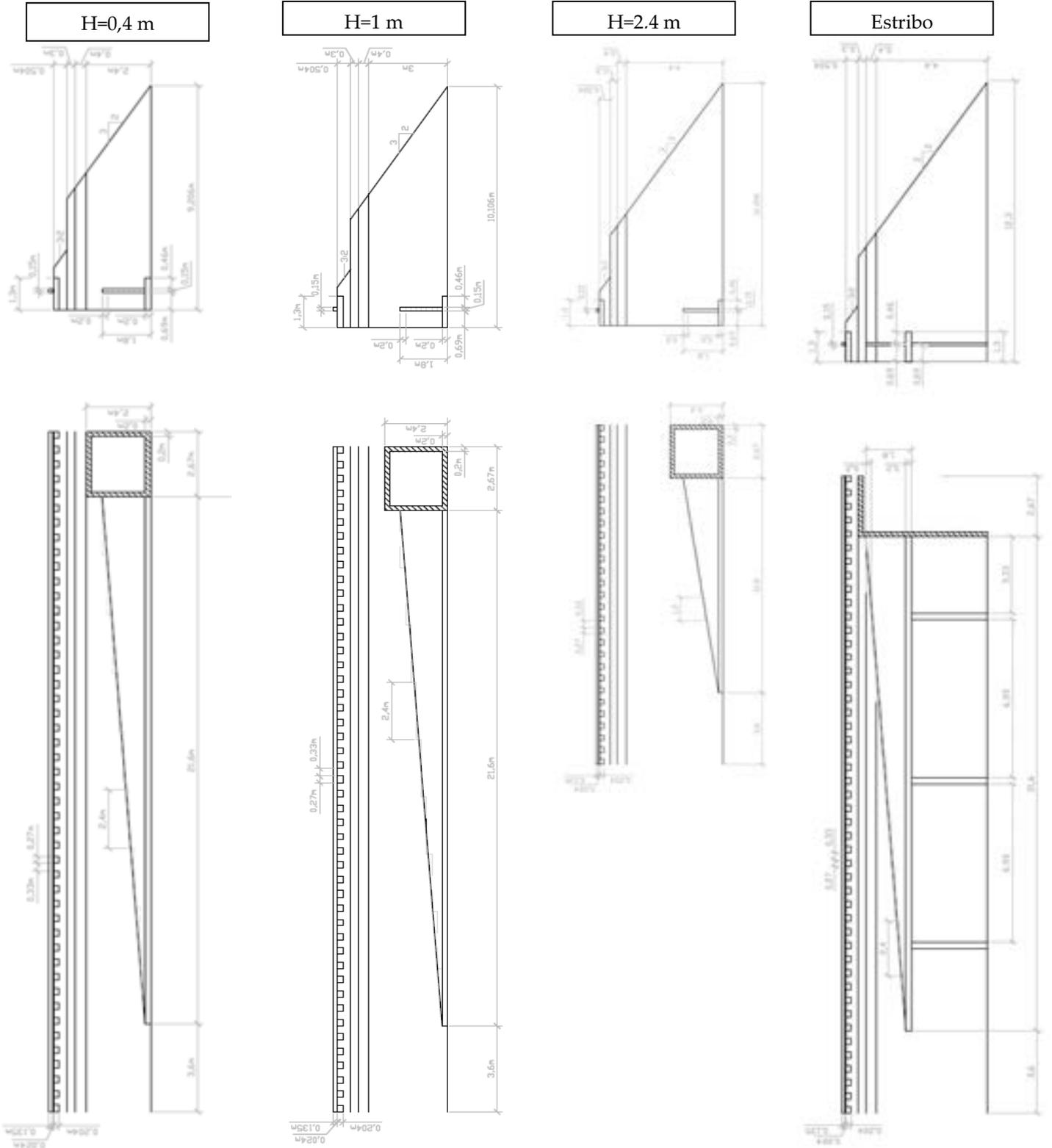


H=2,4 m

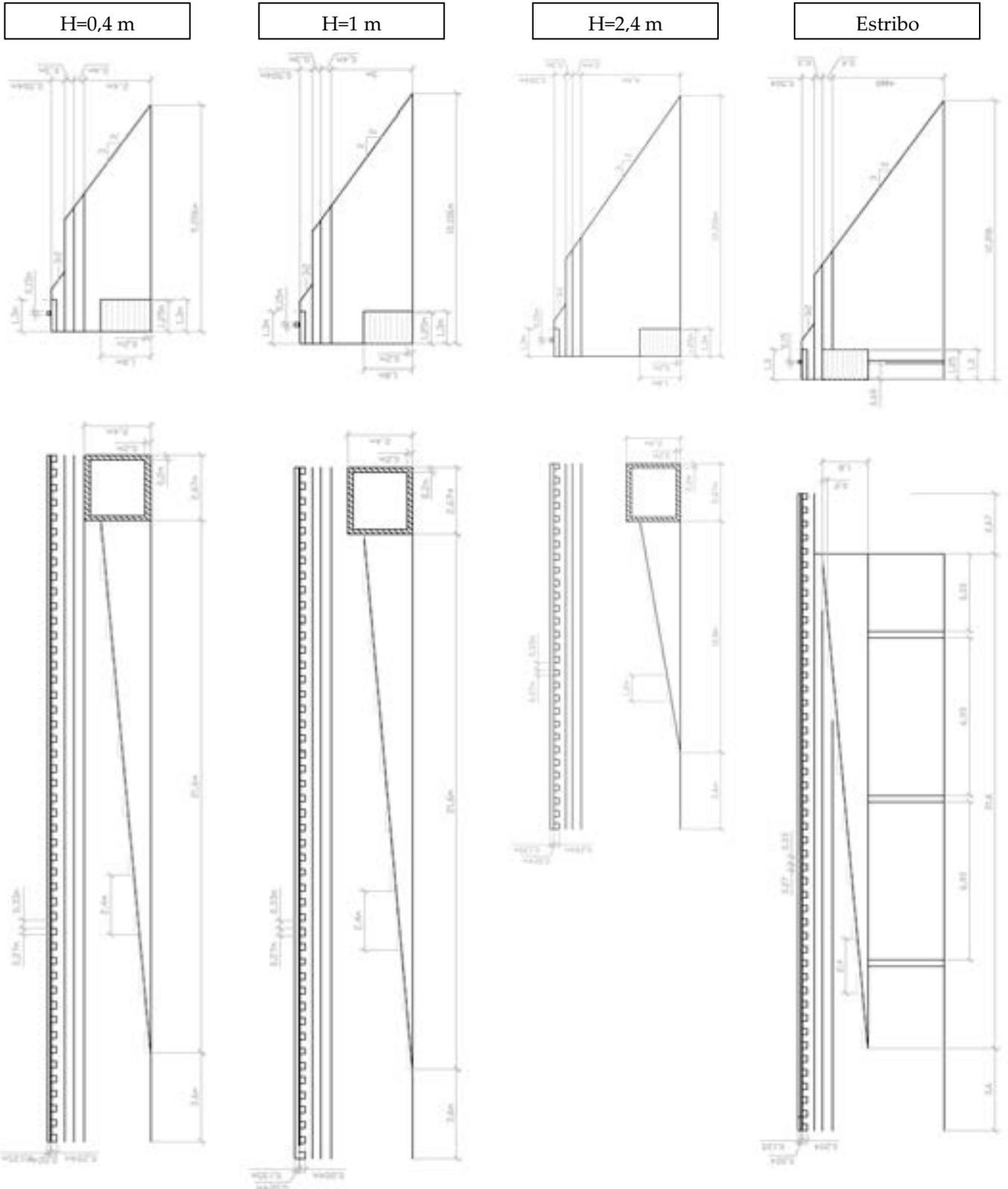
d) Estribo

Figura 4.2.29 Modelos de cuñas granulares. Fuente: Elaboración propia

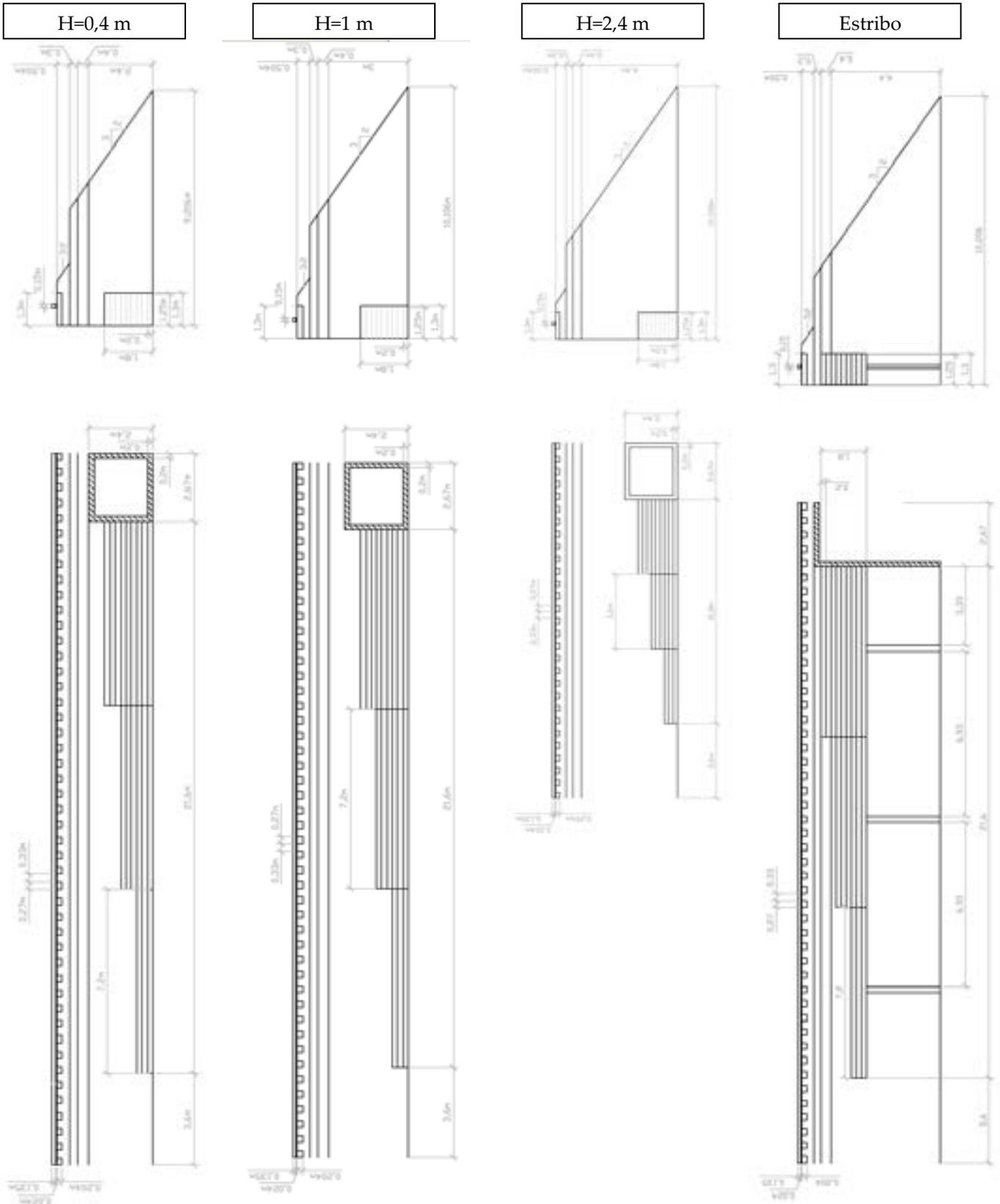
4.2.2.3 Cuñas en forma de T



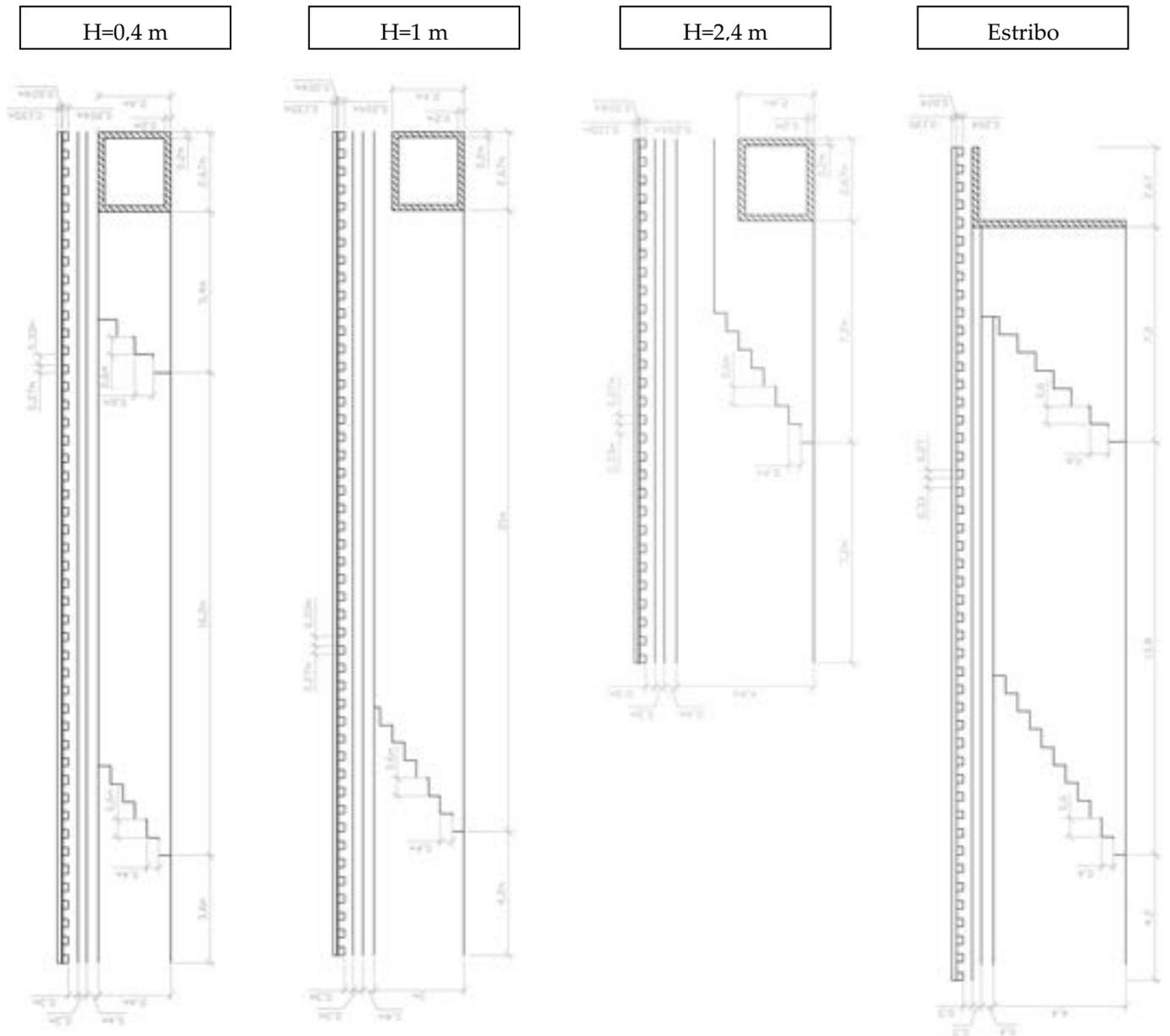
4.2.2.4 Cuña bloque triangular



4.2.2.5 Cuña formada por losas



4.2.2.6 Cuña granular



4.2.2.7 Esquematización de los cálculos realizados

Dado que los resultados que nos interesan son los producidos por el estado de carga, para el estudio y la comparación de resultados, la metodología empleada es la siguiente:

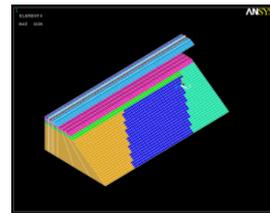
- Materialización del modelo en *ANSYS*, teniendo en cuenta todas y cada una de las características específicas de cada caso estudiado.
- Cálculo del modelo sometido a las cargas inducidas por la gravedad.
- Cálculo del modelo sometido a una carga puntual, en un cierto punto del carril, que simula a la carga transmitida por la rueda del vehículo ferroviario.
- Obtención de la deformación producida por la aplicación de la carga puntual mediante la diferencia de deformaciones entre los dos estados anteriores.

Creación del modelo

```

DINAMICA_SOLO_CENTRO_TRAVESA_Y_HUECO.txt - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
!APLICACION DE CARGA DINAMICA
!DATOS INICIALES
di vcrav=2
di vnhuec=2
carga=85000
vel=70
t0=0.00001 !no puede ser 0, por eso un valor pequeño al inicio
!sep=tambtrav+tambhuc
can1=cantrav/di vcrav
can2=tambhuc/di vnhuec
ttotal=(t/vel)
t1=(can1+can2)/vel
!APLICACION DE CARGA MOVIL
/SOL
ANTYPE,4
TRNOPT,FULL
LUMP,0

```



Cálculo del modelo sometido a la gravedad

Estado 1

Cálculo del modelo sometido a gravedad y un estado de carga

Estado 2



Obtención de resultados mediante diferencia de estados

RESULTADOS = Estado 2 – Estado 1

Figura 4.2.30 Metodología empleada. Fuente: Elaboración propia

Cabe destacar el elevado número de casos de carga estudiados, concretamente 96 casos a calcular, que quedan esquematizados a continuación:

H = 0,4m							
Granular		Placas		Triangular		T	
Gravedad	Carga 1	Gravedad	Carga 1	Gravedad	Carga 1	Gravedad	Carga 1
	Carga 2		Carga 2		Carga 2		Carga 2
	Carga 3		Carga 3		Carga 3		Carga 3
	Carga 4		Carga 4		Carga 4		Carga 4
	Carga 5		Carga 5		Carga 5		Carga 5
	Carga 6		Carga 6		Carga 6		Carga 6
	Carga 7		Carga 7		Carga 7		Carga 7
H = 1m							
Granular		Placas		Triangular		T	
Gravedad	Carga 1	Gravedad	Carga 1	Gravedad	Carga 1	Gravedad	Carga 1
	Carga 2		Carga 2		Carga 2		Carga 2
	Carga 3		Carga 3		Carga 3		Carga 3
	Carga 4		Carga 4		Carga 4		Carga 4
	Carga 5		Carga 5		Carga 5		Carga 5
	Carga 6		Carga 6		Carga 6		Carga 6
	Carga 7		Carga 7		Carga 7		Carga 7
H = 2,4m							

Granular		Placas		Triangular		T	
Gravedad	Carga 1	Gravedad	Carga 1	Gravedad	Carga 1	Gravedad	Carga 1
	Carga 2		Carga 2		Carga 2		Carga 2
	Carga 3		Carga 3		Carga 3		Carga 3
	Carga 4		Carga 4		Carga 4		Carga 4
	Carga 5		Carga 5		Carga 5		Carga 5
Estribo							
Granular		Placas		Triangular		T	
Gravedad	Carga 1	Gravedad	Carga 1	Gravedad	Carga 1	Gravedad	Carga 1
	Carga 2		Carga 2		Carga 2		Carga 2
	Carga 3		Carga 3		Carga 3		Carga 3
	Carga 4		Carga 4		Carga 4		Carga 4
	Carga 5		Carga 5		Carga 5		Carga 5

Tabla 4.2.3 Esquemas de casos de cálculo a realizar. Fuente: Elaboración propia

4.2.3 Resultados obtenidos

4.2.3.1 Obra de fábrica enterrada superficial. $H=0,4$ m

➤ Cuña granular

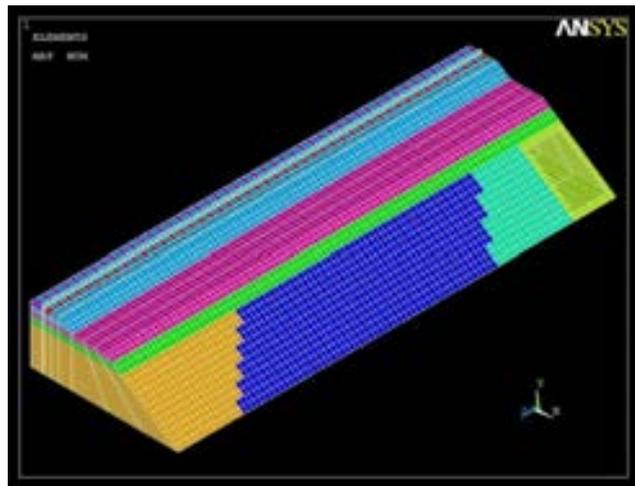
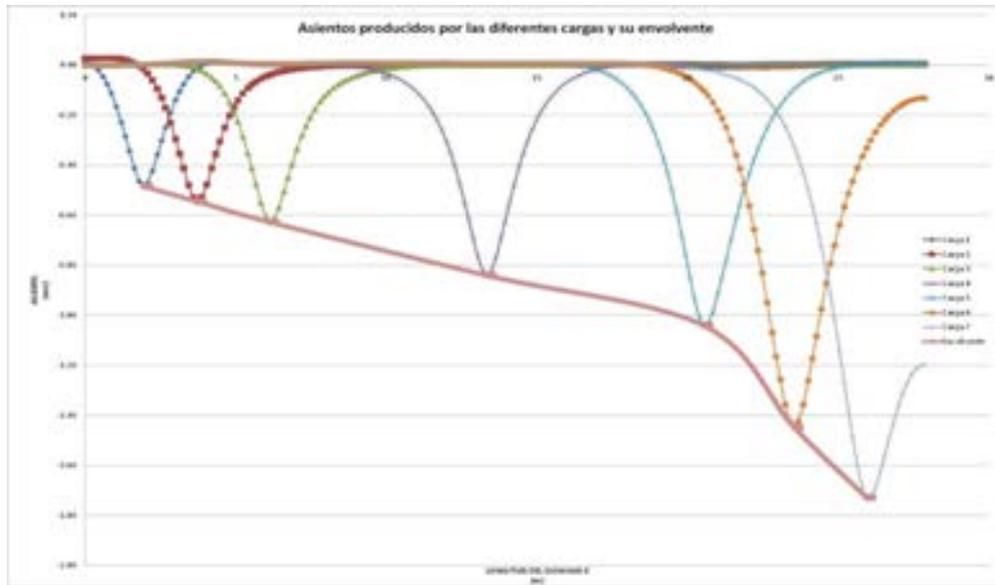


Figura 4.2.31 Modelo de obra de fábrica enterrada superficial ($H=0,4$ m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.2.32 Esquema de obra de fábrica enterrada superficial ($H=0,4$ m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.

Asientos producidos por las diferentes cargas y su envolvente

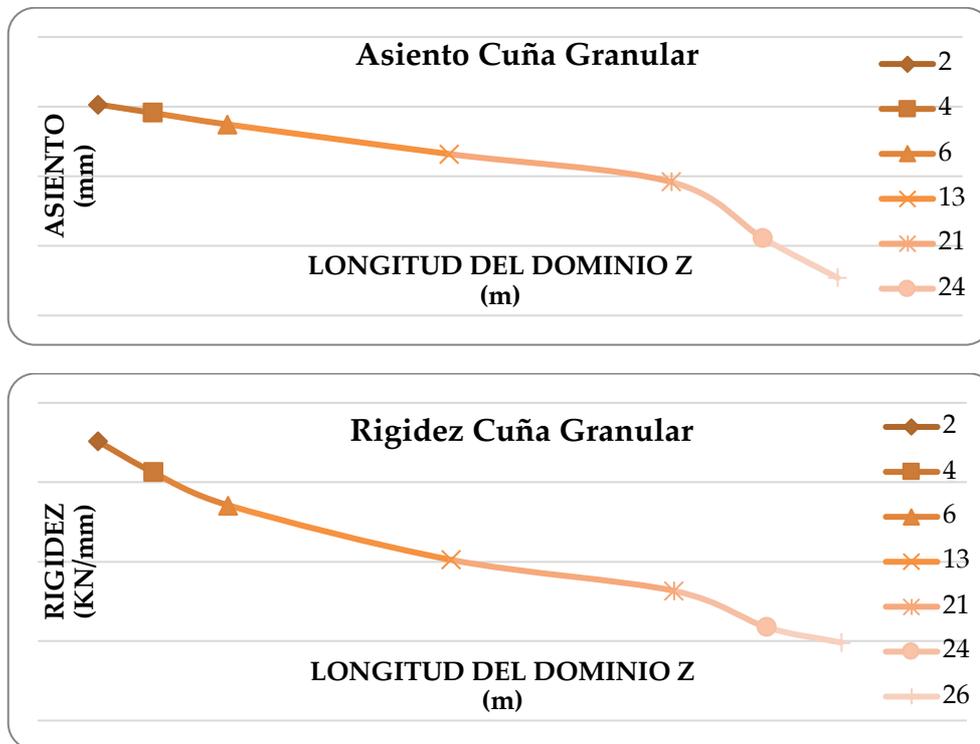


Gráfica 4.2.2 Asientos y envolvente de modelo de obra de fábrica enterrada superficial ($H=0,4$ m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.

Resultados de la envolvente

Longitud del dominio Z (m)	Asiento bajo carga (mm)	Rigidez (KN/mm)
1.935	-0,48	176
3.735	-0,54	156
6.135	-0,63	136
13.335	-0,84	101
20.535	-1,04	82
23.535	-1,45	59
25.935	-1,73	49

Tabla 4.2.4 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada superficial ($H=0,4$ m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4.2.3 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada superficial ($H=0,4$ m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia

➤ **Cuña en forma de T**

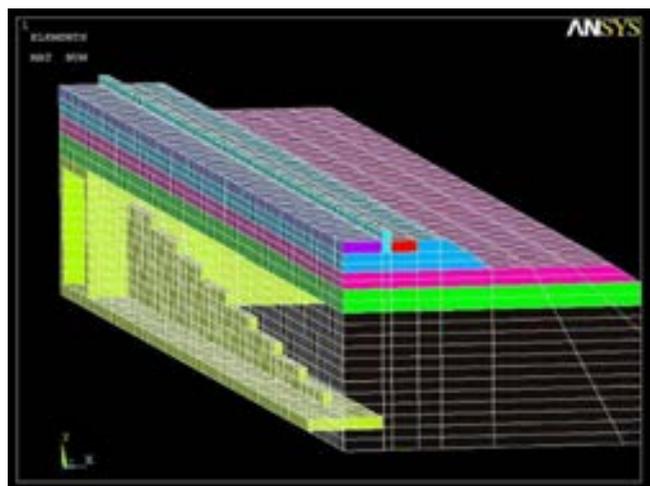


Figura 4.2.33 Modelo de obra de fábrica enterrada superficial ($H=0,4$ m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia

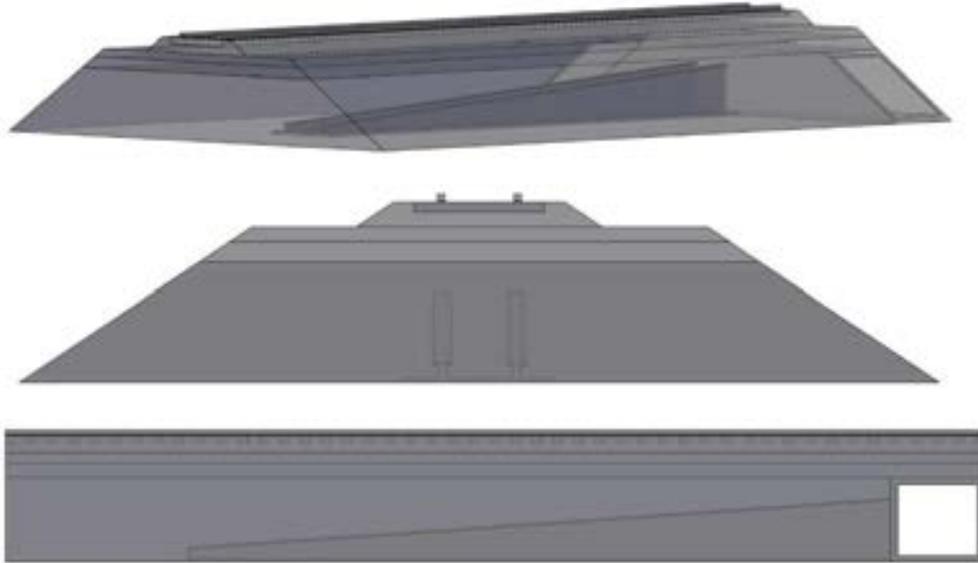
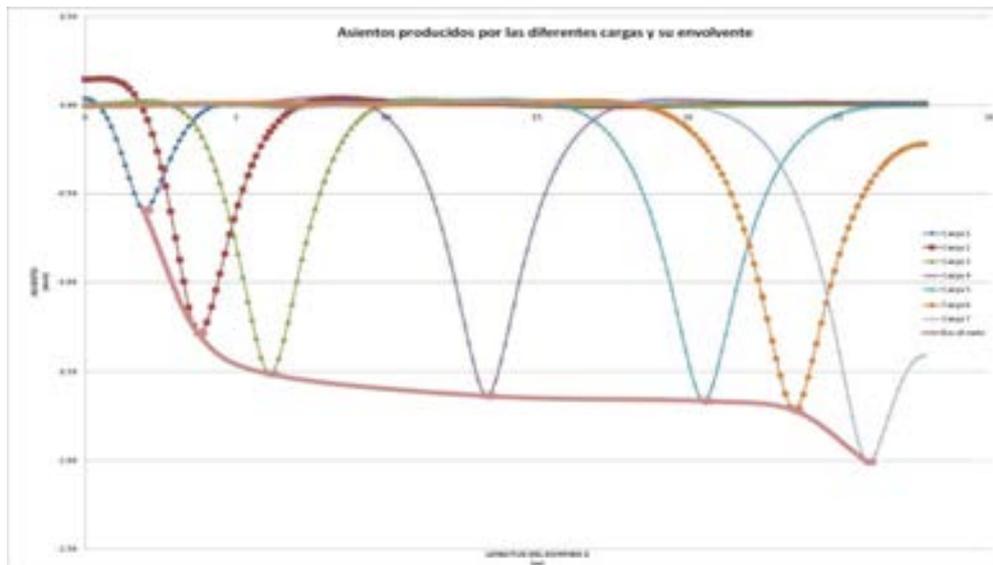


Figura 4.2.34 Esquemas de obra de fábrica enterrada superficial ($H=0,4$ m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.

Asientos producidos por las diferentes cargas y su envolvente

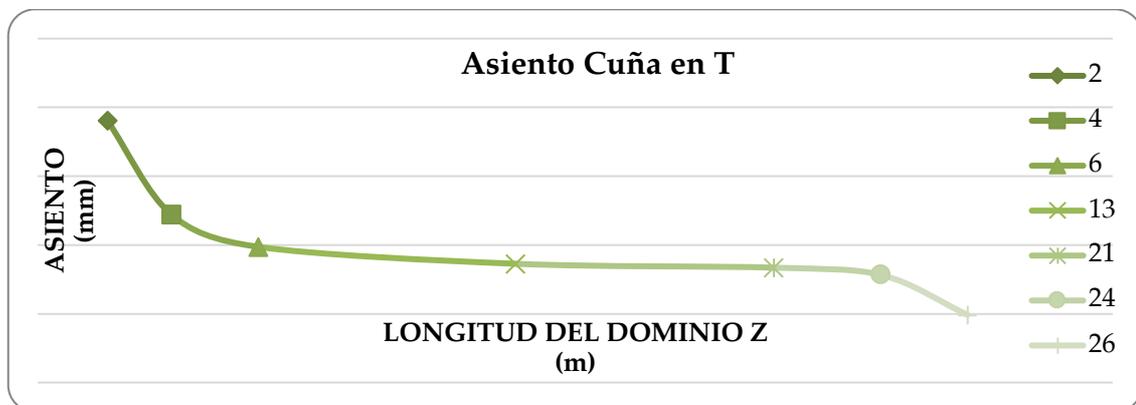


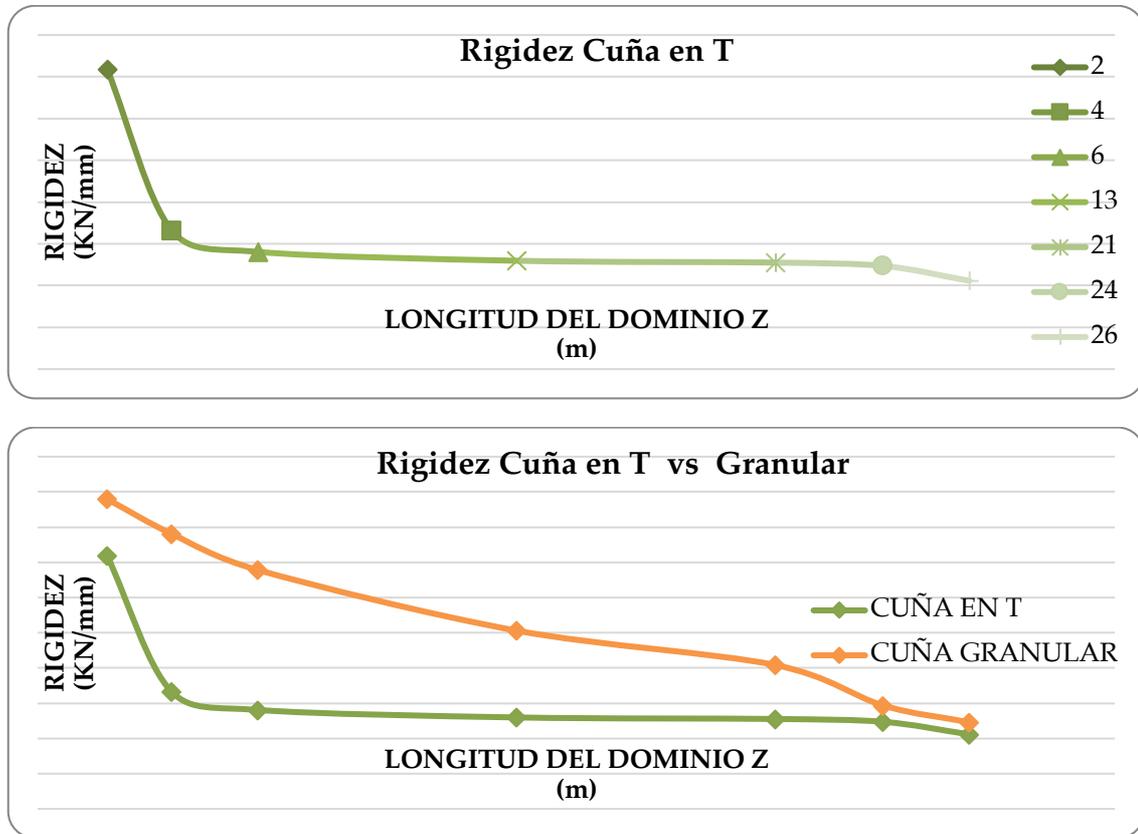
Gráfica 4.2.4 Asientos y envolvente de modelo de obra de fábrica enterrada superficial ($H=0,4$ m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.

Resultados de la envolvente

Longitud del dominio Z (m)	Asiento bajo carga (mm)	Rigidez (KN/mm)
1.935	-0,59	144
3.735	-1,28	66
6.135	-1,51	56
13.335	-1,64	52
20.535	-1,66	51
23.535	-1,72	49
25.935	-2,01	42

Tabla 4.2.5 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=0,4 m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.





Gráfica 4.2.5 Asientos, rigideces y comparación con la cuña granular de modelo de obra de fábrica enterrada superficial ($H=0,4$ m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.

➤ **Cuña bloque triangular**

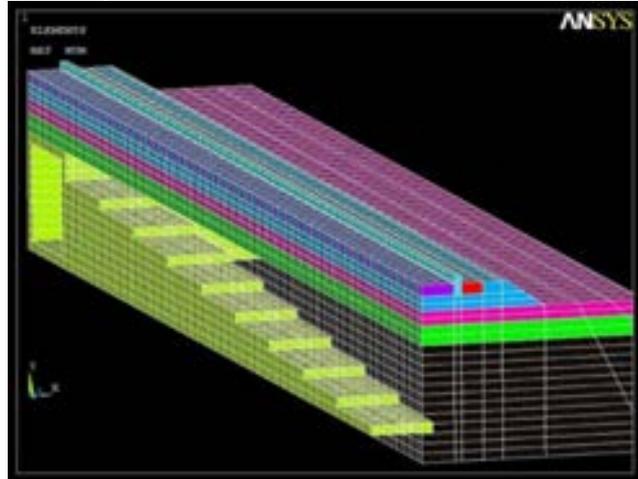


Figura 4.2.35 Modelo de obra de fábrica enterrada superficial ($H=0,4$ m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia.

a. **Cuña triangular maciza**

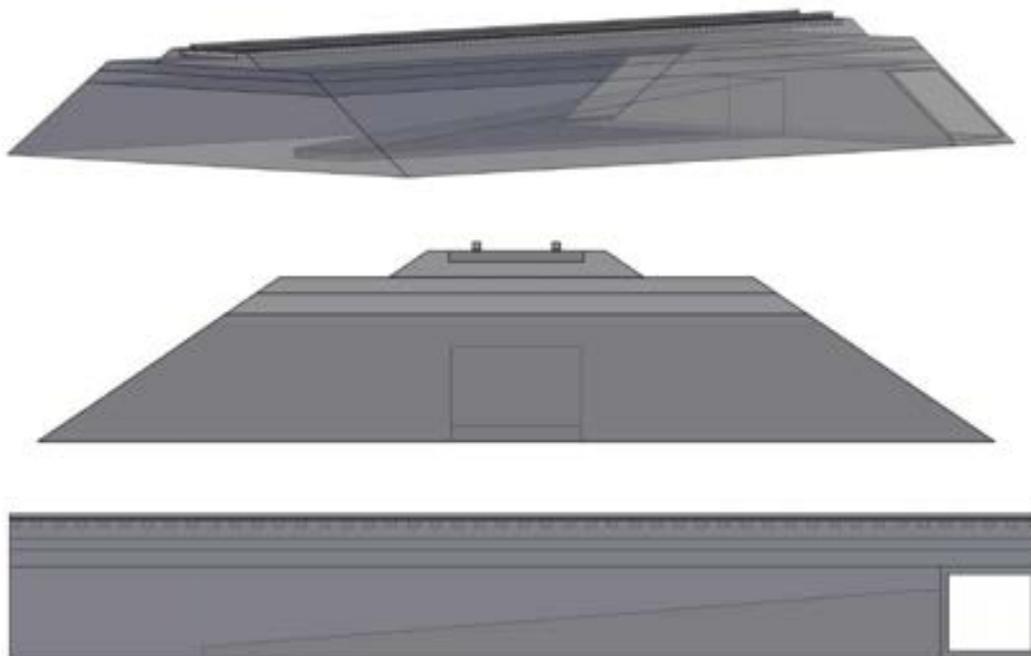


Figura 4.2.36 Esquema de obra de fábrica enterrada superficial ($H=0,4$ m), cuña triangular maciza. Fuente: Elaboración propia.

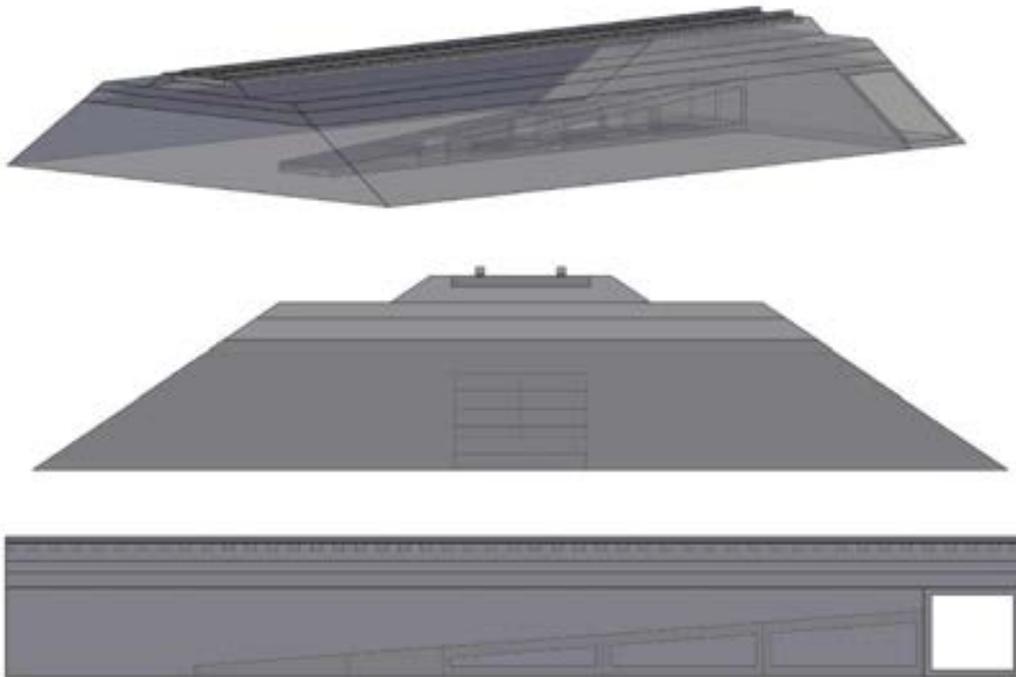
b. Cuña triangular hueca formada por módulos

Figura 4.2.37 Esquema de obra de fábrica enterrada superficial ($H=0,4$ m), cuña triangular hueca formada por módulos. Fuente: Elaboración propia.

c. Cuña triangular hueca formada con vigas en forma de T y losas

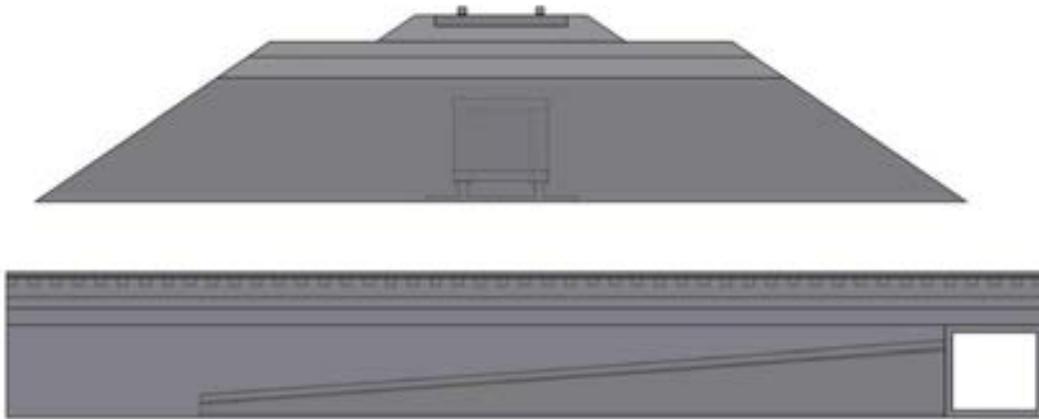
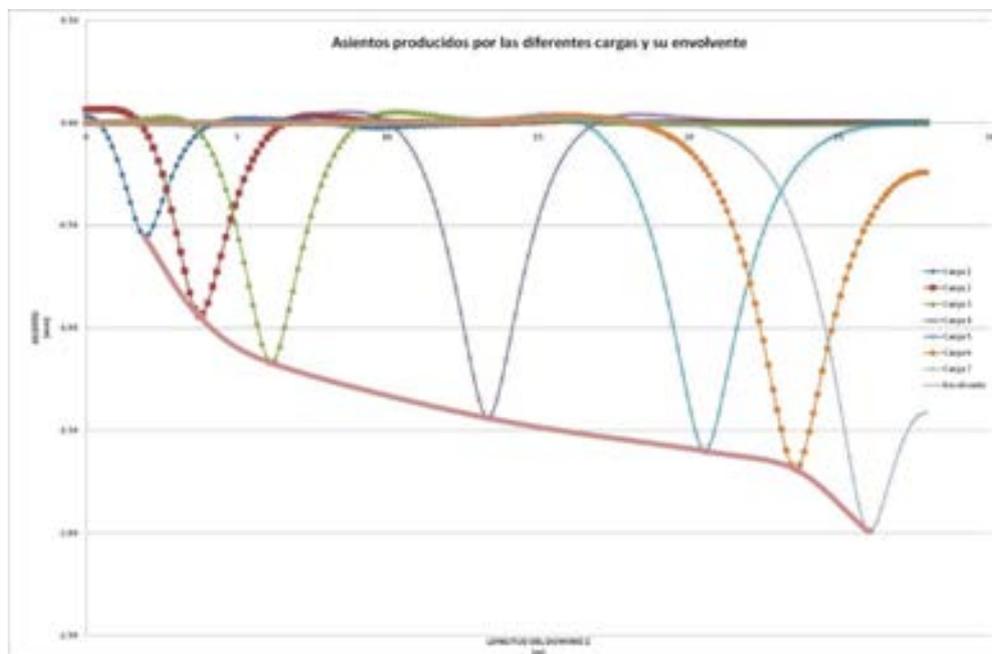


Figura 4.2.38 Esquema de obra de fábrica enterrada superficial ($H=0,4$ m), cuña triangular hueca formada con vigas en forma de T y losas. Fuente: Elaboración propia.

Asientos producidos por las diferentes cargas y su envolvente

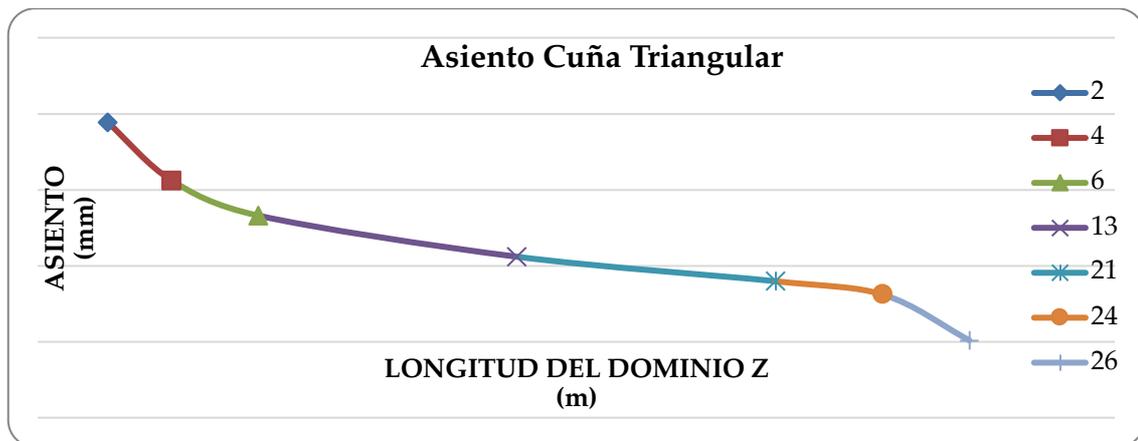


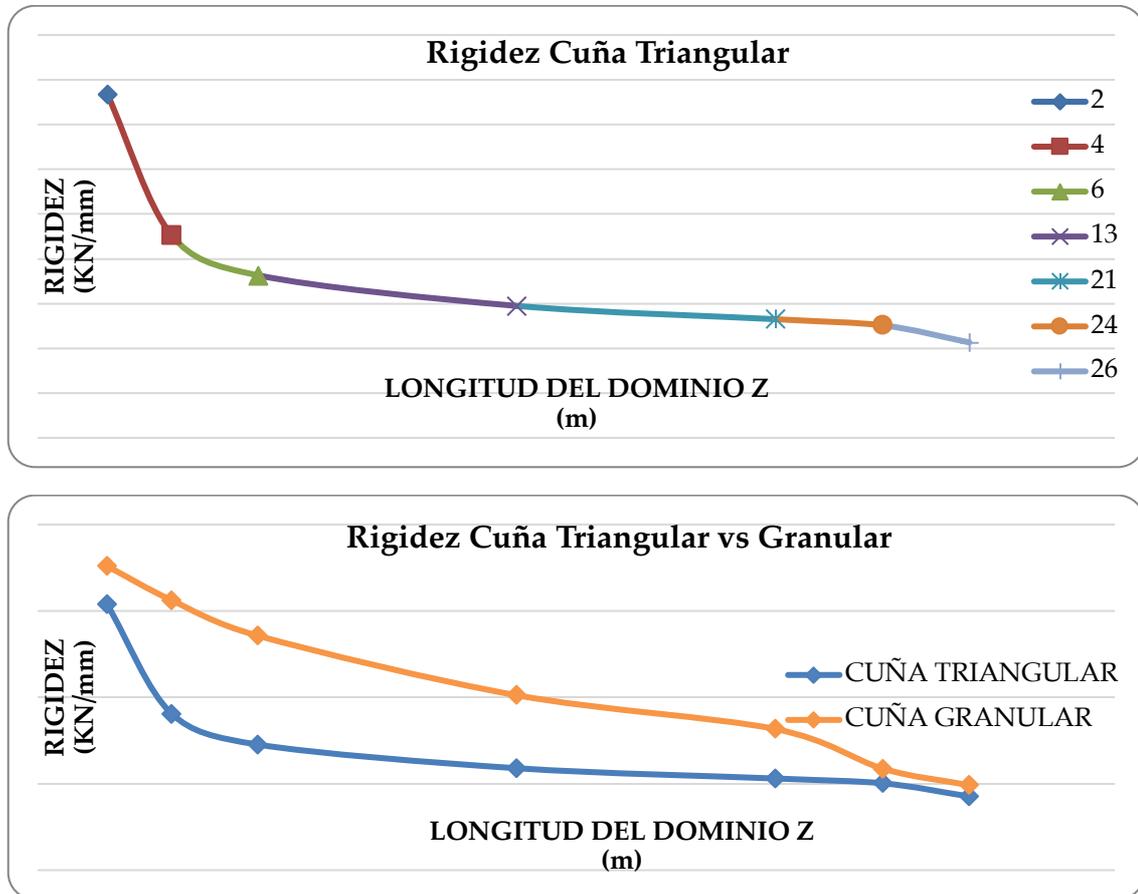
Gráfica 4.2.6 Asientos y envolvente de modelo de obra de fábrica enterrada superficial ($H=0,4$ m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia.

Resultados de la envolvente

Longitud del dominio Z (m)	Asiento bajo carga (mm)	Rigidez (KN/mm)
1.935	-0,55	154
3.735	-0,94	90
6.135	-1,17	73
13.335	-1,44	59
20.535	-1,60	53
23.535	-1,69	50
25.935	-1,99	43

Tabla 4.2.6 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=0,4 m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia.





Gráfica 4.2.7 Asientos, rigideces y comparación con la cuña granular de modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=0,4 m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia.

➤ **Cuña formada por losas**

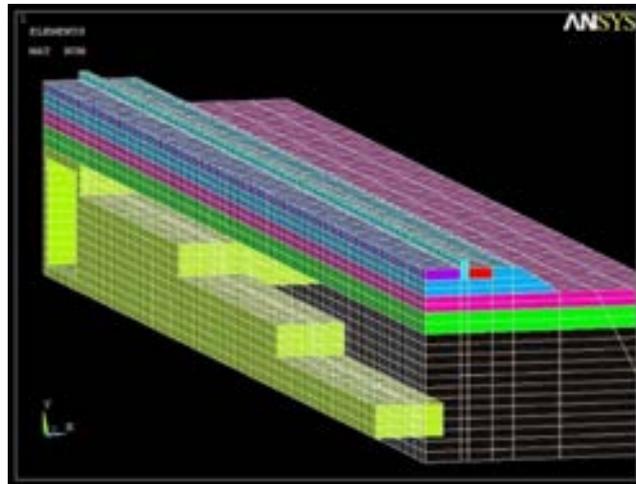


Figura 4.2.39 Modelo de obra de fábrica enterrada superficial ($H=0,4$ m), cuña formada por losas. Fuente: Elaboración propia.

a. **Cuña formada por losas macizas**

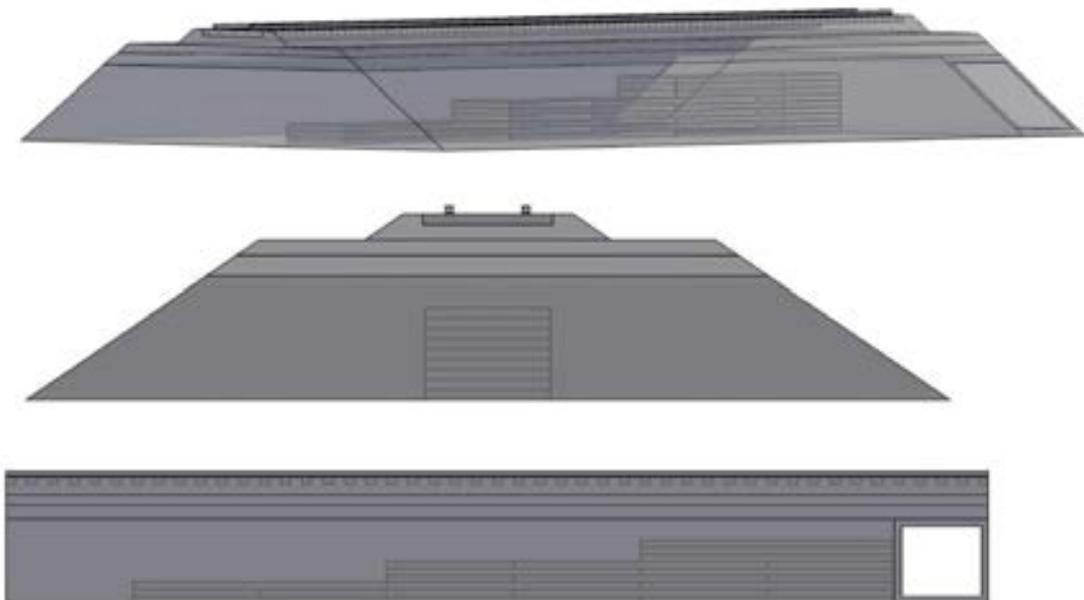


Figura 4.2.40 Esquema de obra de fábrica enterrada superficial ($H=0,4$ m), cuña formada por losas macizas. Fuente: Elaboración propia.

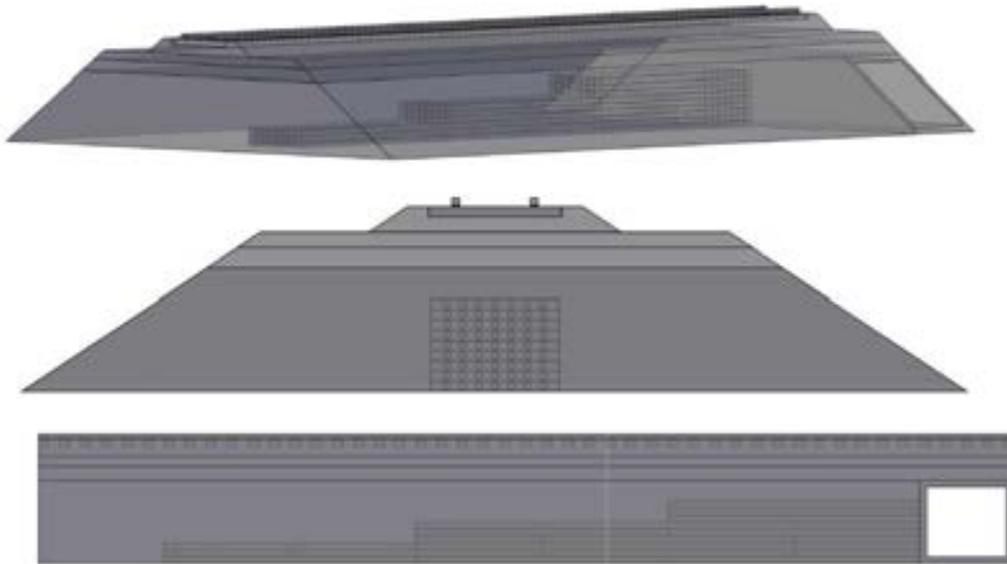
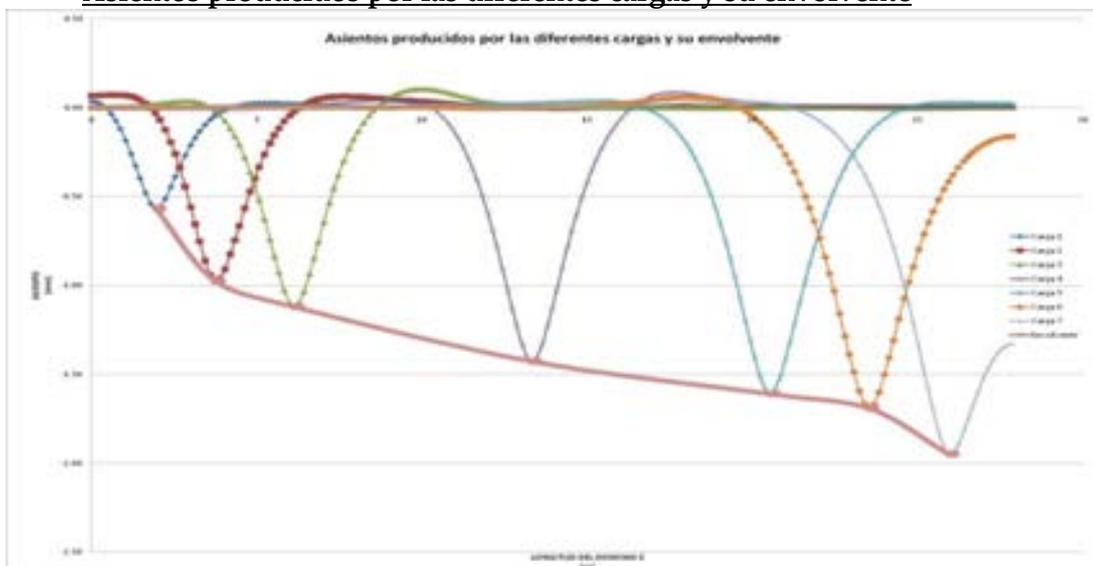
b. Cuña formada por losas alveolares

Figura 4.2.41 Esquema de obra de fábrica enterrada superficial ($H=0,4$ m), cuña formada por losas alveolares Fuente: Elaboración propia.

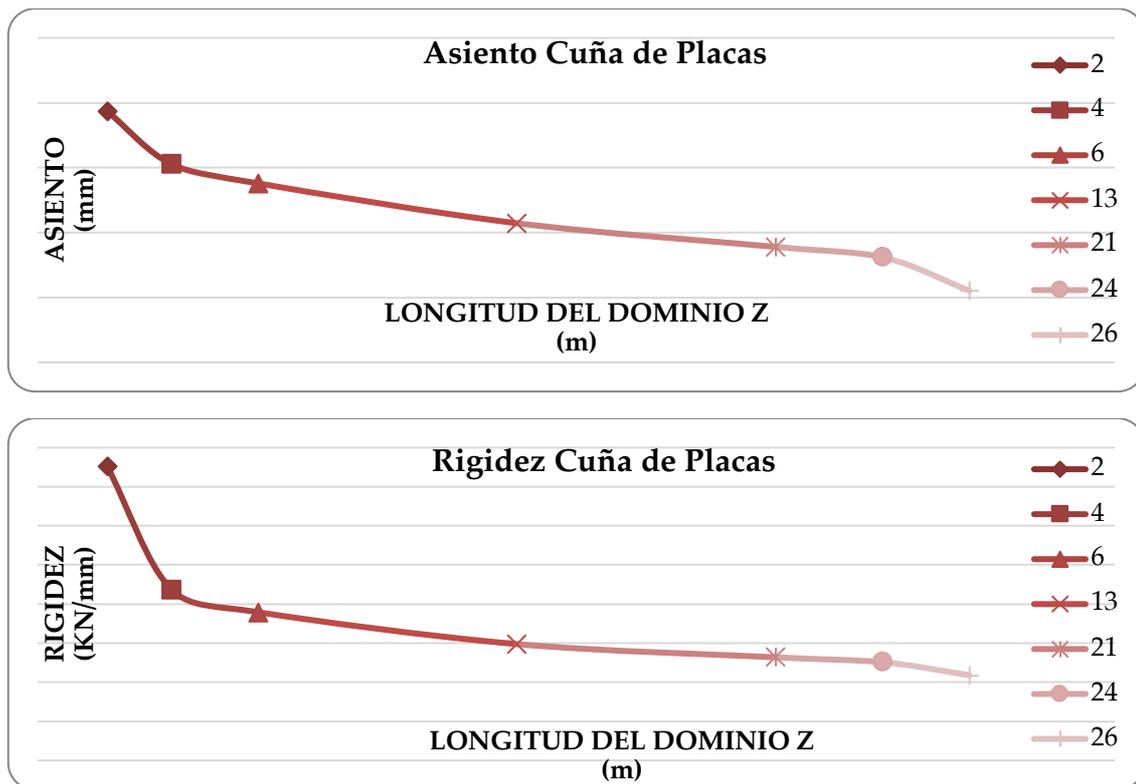
Asientos producidos por las diferentes cargas y su envolvente

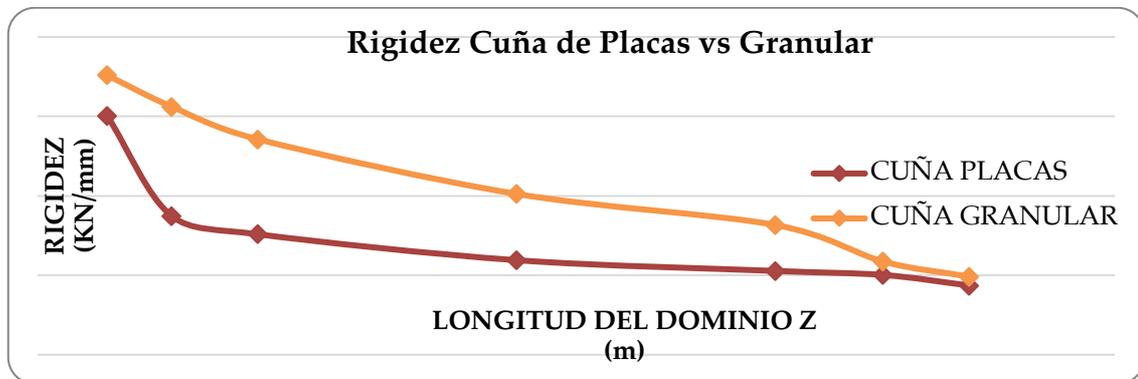
Gráfica 4.2.8 Asientos y envolvente de modelo de obra de fábrica enterrada superficial ($H=0,4$ m), cuña formada por losas. Fuente: Elaboración propia.

Resultados de la envolvente

Longitud del dominio Z (m)	Asiento bajo carga (mm)	Rigidez (KN/mm)
1.935	-0,57	150
3.735	-0,97	87
6.135	-1,12	76
13.335	-1,43	60
20.535	-1,61	53
23.535	-1,69	50
25.935	-1,95	44

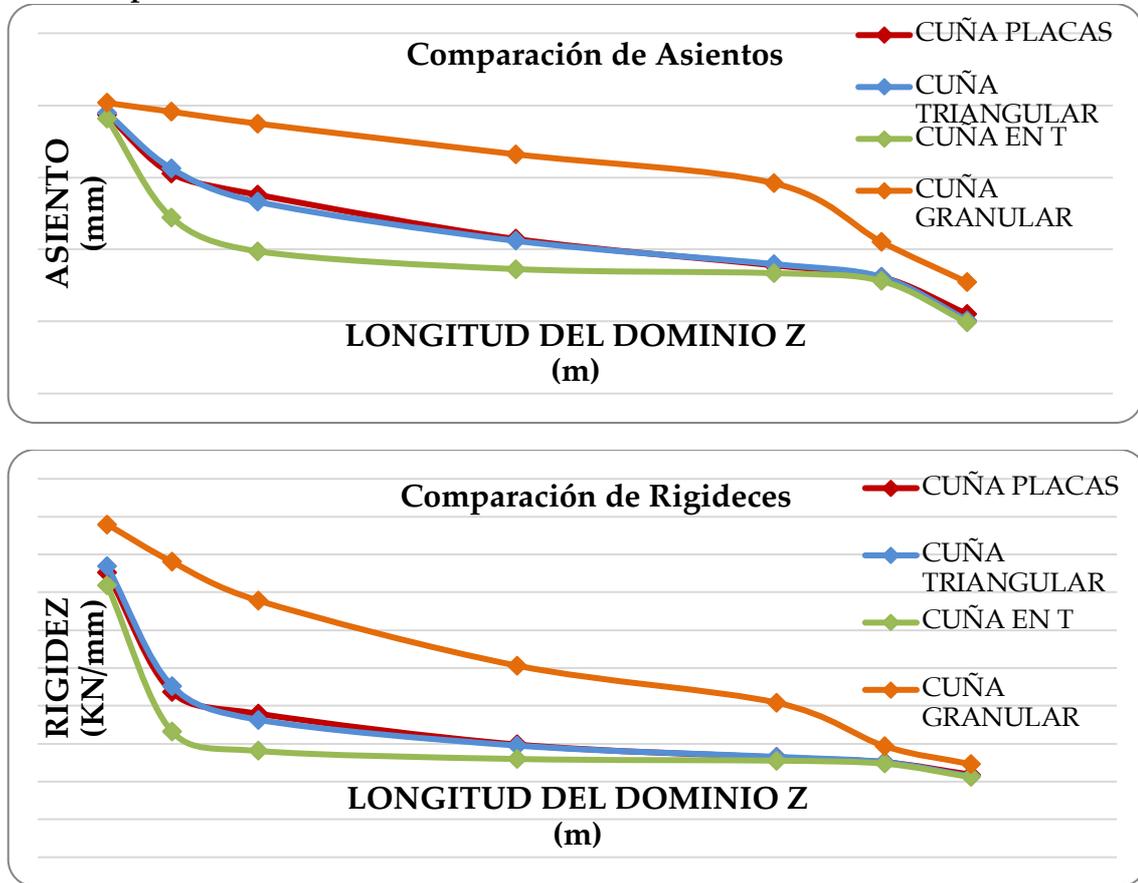
Tabla 4.2.7 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=0,4 m), cuña formada por losas. Fuente: Elaboración propia.





Gráfica 4.11- Asientos, rigideces y comparación con la cuña granular de modelo de obra de fábrica enterrada superficial ($H=0,4$ m), cuña formada por losas. Fuente: Elaboración propia.

➤ Comparativa



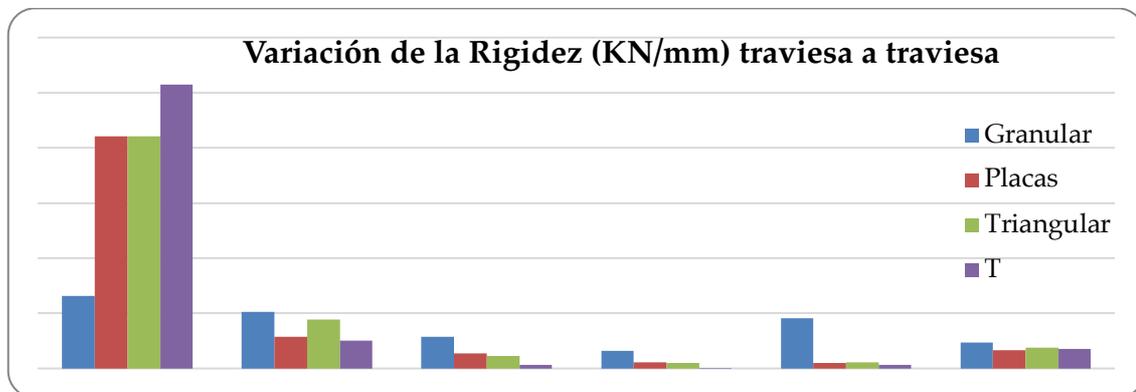
Gráfica 4.2.9 Comparativa entre los grupos de modelos. Fuente: Elaboración propia.

Comparación % variación rigidez (Kmax - Ko) / Ko)*100	
Granular	257,59
Placas	244,61
Triangular	259,82
T	239,14

Tabla 4.2.8 Comparación en % de la variación total de rigidez en la transición. Fuente: Elaboración propia.

Variación de rigidez traviesa-traviesa				
		$(K_{i+1}-K_i)/n$ traviesas KN/mm		
	Granular	Placas	Triangular	T
Carga 1-2	6,59	21,04	21,07	25,74
Carga 2-3	5,13	2,86	4,45	2,56
Carga 3-4	2,87	1,36	1,14	0,35
Carga 4-5	1,63	0,56	0,50	0,07
Carga 5-6	4,59	0,51	0,56	0,32
Carga 6-7	2,39	1,66	1,90	1,78
Media	3,87	4,66	4,93	5,14
Desviación Típica	1,88	8,07	8,04	10,14

Tabla 4.2.9 Comparación de variación de rigidez traviesa a traviesa. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4.2.10 Comparación de variación de rigidez traviesa a traviesa. Fuente: Elaboración propia.

Elevación de las cuñas mediante sistema de pilotes

La decisión de situar en este caso la cuña prefabricada a la misma cota inferior que la obra de drenaje, para así poder utilizar la misma cimentación para ambas estructuras, no ha resultado satisfactoria. Se observa con claridad la gran influencia que tiene la diferencia de cotas superiores entre la obra de drenaje y la cuña

prefabricada, puesto que ha resultado que 60 cm de material granular a esa profundidad puede sufrir deformaciones instantáneas a tener en cuenta.

Esto nos lleva a tener que elevar las cuñas mediante algún sistema hasta la misma cota superior que la obra de drenaje. A priori, la opción escogida es la de pilotar la cuña (siguiendo pues la misma metodología que para las cuñas que se utilizarán en estribos), aunque cualquier otro método que asegure la imposibilidad de movimiento vertical de la zona de apoyo de la cuña serviría de la misma manera.

Los modelos que representan la elevación de las cuñas se han realizado para los casos de cuña formada por losas y cuña en bloque triangular. El caso de cuña en forma de T no se ha realizado puesto que se ha visto que es el más desfavorable y no se mejoraría significativamente, aunque se elevara la cuña.

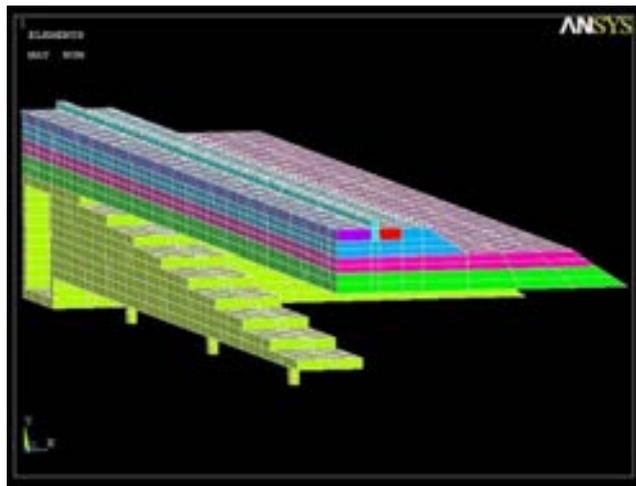
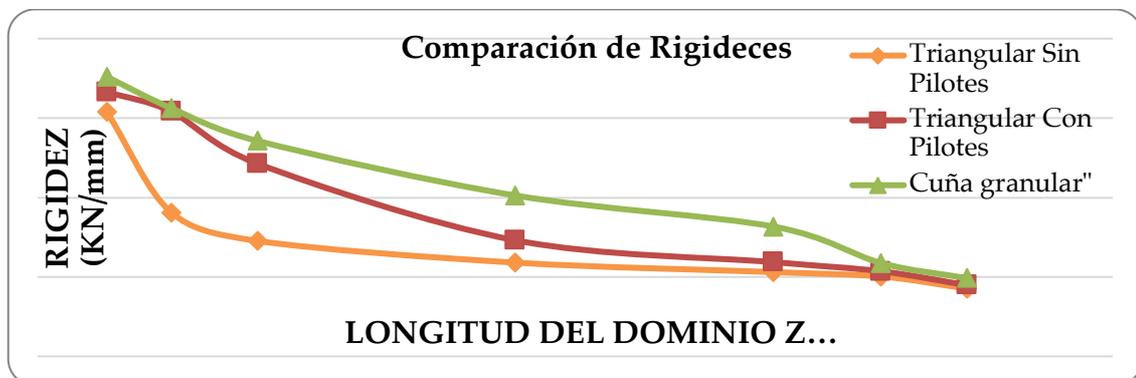
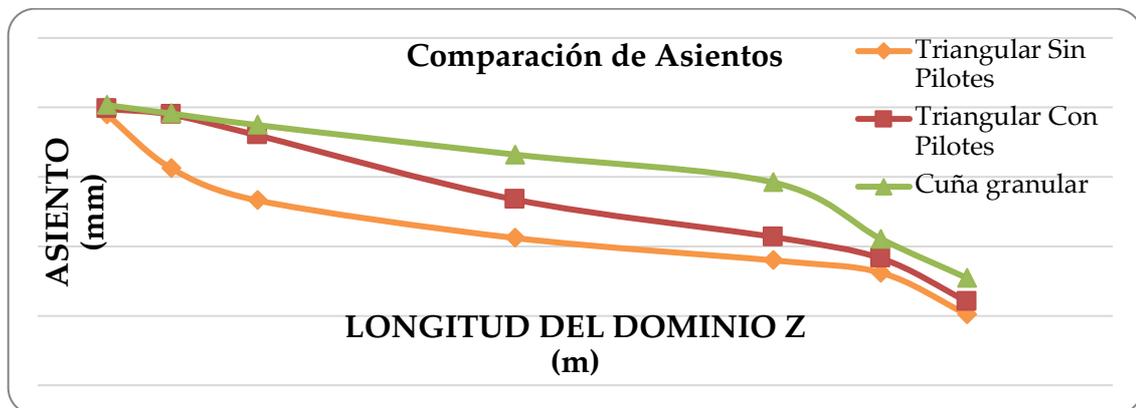


Figura 4.2.42 Modelo de obra de fábrica enterrada superficial ($H=0,4$ m), cuña triangular pilotada. Fuente: Elaboración propia.

➤ **Cuña bloque triangular con pilotes**

Cuña triangular con pilotes		
Longitud del dominio Z (m)	Asiento bajo carga (mm)	Rigidez (KN/mm)
1.935	-0,51	166,41
3.735	-0,55	154,04
6.135	-0,70	121,28
13.335	-1,16	73,04
20.535	-1,43	59,32
23.535	-1,59	53,57
25.935	-1,90	44,82

Tabla 4.2.10 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=0,4 m), cuña triangular pilotada. Fuente: Elaboración propia.

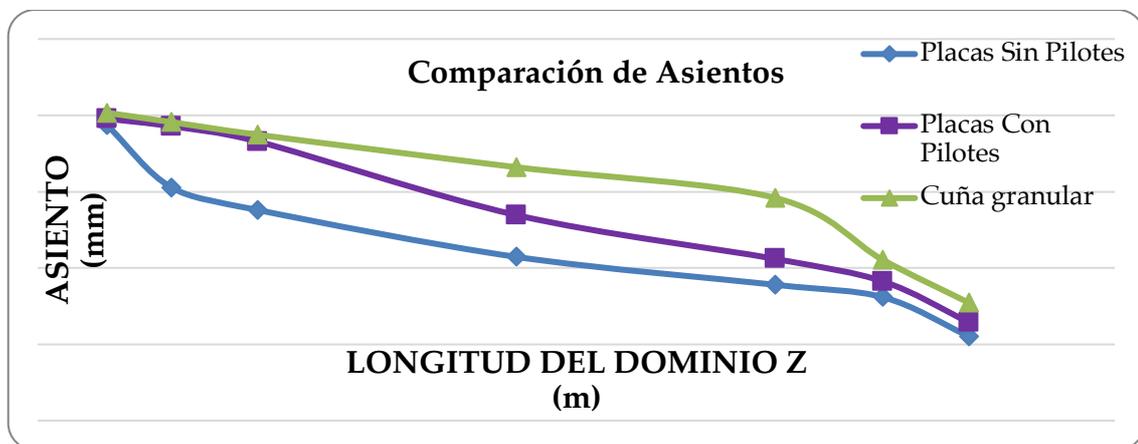


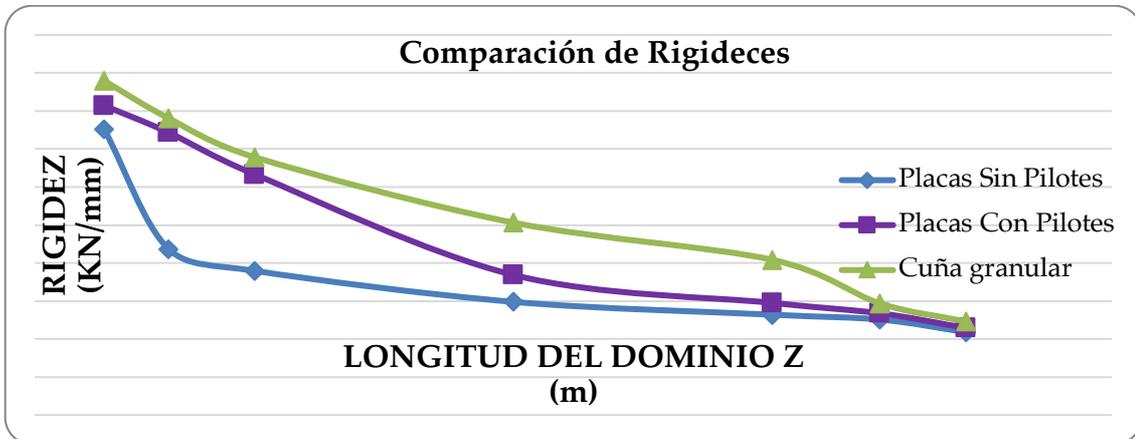
Gráfica 4.2.11 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña triangular pilotada y sin pilotar. Fuente: Elaboración propia.

➤ **Cuña formada por losas con pilotes**

Cuña formada por losas con pilotes		
Longitud del dominio Z (m)	Asiento bajo carga (mm)	Rigidez (KN/mm)
1.935	-0,52	162,87
3.735	-0,57	148,65
6.135	-0,67	126,59
13.335	-1,15	73,70
20.535	-1,44	59,02
23.535	-1,59	53,54
25.935	-1,86	45,80

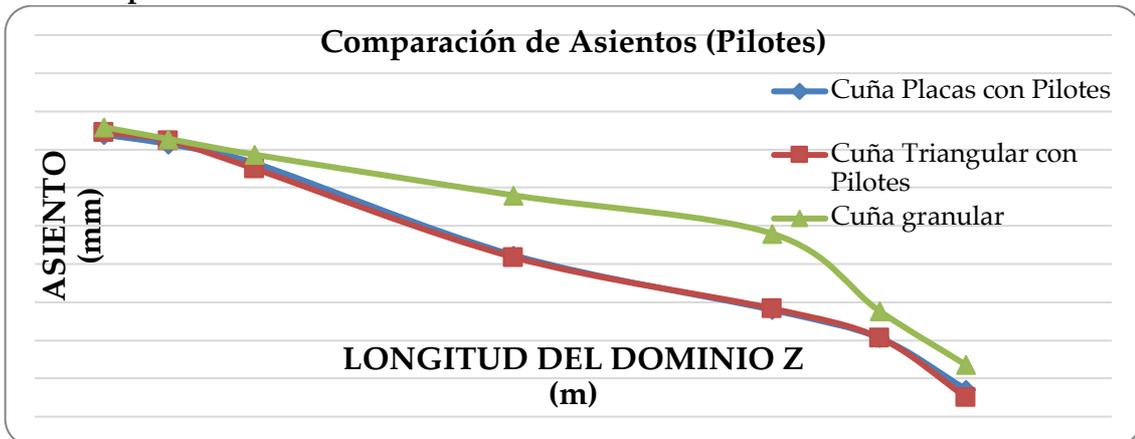
Tabla 4.2.11 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña formada por losas pilotada. Fuente: Elaboración propia

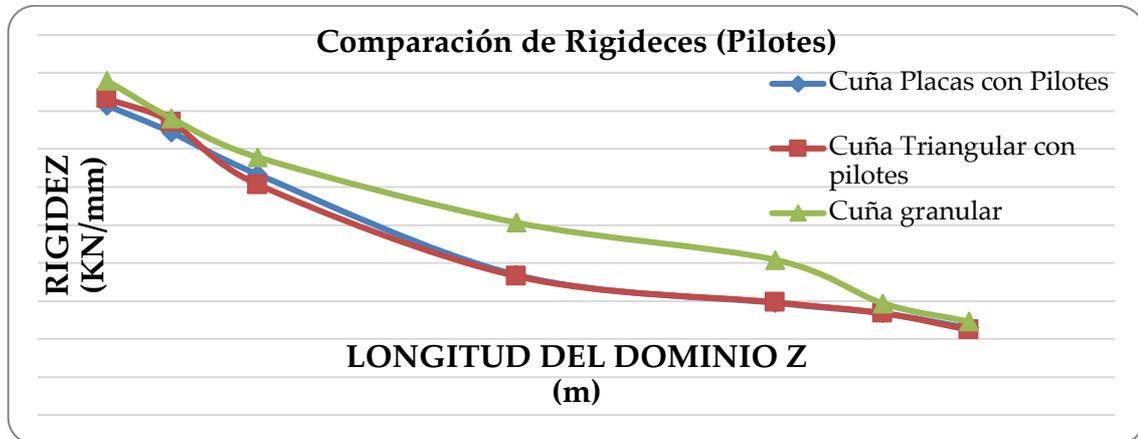




Gráfica 4.2.12 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña formada por losas pilotada y sin pilotar. Fuente: Elaboración propia.

➤ **Comparativa de resultados**

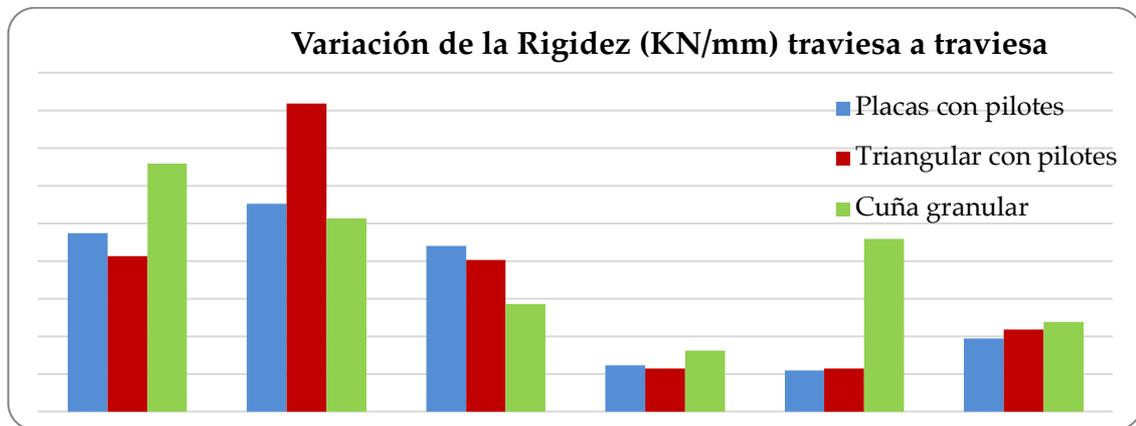




Gráfica 4.2.13 Comparativa entre los grupos de modelos. Fuente: Elaboración propia.

Variación de rigidez traviesa-traviesa						
$(K_{i+1}-K_i)/n$ traviesas KN/mm						
	Granular	Placas	Triangular	T	Triangular Pilotes	Placas Pilotes
Carga 1-2	6,59	21,04	21,07	25,74	4,12	4,74
Carga 2-3	5,13	2,86	4,45	2,56	8,19	5,51
Carga 3-4	2,87	1,36	1,14	0,35	4,02	4,41
Carga 4-5	1,63	0,56	0,50	0,07	1,14	1,22
Carga 5-6	4,59	0,51	0,56	0,32	1,15	1,10
Carga 6-7	2,39	1,66	1,90	1,78	2,19	1,94
Media	3,87	4,66	4,93	5,14	3,47	3,15
Desviación Típica	1,88	8,07	8,04	10,14	2,66	1,96

Tabla 4.2.12 Comparación de variación de rigidez traviesa a traviesa. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4.2.14 Comparación de variación de rigidez traviesa a traviesa. Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar tras los análisis que las cuñas pilotadas, bien formada por losas o con forma triangular, tienen un buen comportamiento estructural frente a la búsqueda de transición de rigidez deseada. Por el contrario, la cuña en forma de T tiene un comportamiento poco práctico para conseguir tal fin.

4.2.3.2 Obra de fábrica enterrada semi-profunda. H= 1 m

➤ Cuña granular

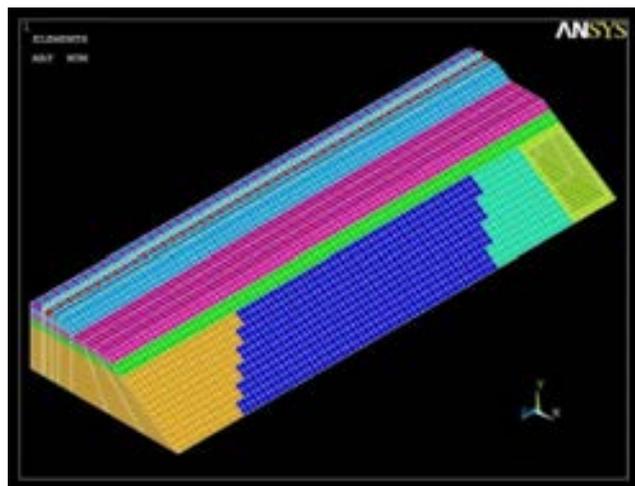


Figura 4.2.43 Modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=1 m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.

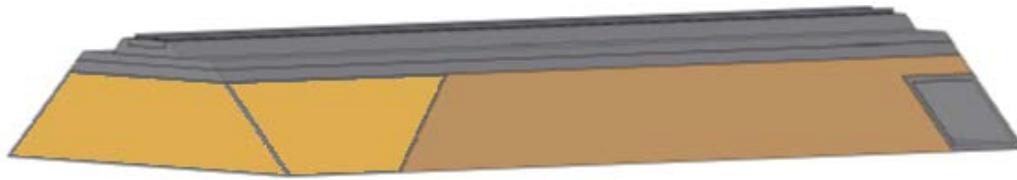
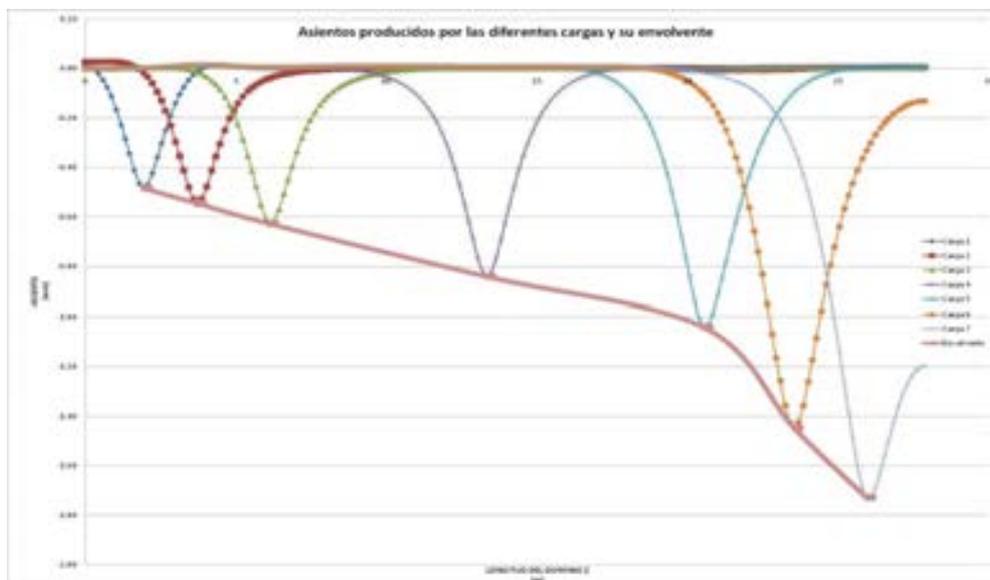


Figura 4.2.44 Esquema de obra de fábrica enterrada superficial ($H=1$ m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.

Asientos producidos por las diferentes cargas y su envolvente

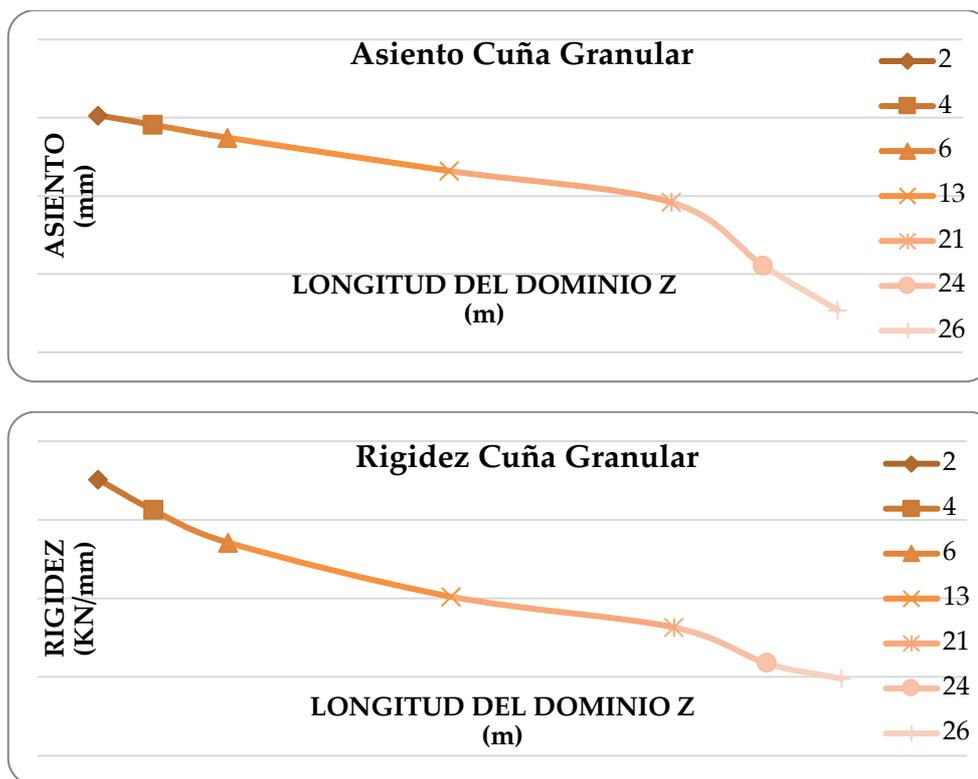


Gráfica 4.2.15 Asientos y envolvente de modelo de obra de fábrica enterrada superficial ($H=0,4$ m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.

Resultados de la envolvente

Longitud del dominio Z (m)	Asiento bajo carga (mm)	Rigidez (KN/mm)
1.935	-0,58	146
3.735	-0,78	109
6.135	-0,8	106
13.335	-0,92	93
20.535	-1,34	64
23.535	-1,79	47
25.935	-2,11	40

Tabla 4.2.13 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=1 m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4.2.16 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada superficial (H=1 m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia

➤ **Cuña en forma de T**

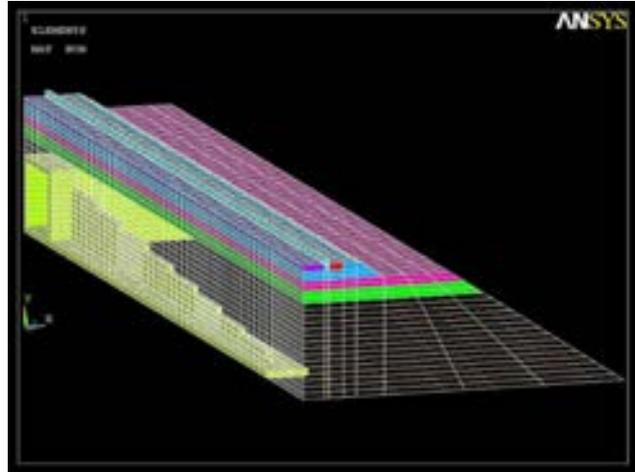


Figura 4.2.45 Modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda ($H=1$ m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.

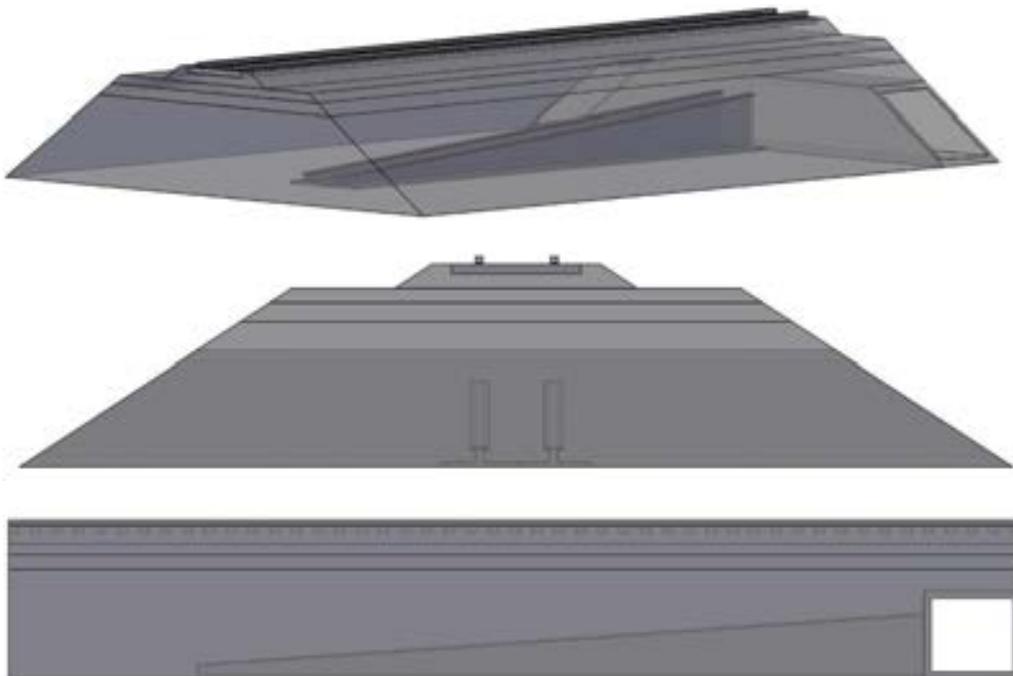
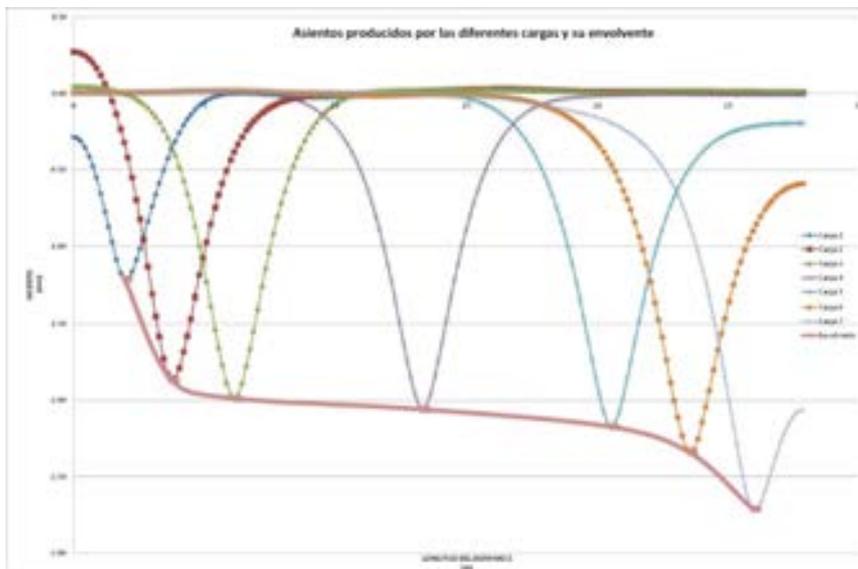


Figura 4.2.46 Esquemas de obra de fábrica enterrada semi-profunda ($H=1$ m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.

Asientos producidos por las diferentes cargas y su envolvente

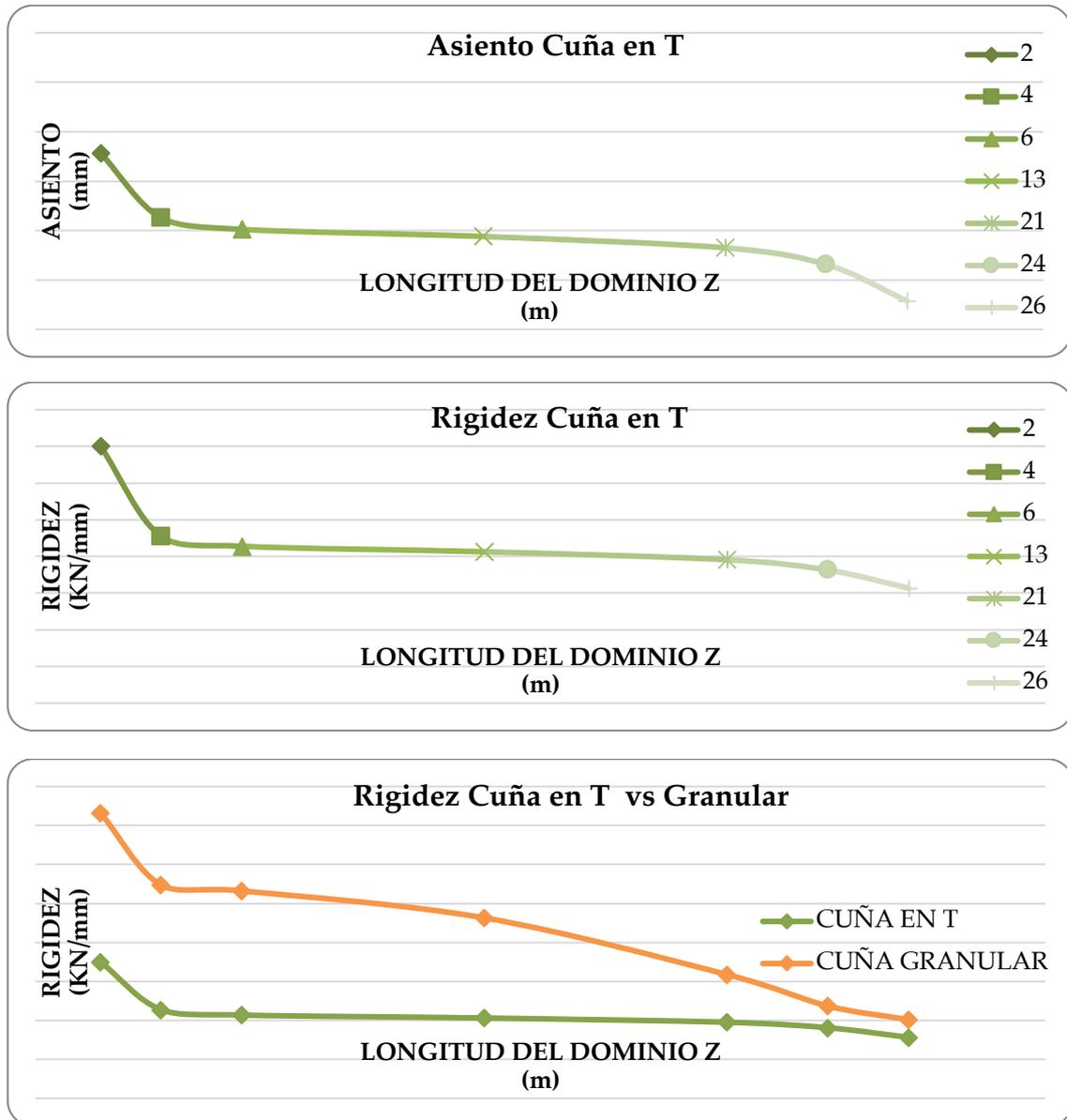


Gráfica 4.2.17 Asientos y envolvente de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.

Resultados de la envolvente

Longitud del dominio Z (m)	Asiento bajo carga (mm)	Rigidez (KN/mm)
1.935	-1,21	70
3.735	-1,87	45
6.135	-1,99	43
13.335	-2,06	41
20.535	-2,17	39
23.535	-2,34	36
25.935	-2,71	31

Tabla 4.2.14 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4.2.18 Asientos, rigideces y comparación con la cuña granular de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.

➤ **Cuña bloque triangular**

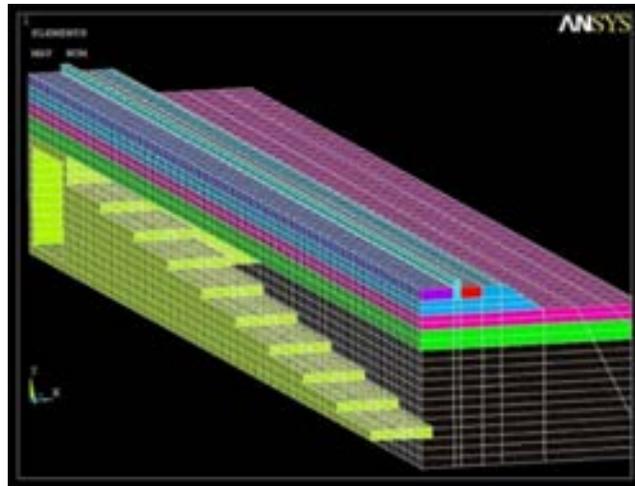


Figura 4.2.47 Modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda ($H=1$ m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia.

a. **Cuña triangular maciza**

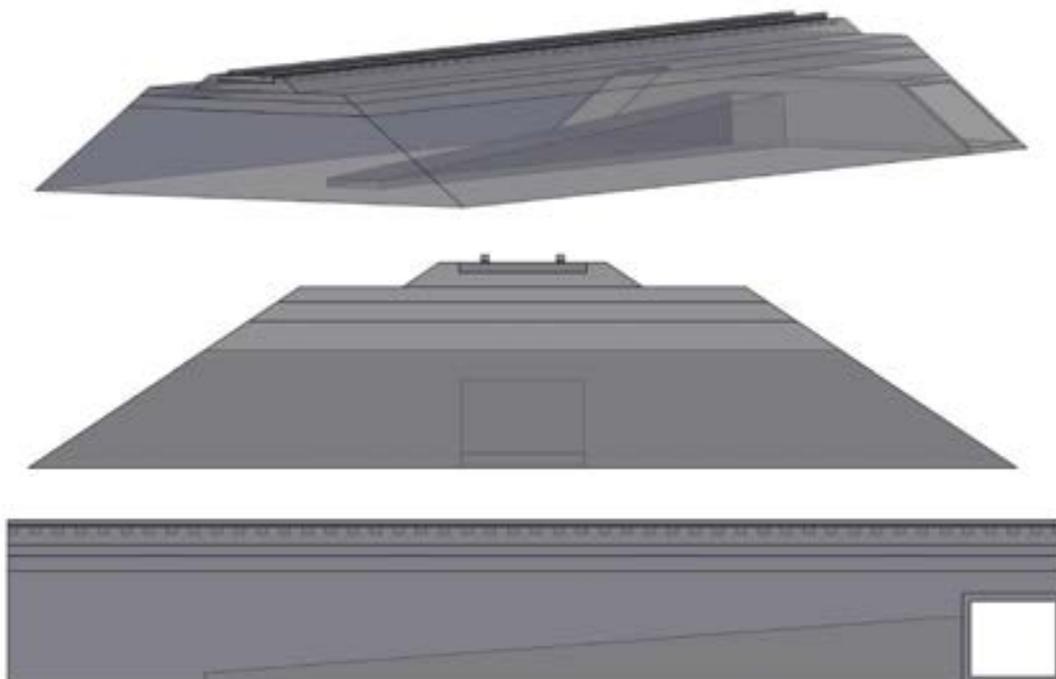


Figura 4.2.48 Esquema de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña triangular maciza. Fuente: Elaboración propia.

b. Cuña triangular hueca formada por módulos

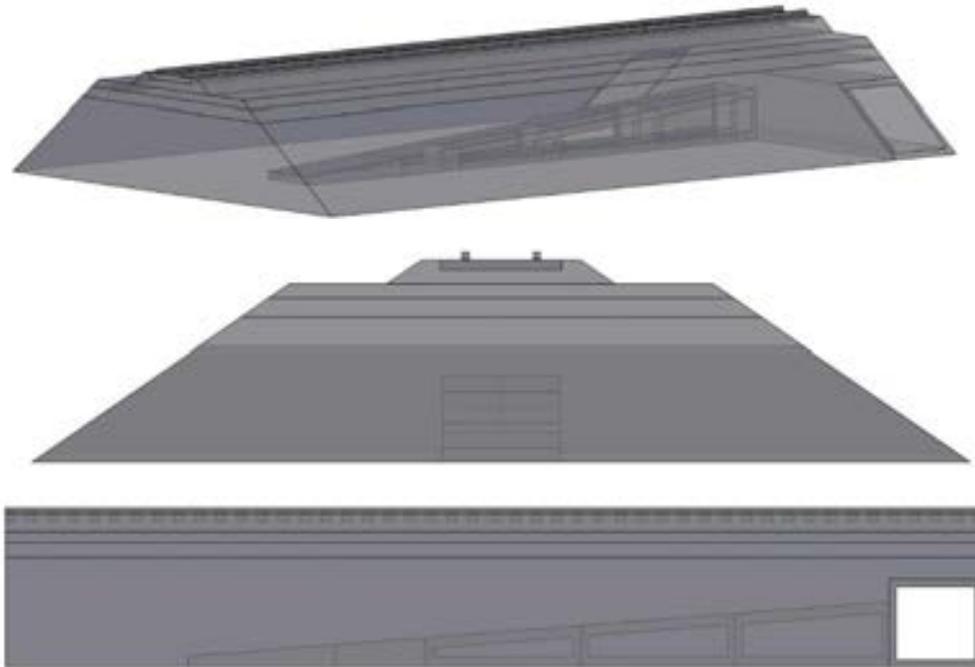
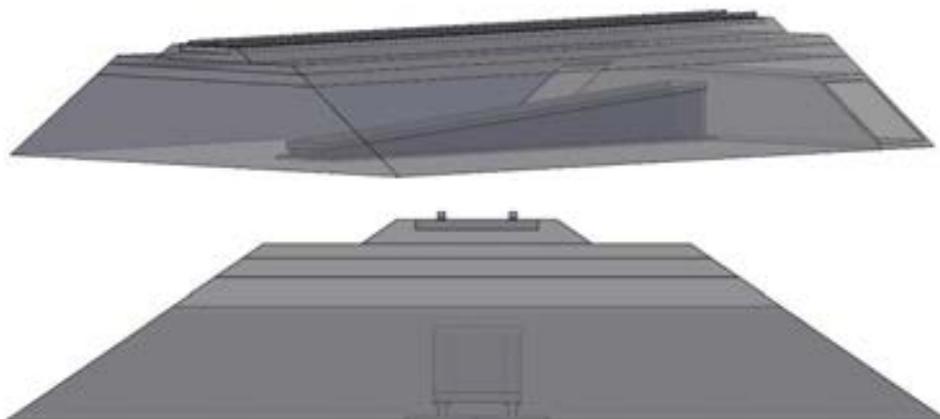


Figura 4.2.49 Esquema de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña triangular hueca formada por módulos. Fuente: Elaboración propia.

c. Cuña triangular hueca formada con vigas en forma de T y losas



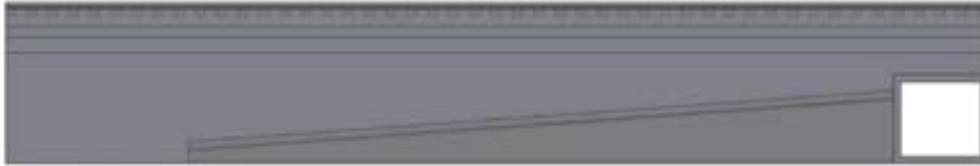
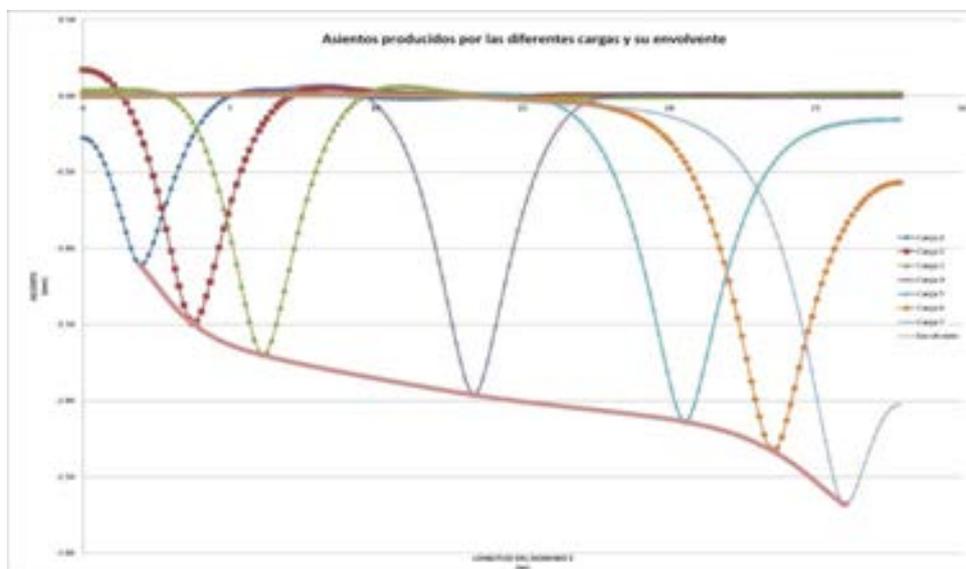


Figura 4.2.50 Esquema de obra de fábrica enterrada semi-profunda ($H=1$ m), cuña triangular hueca formada con vigas en forma de T y losas. Fuente: Elaboración propia.

Asientos producidos por las diferentes cargas y su envolvente

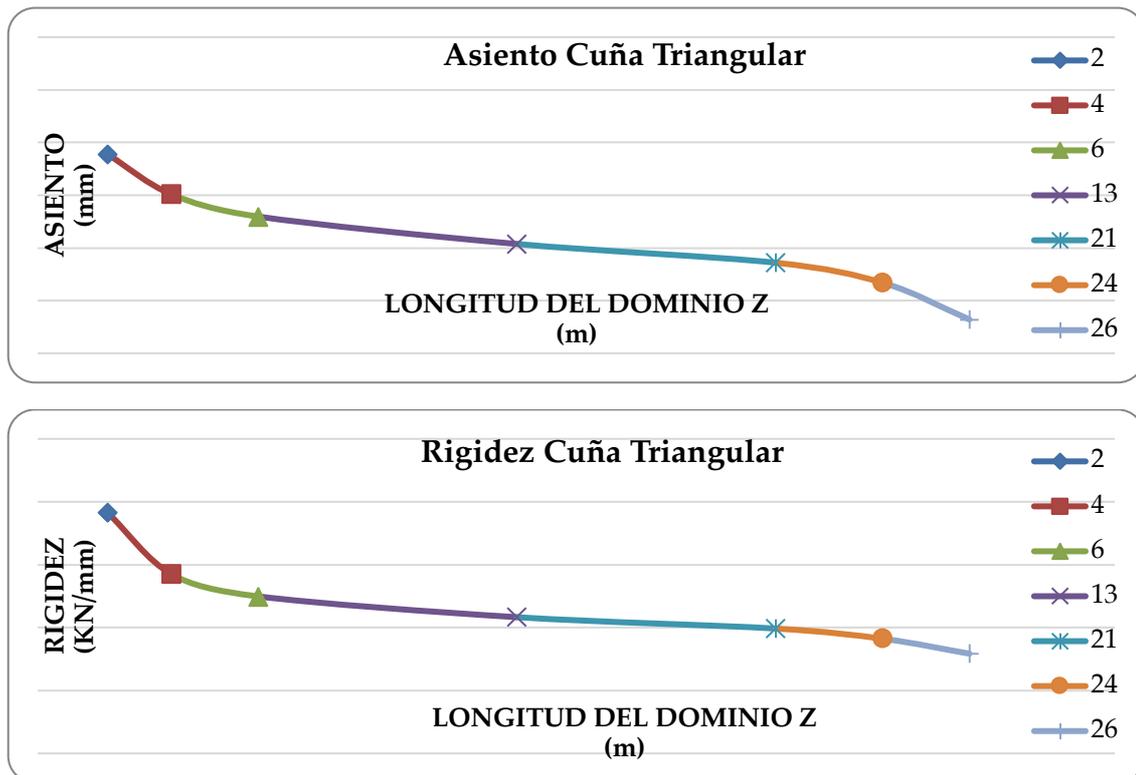


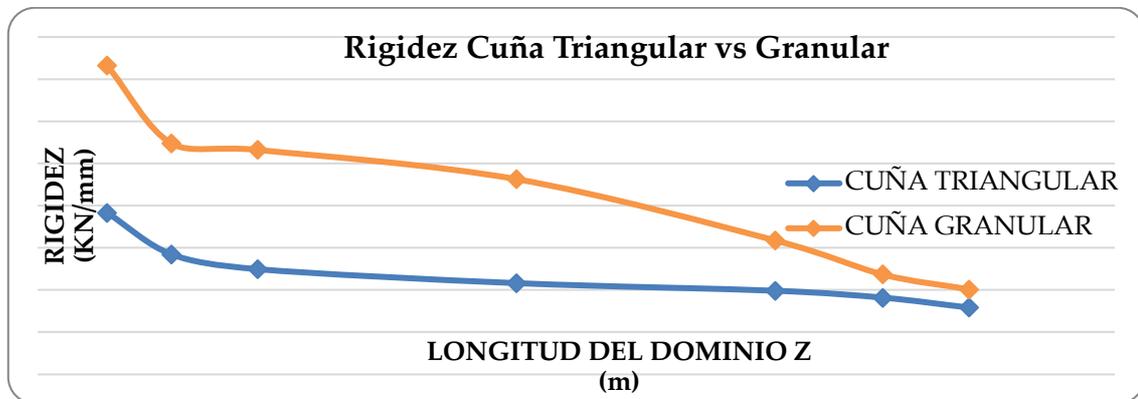
Gráfica 4.2.19 Asientos y envolvente de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda ($H=1$ m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia.

Resultados de la envolvente

Longitud del dominio Z (m)	Asiento bajo carga (mm)	Rigidez (KN/mm)
1.935	-1,11	77
3.735	-1,49	57
6.135	-1,70	50
13.335	-1,96	43
20.535	-2,14	40
23.535	-2,33	36
25.935	-2,68	32

Tabla 4.2.15 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia.





Gráfica 4.2.20 Asientos, rigideces y comparación con la cuña granular de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda ($H=1$ m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia.

➤ **Cuña formada por losas**

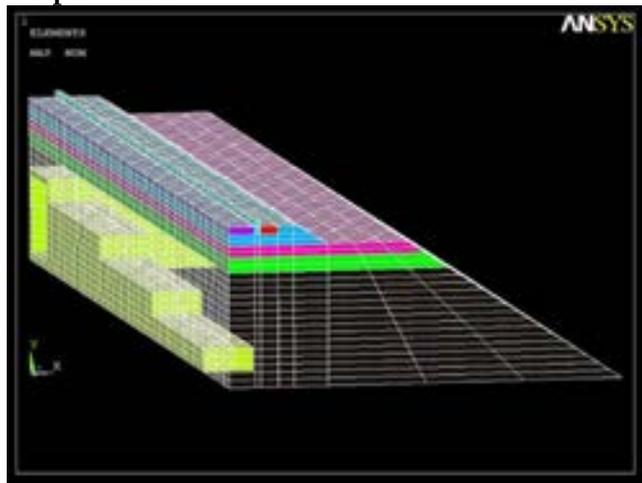


Figura 4.2.51 Modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda ($H=1$ m), cuña formada por losas. Fuente: Elaboración propia.

a. **Cuña formada por losas macizas**

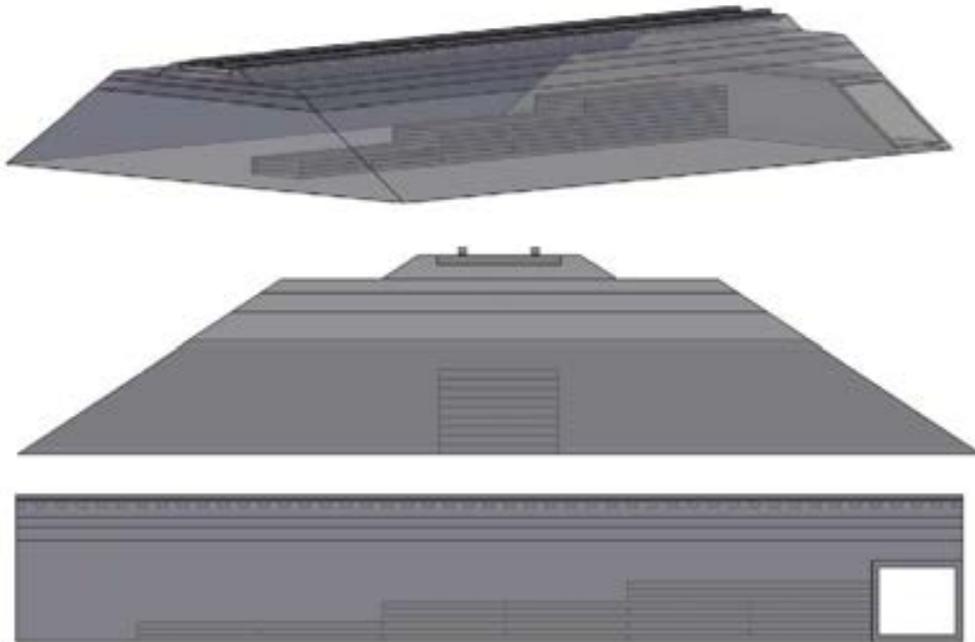


Figura 4.2.52 Esquema de obra de fábrica enterrada semi-profunda ($H=1$ m), cuña formada por losas macizas. Fuente: Elaboración propia.

b. Cuña formada por losas alveolares

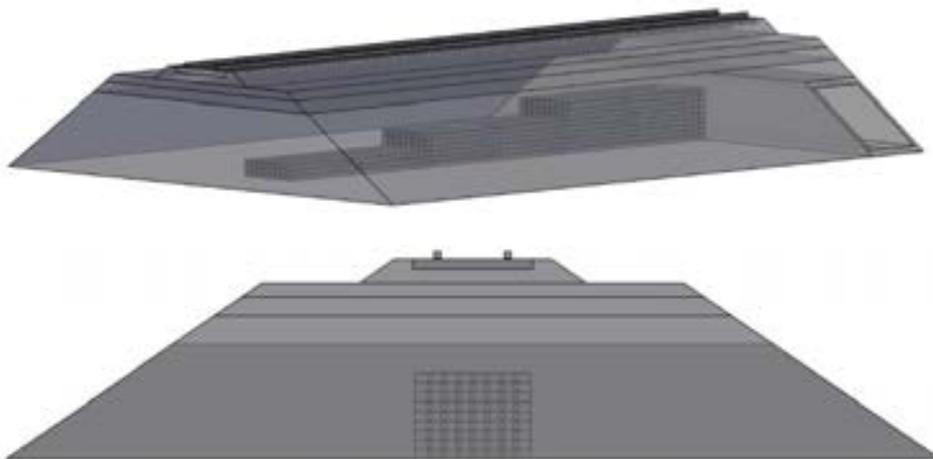
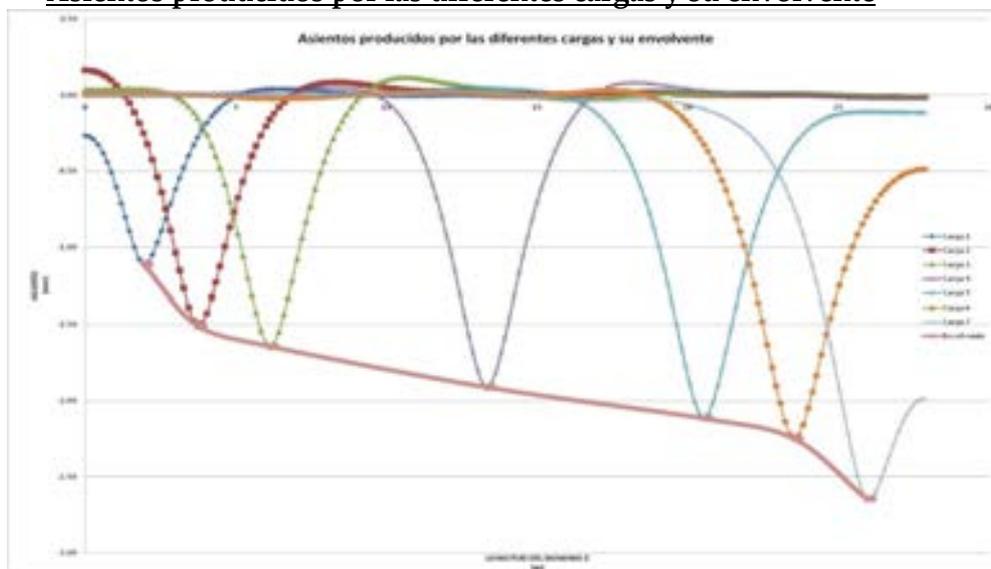




Figura 4.2.53 Esquema de obra de fábrica enterrada semi-profunda ($H=1$ m), cuña formada por losas alveolares Fuente: Elaboración propia.

Asientos producidos por las diferentes cargas y su envolvente

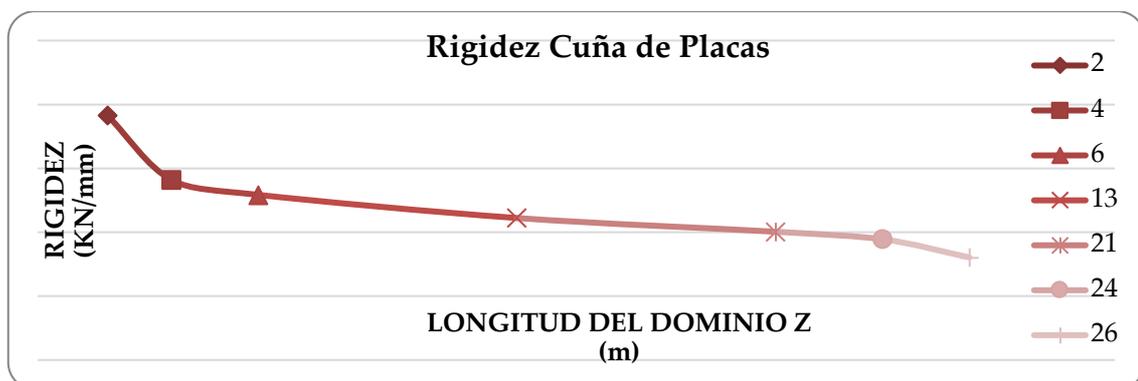
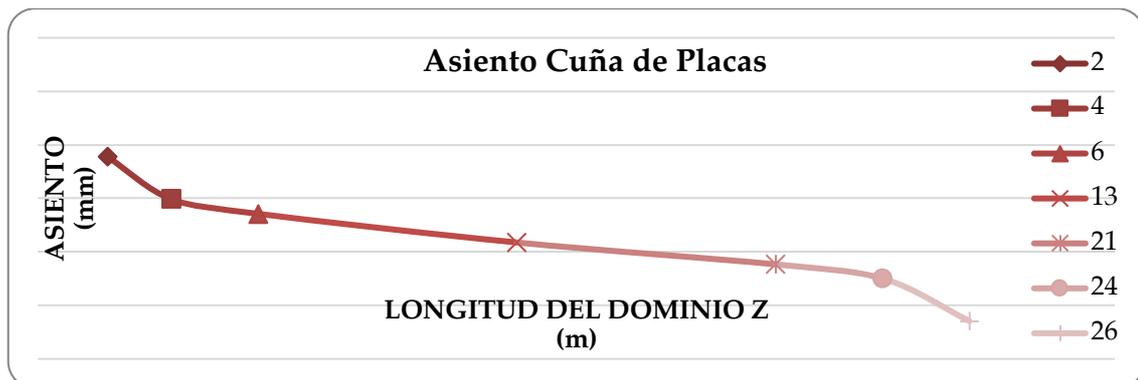


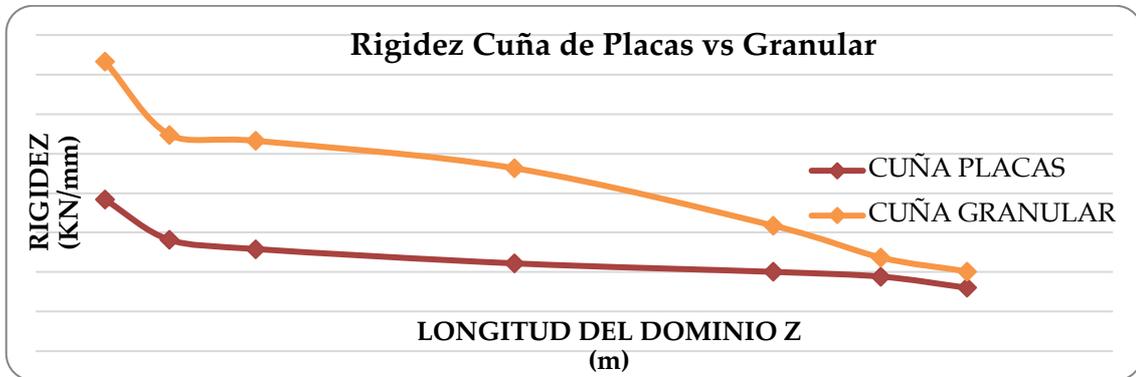
Gráfica 4.2.21 Asientos y envolvente de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda ($H=1$ m), cuña formada por losas. Fuente: Elaboración propia.

Resultados de la envolvente

Longitud del dominio Z (m)	Asiento bajo carga (mm)	Rigidez (KN/mm)
1.935	-1,11	77
3.735	-1,51	56
6.135	-1,64	52
13.335	-1,91	44
20.535	-2,12	40
23.535	-2,25	38
25.935	-2,64	32

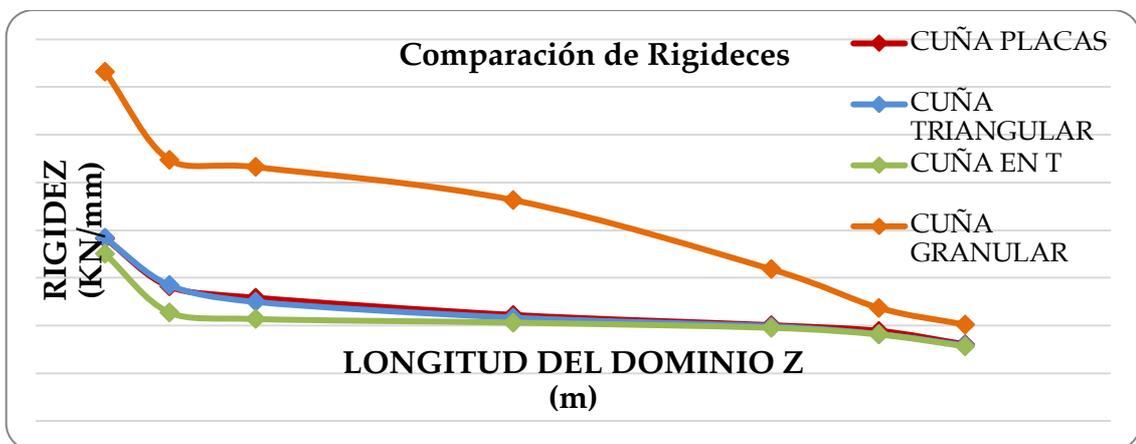
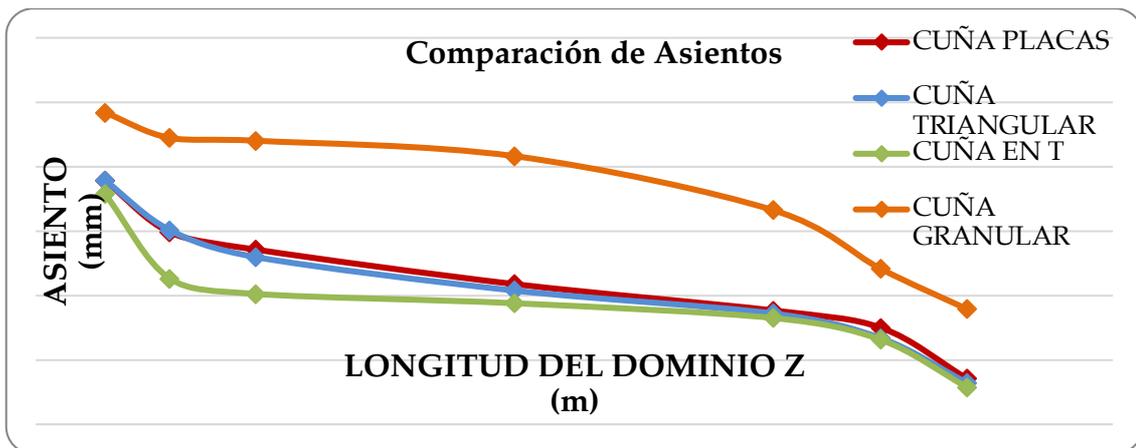
Tabla 4.2.16 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña formada por losas. Fuente: Elaboración propia.





Gráfica 4.2.22 Asientos, rigideces y comparación con la cuña granular de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña formada por losas. Fuente: Elaboración propia.

➤ Comparativa



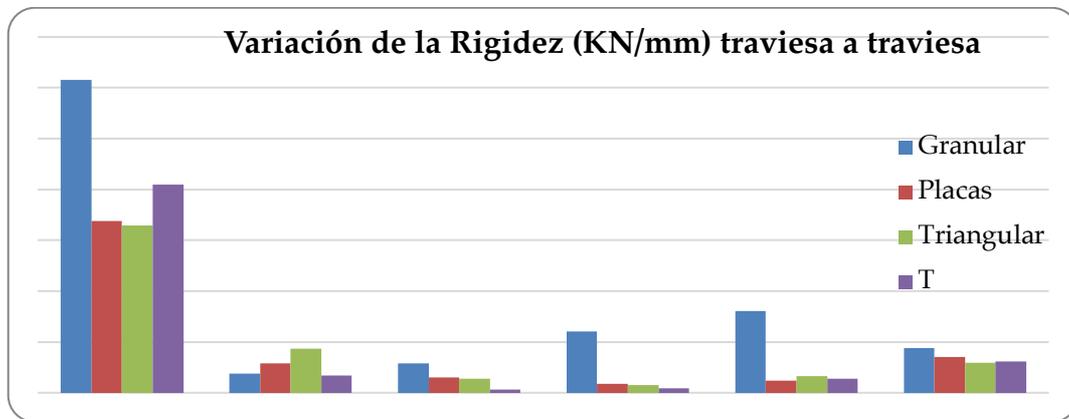
Gráfica 4.2.23 Comparativa entre los grupos de modelos. Fuente: Elaboración propia.

Comparación % variación rigidez	
$(K_{max}-K_o)/K_o * 100$	
Granular	262,64
Placas	138,47
Triangular	141,60
T	123,42

Tabla 4.2.17 Comparación en % de la variación total de rigidez en la transición. Fuente: Elaboración propia.

Variación de rigidez traviesa-traviesa				
$(K_{i+1}-K_i)/n$ traviesas KN/mm				
	Granular	Placas	Triangular	T
Carga 1-2	12,32	6,77	6,59	8,19
Carga 2-3	0,75	1,15	1,75	0,68
Carga 3-4	1,15	0,60	0,55	0,13
Carga 4-5	2,42	0,36	0,30	0,18
Carga 5-6	3,23	0,48	0,65	0,56
Carga 6-7	1,76	1,41	1,18	1,23
Media	3,61	1,80	1,84	1,83
Desviación Típica	4,36	2,47	2,38	3,14

Tabla 4.2.18 Comparación de variación de rigidez traviesa a traviesa. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4.2.24 Comparación de variación de rigidez traviesa a traviesa. Fuente: Elaboración propia.

Elevación de las cuñas mediante sistema de pilotes

La decisión de situar en este caso la cuña prefabricada a la misma cota inferior que la obra de drenaje, para así poder utilizar la misma cimentación para ambas estructuras, han conducido a resultados bastante satisfactorios, pero se desea estudiar también la influencia que tiene la diferencia de cotas superiores entre la obra de drenaje y la cuña prefabricada, puesto que ha resultado que 60 cm de material granular a esa profundidad puede sufrir deformaciones instantáneas a tener en cuenta.

Esto nos lleva a tener que elevar las cuñas mediante algún sistema hasta la misma cota superior que la obra de drenaje. A priori, la opción escogida es la de pilotar la cuña (siguiendo pues la misma metodología que para las cuñas que se utilizarán en estribos), aunque cualquier otro método que asegure la imposibilidad de movimiento vertical de la zona de apoyo de la cuña serviría de la misma manera.

Los modelos que representan la elevación de las cuñas se han realizado para los casos de cuña formada por losas y cuña en bloque triangular. El caso de cuña en forma de T no se ha realizado puesto que se ha visto que es el más desfavorable y no se mejoraría significativamente, aunque se elevara la cuña.

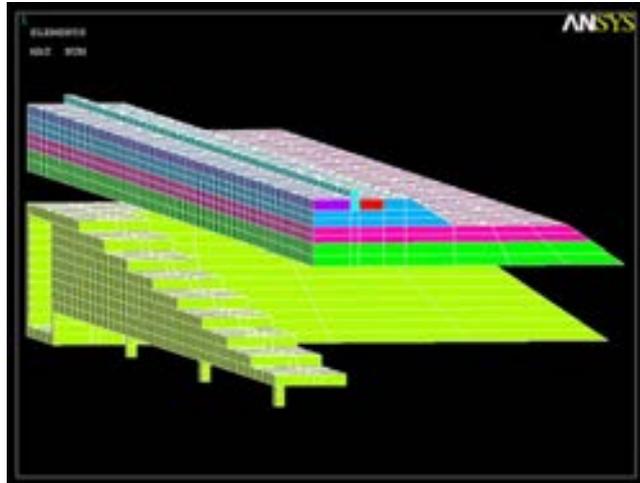
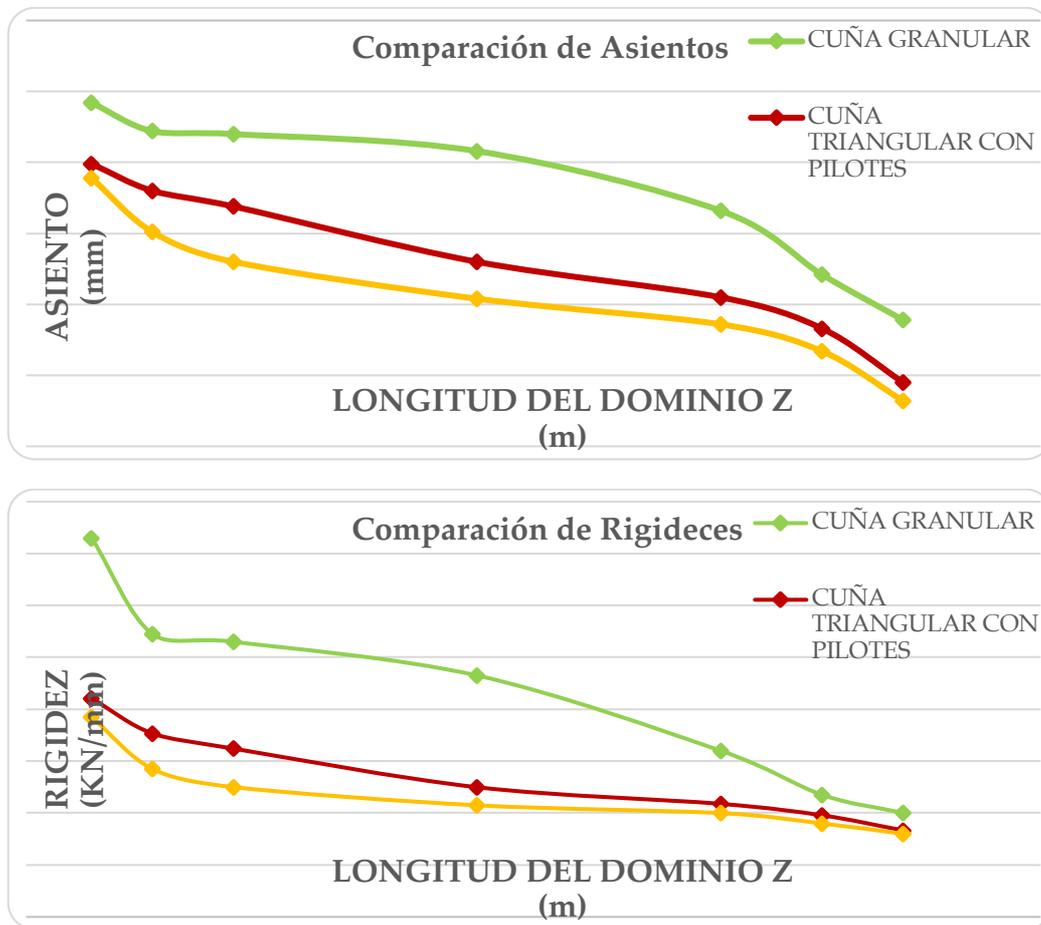


Figura 4.2.54 Modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda ($H=1$ m), cuña triangular pilotada. Fuente: Elaboración propia.

➤ **Cuña bloque triangular con pilotes**

Cuña triangular con pilotes		
Longitud del dominio Z (m)	Asiento bajo carga (mm)	Rigidez (KN/mm)
1.935	-1,01	84,23
3.735	-1,20	70,68
6.135	-1,31	64,84
13.335	-1,70	49,96
20.535	-1,95	43,56
23.535	-2,17	39,14
25.935	-2,55	33,31

Tabla 4.2.19 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda ($H=1$ m), cuña triangular pilotada. Fuente: Elaboración propia.

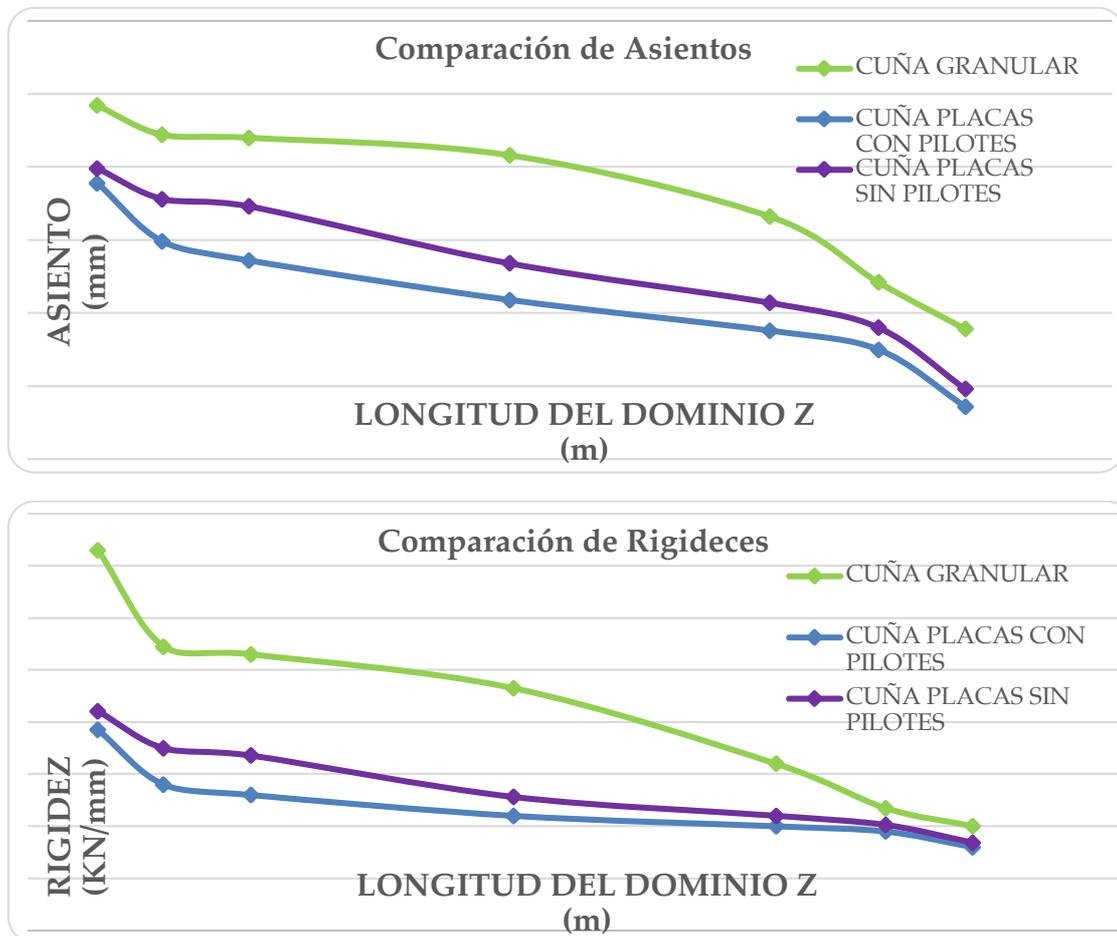


Gráfica 4.2.25 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda ($H=1$ m), cuña triangular pilotada y sin pilotar. Fuente: Elaboración propia.

➤ **Cuña formada por losas con pilotes**

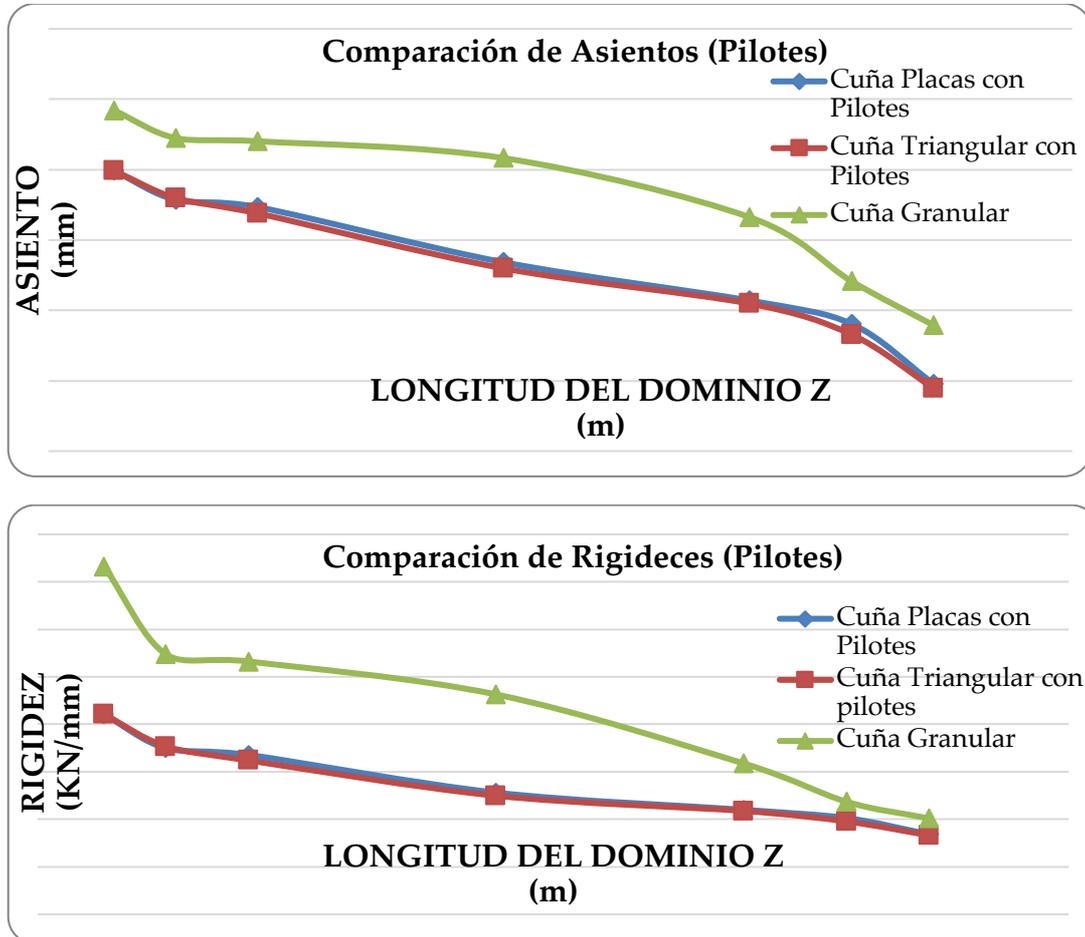
Cuña formada por losas con pilotes		
Longitud del dominio Z (m)	Asiento bajo carga (mm)	Rigidez (KN/mm)
1.935	-1,01	84,17
3.735	-1,22	69,94
6.135	-1,27	67,14
13.335	-1,66	51,27
20.535	-1,93	44,05
23.535	-2,10	40,56
25.935	-2,52	33,72

Tabla 4.2.20 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda (H=1 m), cuña formada por losas pilotada. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4.2.26 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada semi-profunda ($H=1$ m), cuña formada por losas pilotada y sin pilotar. Fuente: Elaboración propia.

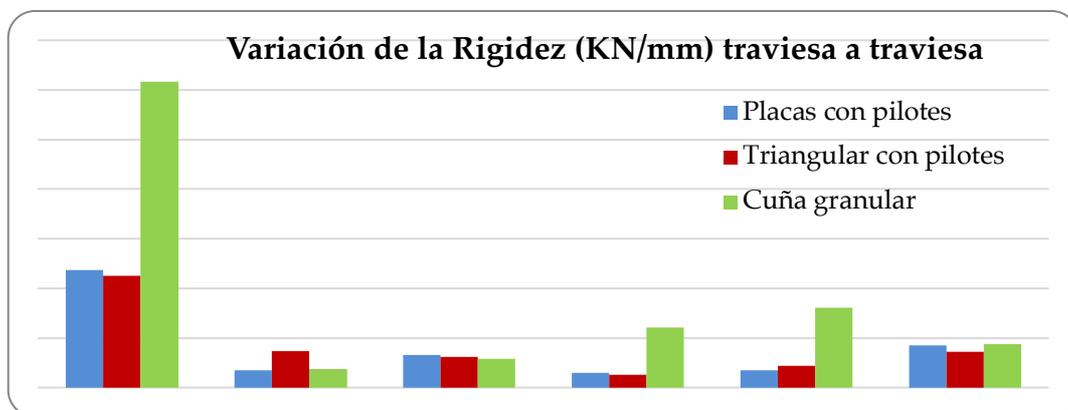
➤ Comparativa de resultados



Gráfica 4.2.27 Comparativa entre los grupos de modelos. Fuente: Elaboración propia.

Variación de rigidez traviesa-traviesa						
$(K_{i+1}-K_i)/n$ traviesas KN/mm						
	Granular	Placas	Triangular	T	Triangular Pilotes	Placas Pilotes
Carga 1-2	12,32	6,77	6,59	8,19	4,51	4,75
Carga 2-3	0,75	1,15	1,75	0,68	1,46	0,70
Carga 3-4	1,15	0,60	0,55	0,13	1,24	1,32
Carga 4-5	2,42	0,36	0,30	0,18	0,53	0,60
Carga 5-6	3,23	0,48	0,65	0,56	0,88	0,70
Carga 6-7	1,76	1,41	1,18	1,23	1,46	1,71
Media	3,61	1,80	1,84	1,83	1,68	1,63
Desviación Típica	4,36	2,47	2,38	3,14	1,43	1,59

Tabla 4.2.21 Comparación de variación de rigidez traviesa a traviesa. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4.2.28 Comparación de variación de rigidez traviesa a traviesa. Fuente: Elaboración propia.

En este caso se puede observar que las cuñas pilotadas mejoran el comportamiento de las cuñas, pero no lo suficiente como para realizar este tipo de actuación en la realidad. Así pues, se puede decir que para el caso estudiado las cuñas prefabricadas compuesta por losas y la cuña bloque triangular tienen un

buen comportamiento, mientras que la cuña en forma de T está un poco por debajo de estas.

4.2.3.3 Obra de fábrica enterrada profunda. H= 2,4 m

➤ **Cuña granular**

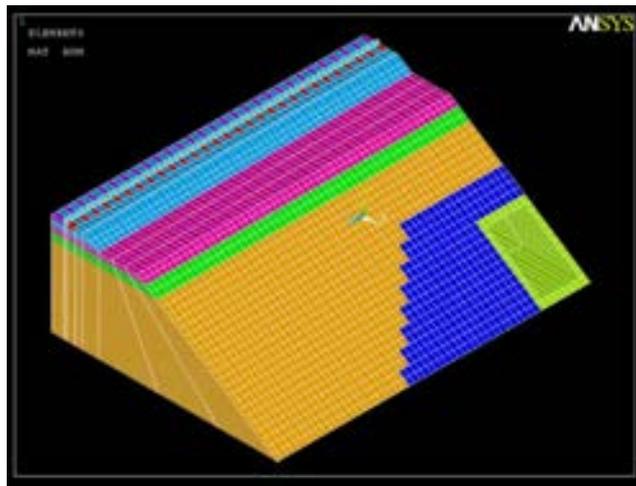


Figura 4.2.55 Modelo de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.

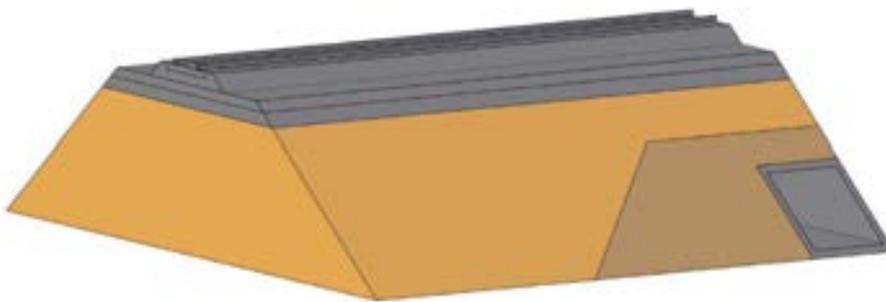
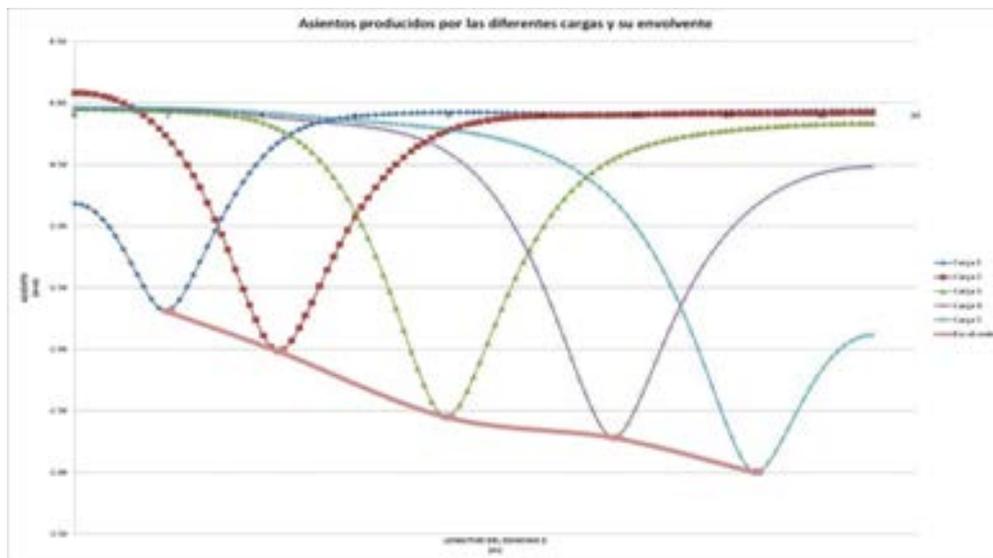


Figura 4.2.56 Esquema de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.

Asientos producidos por las diferentes cargas y su envolvente

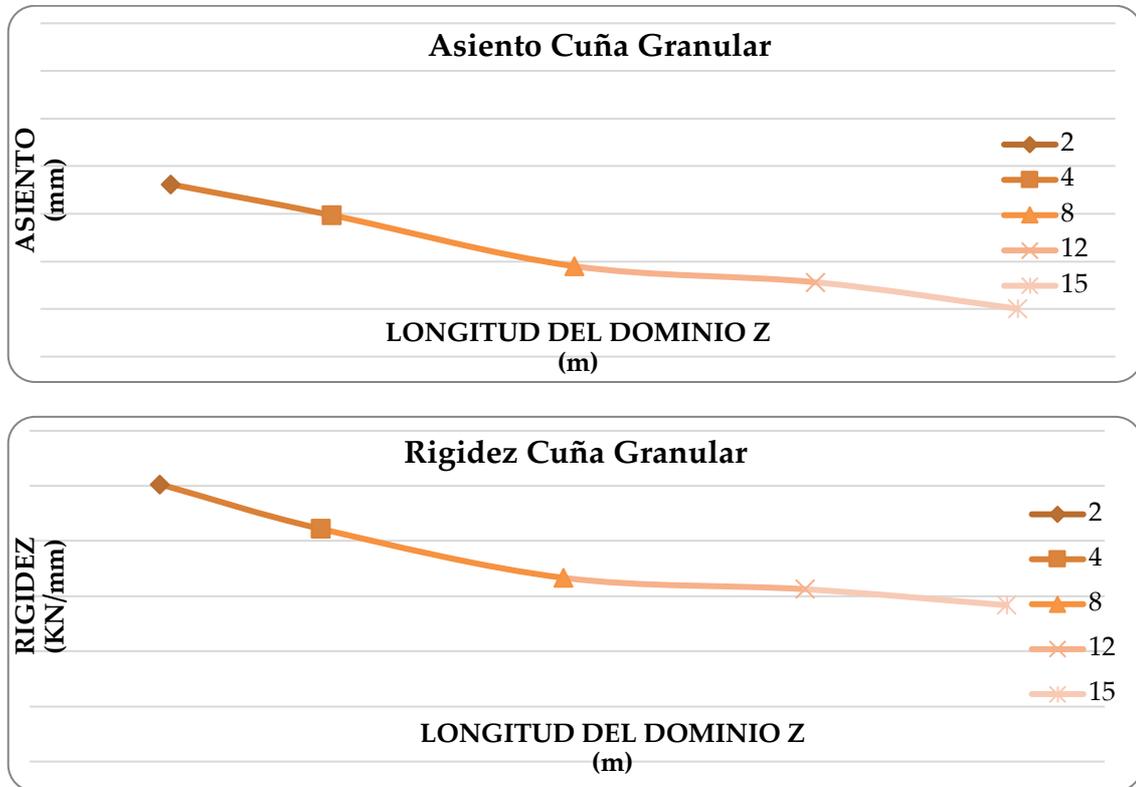


Gráfica 4.2.29 Asientos y envolvente de modelo de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.

Resultados de la envolvente

Longitud del dominio Z (m)	Asiento bajo carga (mm)	Rigidez (KN/mm)
1.935	-1,69	50
4.335	-2,01	42
7.935	-2,55	33
11.535	-2,72	31
14.535	-3,00	28

Tabla 4.2.22 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4.2.30 Asientos y rigideces modelo de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.

➤ **Cuña en forma de T**

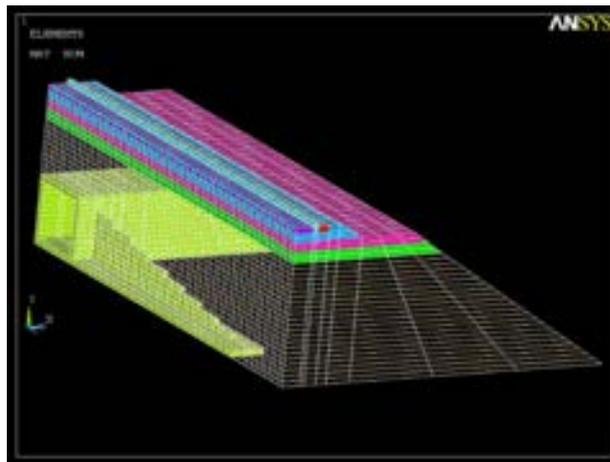


Figura 4.2.57 Modelo de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.

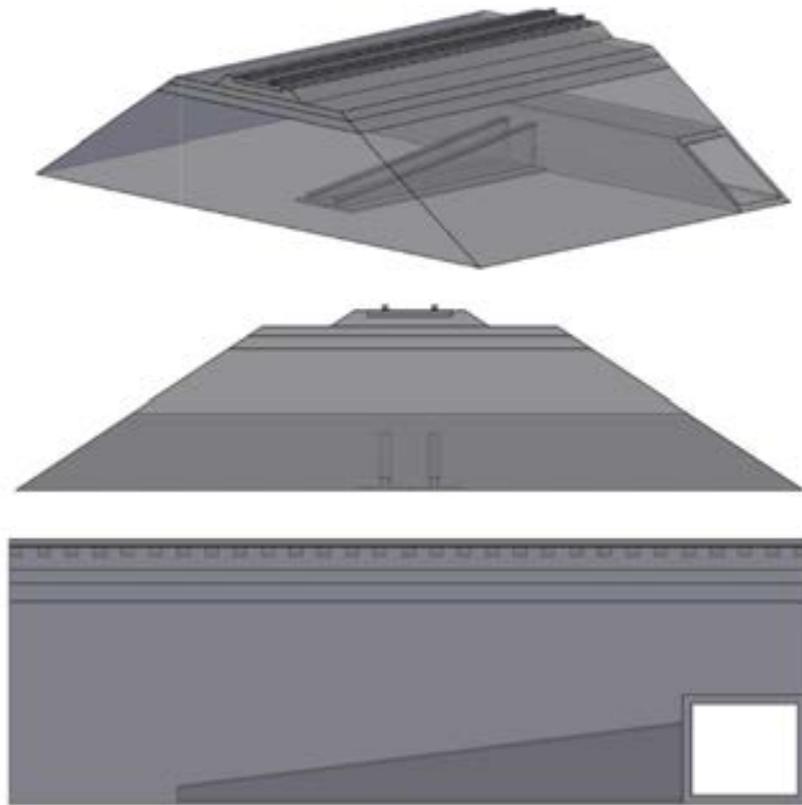
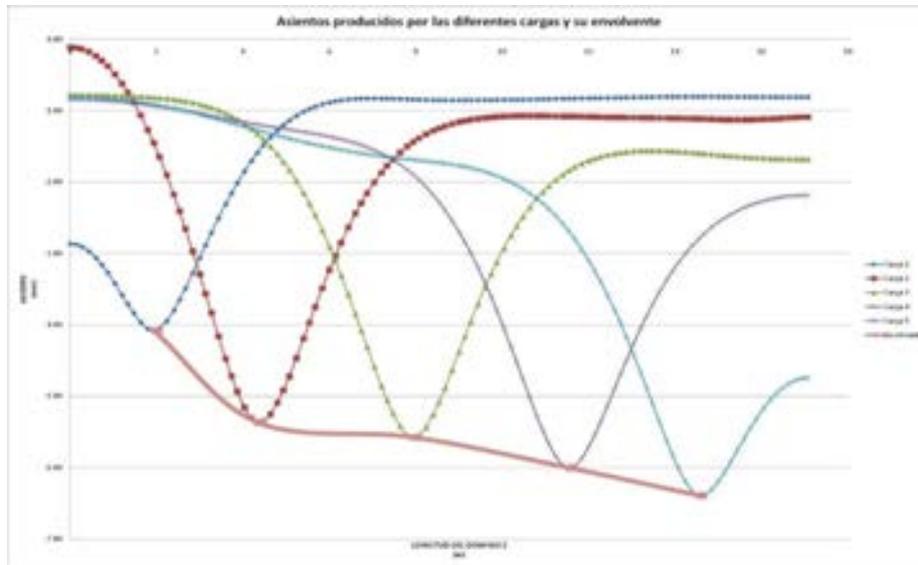


Figura 4.2.58 Esquemas de obra de fábrica enterrada profunda ($H=2,4$ m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.

Asientos producidos por las diferentes cargas y su envolvente

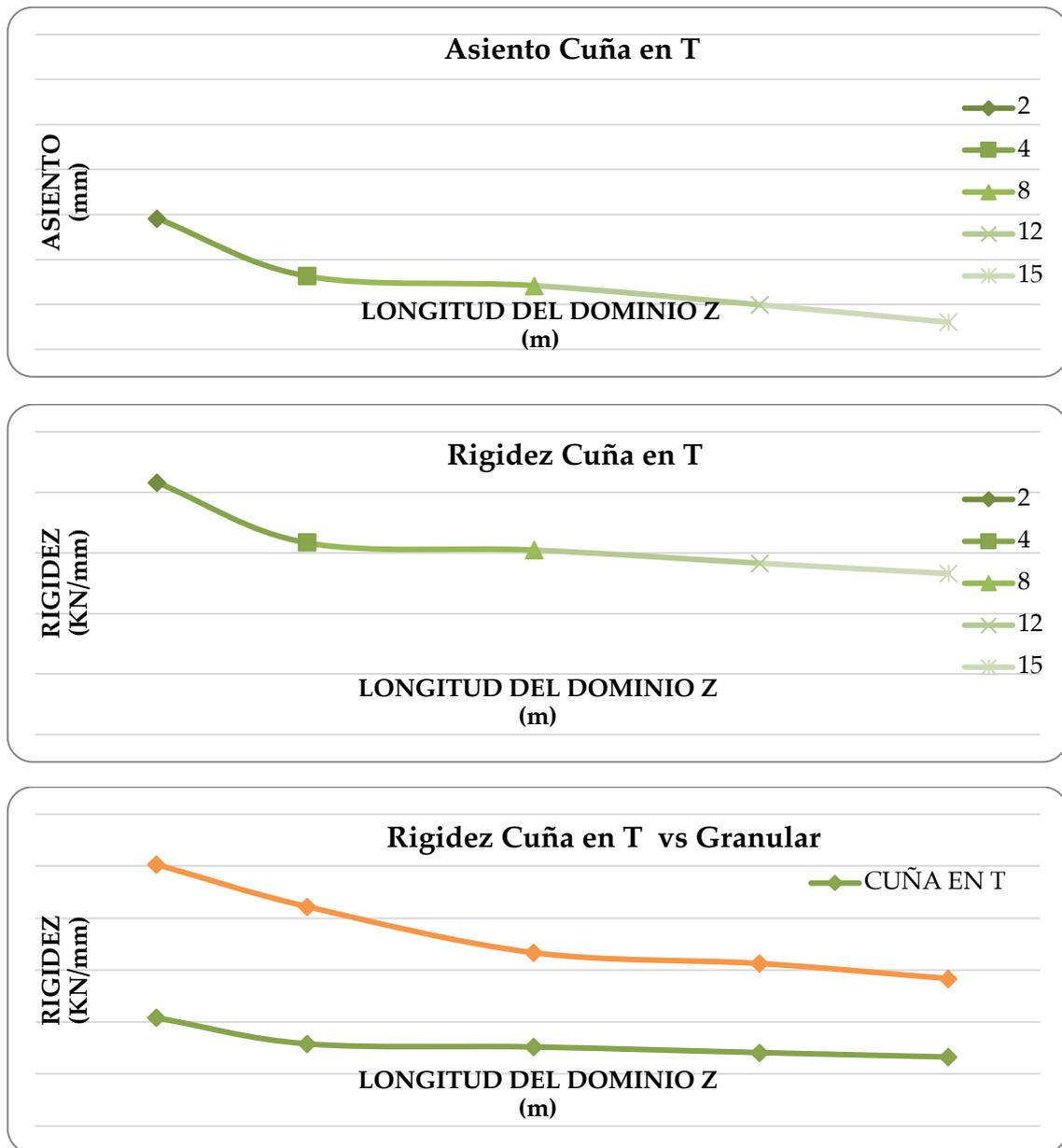


Gráfica 4.2.31 Asientos y envolvente de modelo de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.

Resultados de la envolvente

Longitud del dominio Z (m)	Asiento bajo carga (mm)	Rigidez (KN/mm)
1.935	-4,08	21
4.335	-5,37	16
7.935	-5,58	15
11.535	-6,01	14
14.535	-6,39	13

Tabla 4.2.23 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4.2.32 Asientos, rigideces y comparación con la cuña granular de modelo de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.

➤ **Cuña bloque triangular**

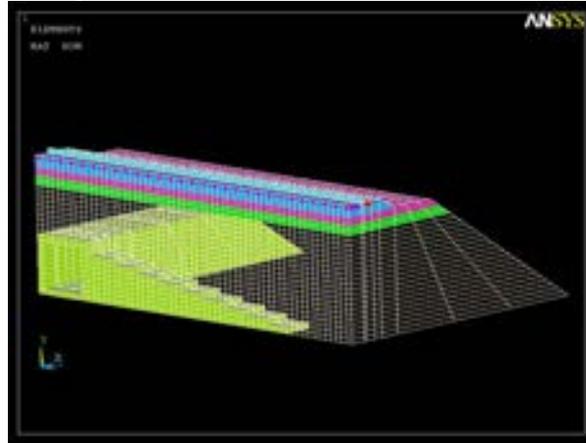


Figura 4.2.59 Modelo de obra de fábrica enterrada profunda ($H=2,4$ m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia.

a. Cuña triangular maciza

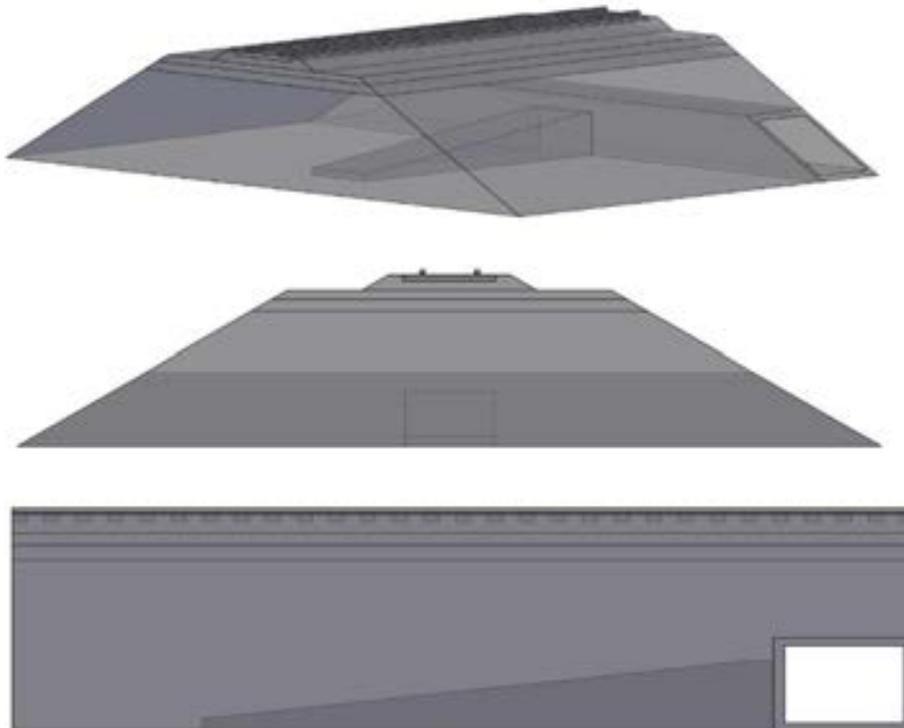


Figura 4.2.60 Esquema de obra de fábrica enterrada profunda ($H=2,4$ m), cuña triangular maciza. Fuente: Elaboración propia.

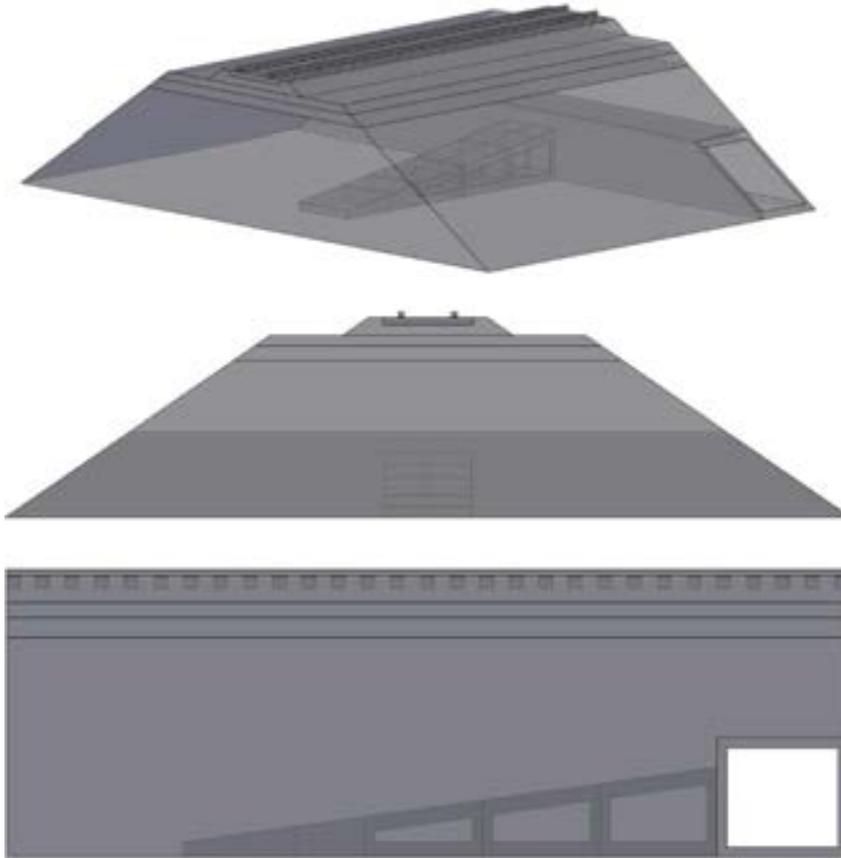
b. Cuña triangular hueca formada por módulos

Figura 4.2.61 Esquema de obra de fábrica enterrada profunda ($H=2,4$ m), cuña triangular hueca formada por módulos. Fuente: Elaboración propia.

c. Cuña triangular hueca formada con vigas en forma de T y losas

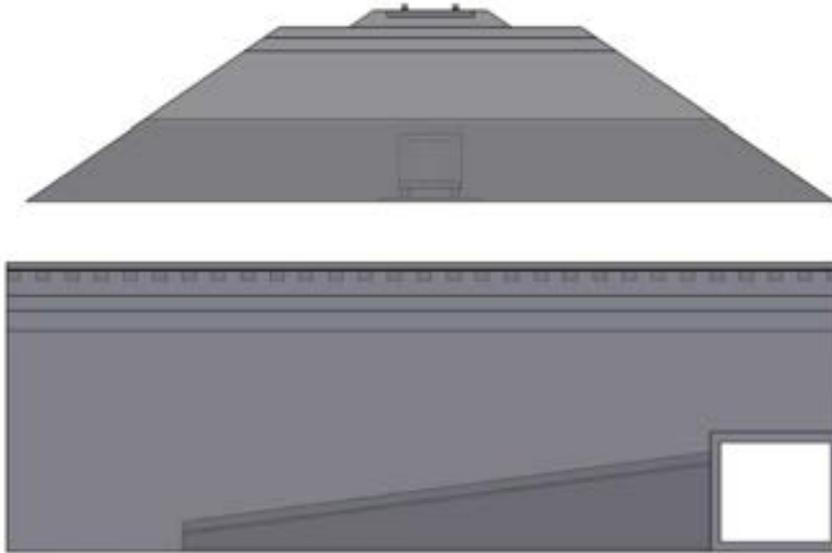
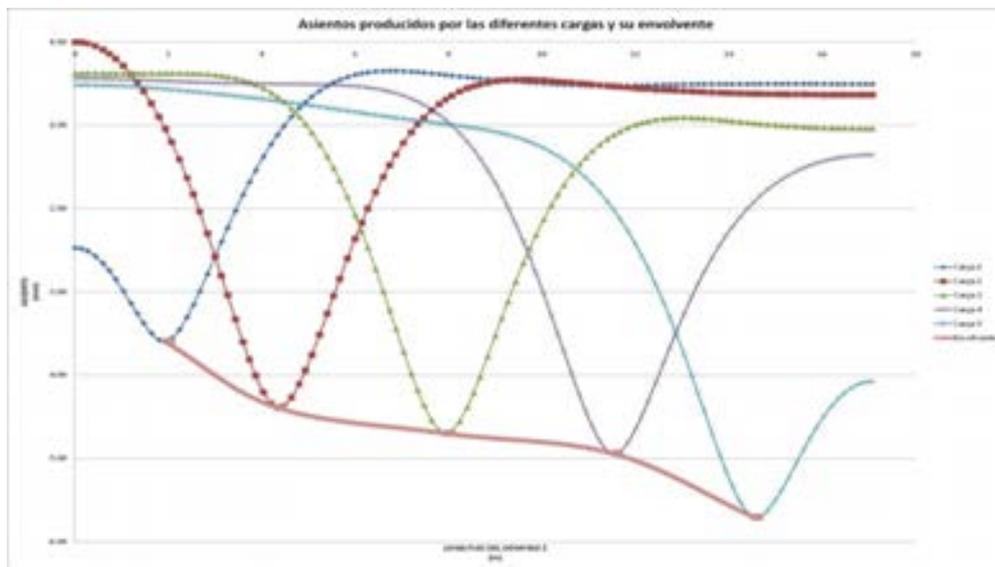


Figura 4.2.62 Esquema de obra de fábrica enterrada profunda ($H=2,4$ m), cuña triangular hueca formada con vigas en forma de T y losas. Fuente: Elaboración propia.

Asientos producidos por las diferentes cargas y su envolvente

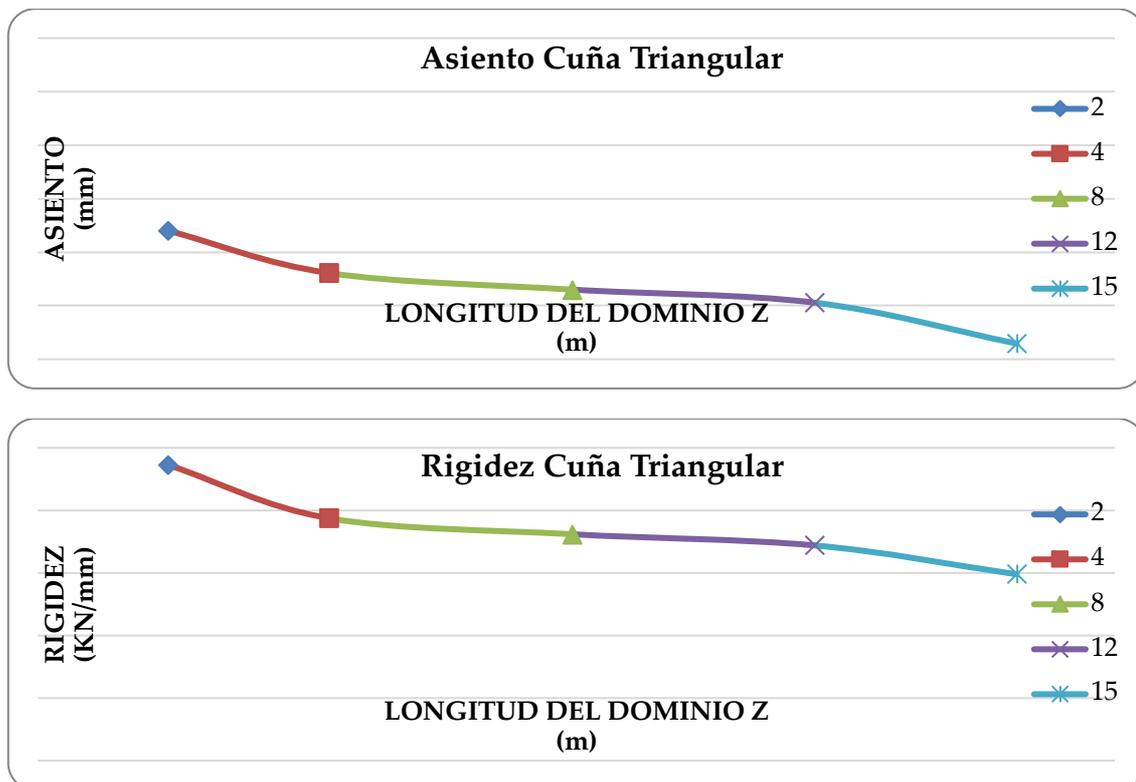


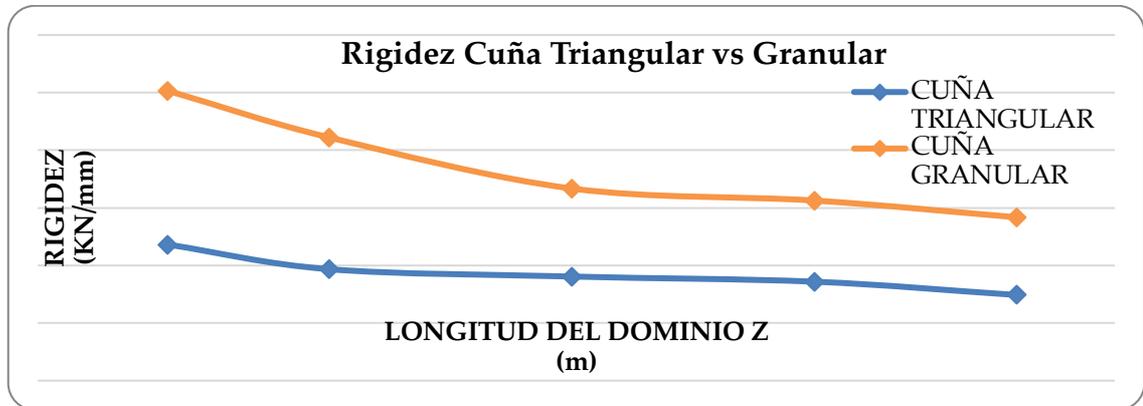
Gráfica 4.2.33 Asientos y envolvente de modelo de obra de fábrica enterrada profunda ($H=2,4$ m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia.

Resultados de la envolvente

Longitud del dominio Z (m)	Asiento bajo carga (mm)	Rigidez (KN/mm)
1.935	-3,60	24
4.335	-4,39	19
7.935	-4,70	18
11.535	-4,94	17
14.535	-5,71	15

Tabla 4.2.24 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia.





Gráfica 4.2.34 Asientos, rigideces y comparación con la cuña granular de modelo de obra de fábrica enterrada profunda ($H=2,4$ m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia.

➤ **Cuña formada por losas**

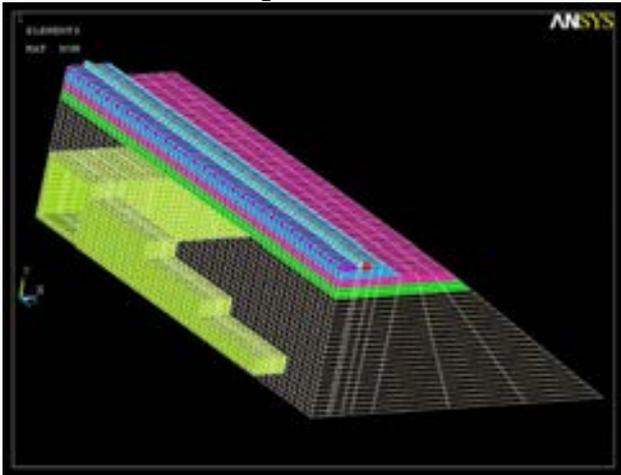


Figura 4.2.63 Modelo de obra de fábrica enterrada profunda ($H=2,4$ m), cuña formada por losas. Fuente: Elaboración propia.

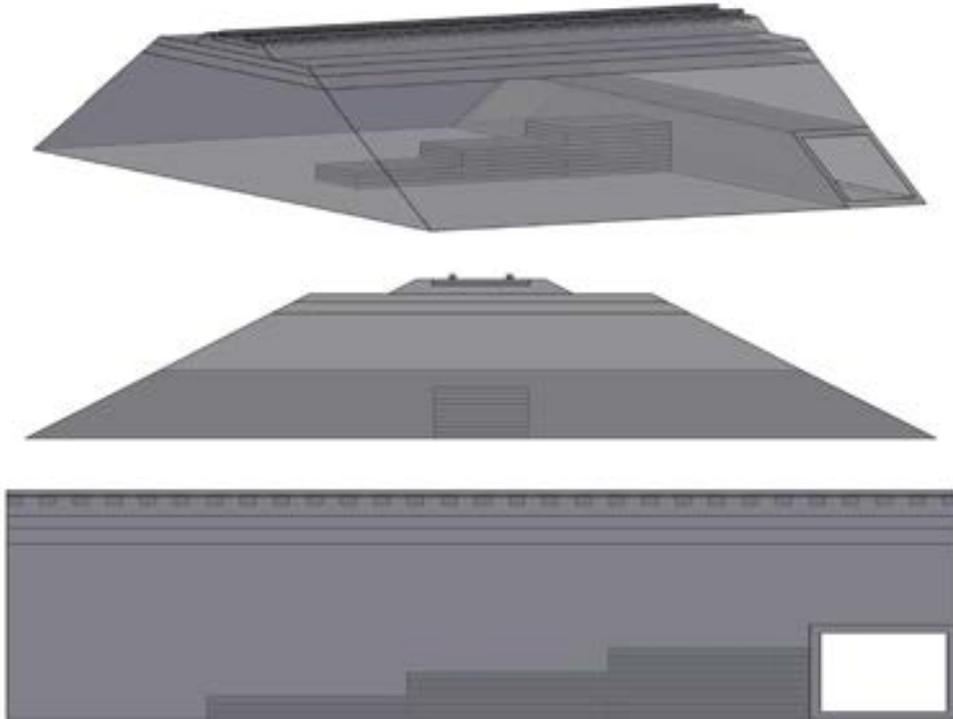
a. Cuña formada por losas macizas

Figura 4.2.64 Esquema de obra de fábrica enterrada profunda ($H=2,4$ m), cuña formada por losas macizas. Fuente: Elaboración propia.

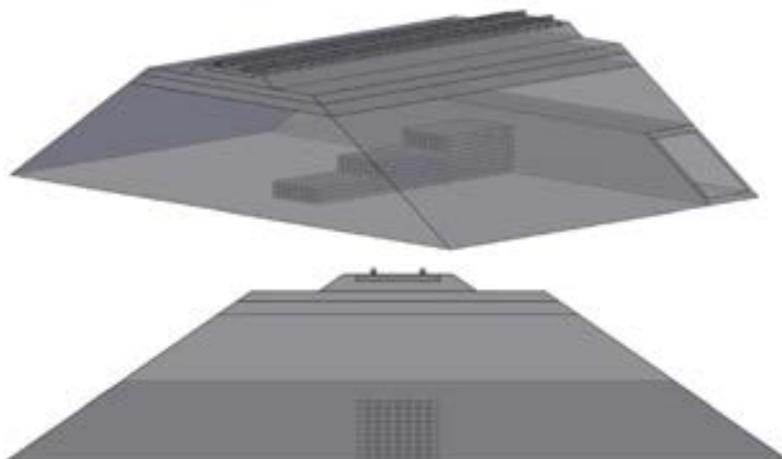
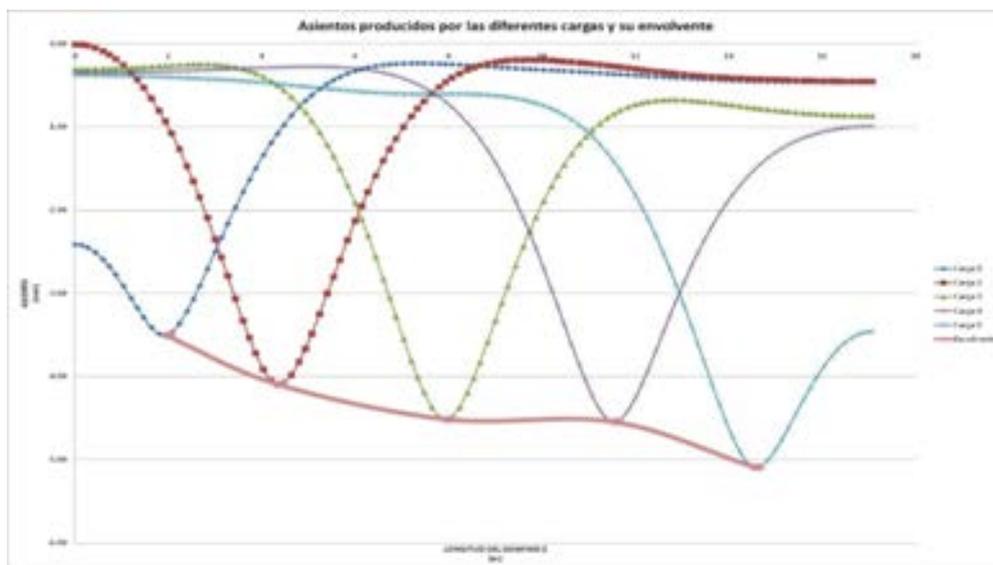
b. Cuña formada por losas alveolares



Figura 4.2.65 Esquema de obra de fábrica enterrada profunda ($H=2,4$ m), cuña formada por losas alveolares Fuente: Elaboración propia.

Asientos producidos por las diferentes cargas y su envolvente

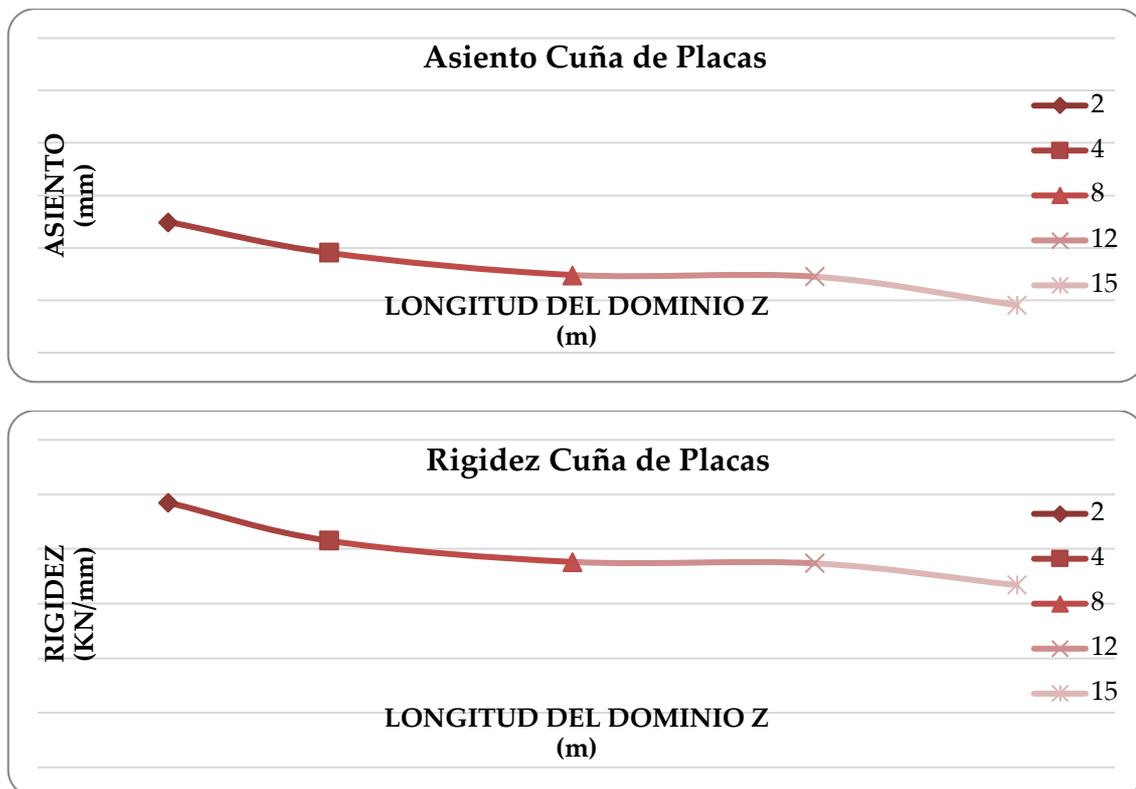


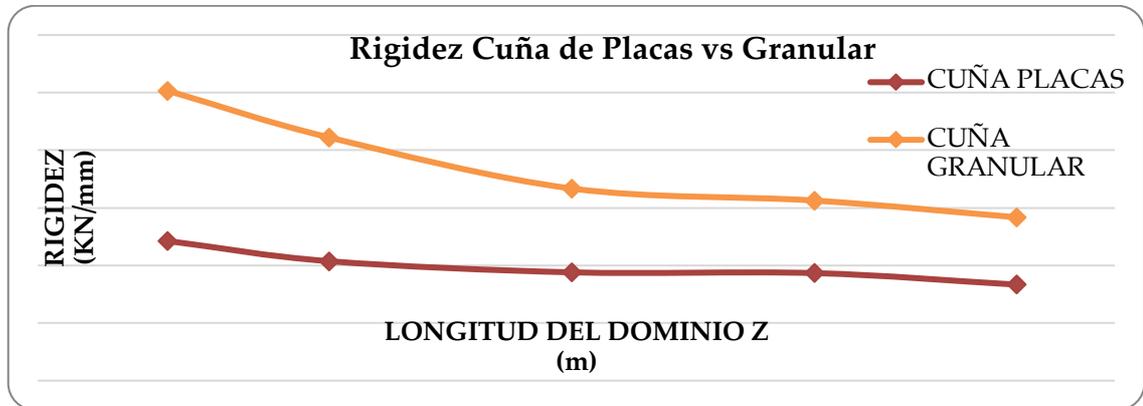
Gráfica 4.2.35 Asientos y envolvente de modelo de obra de fábrica enterrada profunda ($H=2,4$ m), cuña formada por losas. Fuente: Elaboración propia.

Resultados de la envolvente

Longitud del dominio Z (m)	Asiento bajo carga (mm)	Rigidez (KN/mm)
1.935	-3,50	24
4.335	-4,10	21
7.935	-4,52	19
11.535	-4,55	19
14.535	-5,09	17

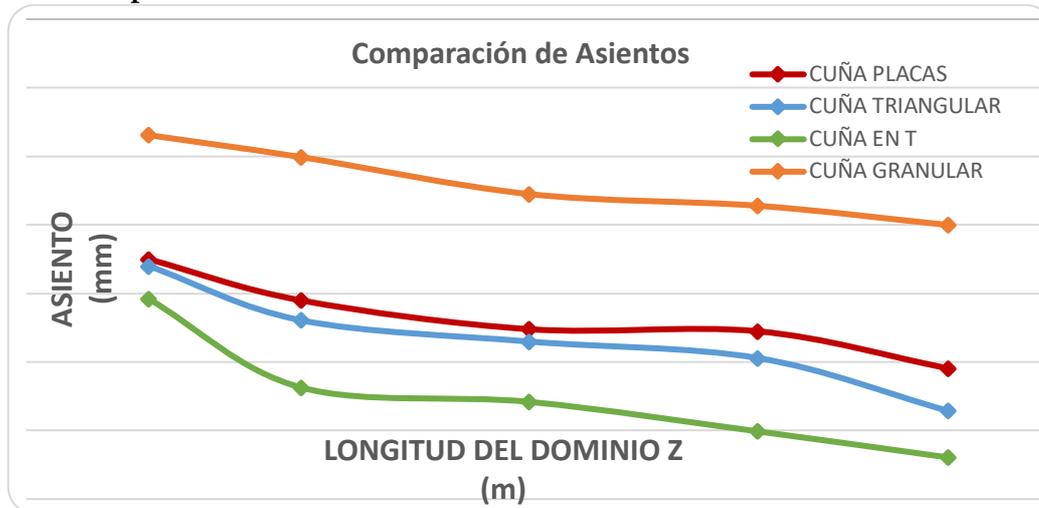
Tabla 4.2.25 Asientos y rigideces de modelo de obra de fábrica enterrada profunda (H=2,4 m), cuña formada por losas. Fuente: Elaboración propia.

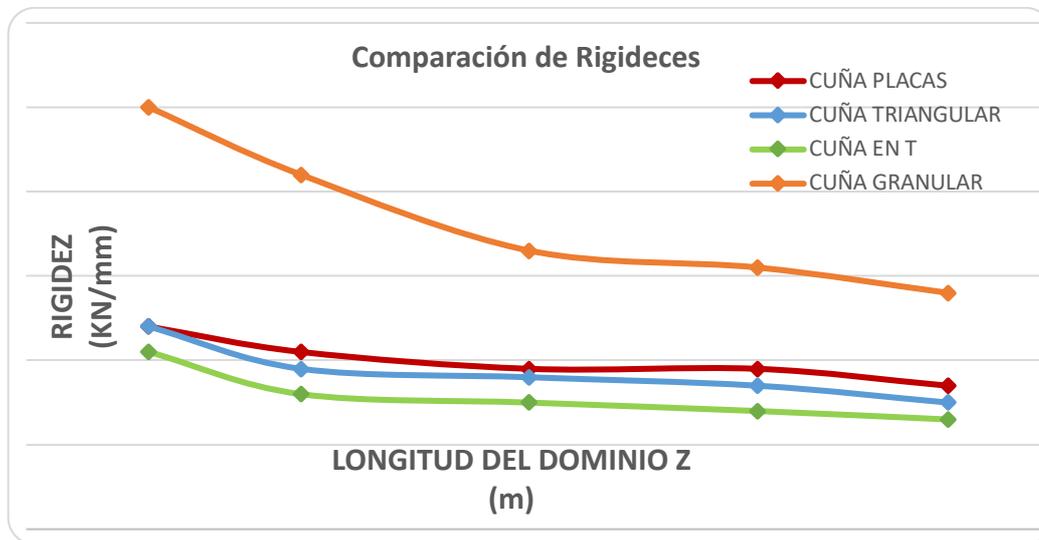




Gráfica 4.2.36 Asientos, rigideces y comparación con la cuña granular de modelo de obra de fábrica enterrada profunda ($H=2,4$ m), cuña formada por losas. Fuente: Elaboración propia.

➤ **Comparativa**





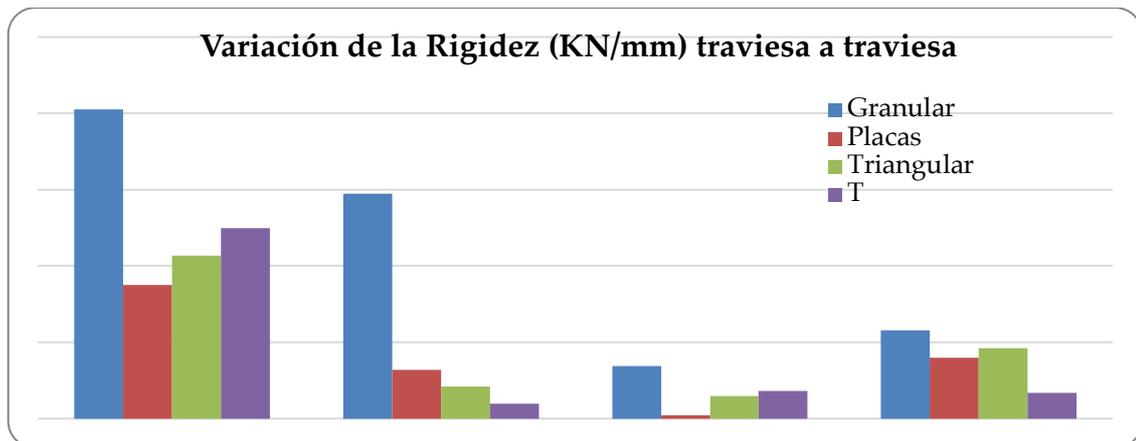
Gráfica 4.2.37 Comparativa entre los grupos de modelos. Fuente: Elaboración propia.

Comparación % variación rigidez (Kmax-Ko)/Ko*100	
Granular	77,31
Placas	45,29
Triangular	58,64
T	56,61

Tabla 4.2.26 Comparación en % de la variación total de rigidez en la transición. Fuente: Elaboración propia.

Variación de rigidez traviesa-traviesa				
$(K_{i+1}-K_i)/n$ traviesas KN/mm				
	Granular	Placas	Triangular	T
Carga 1-2	2,03	0,88	1,07	1,25
Carga 2-3	1,48	0,32	0,21	0,10
Carga 3-4	0,35	0,02	0,15	0,18
Carga 4-5	0,58	0,40	0,46	0,17
Media	1,11	0,40	0,47	0,42
Desviación Típica	0,78	0,35	0,42	0,55

Tabla 4.2.27 Comparación de variación de rigidez traviesa a traviesa. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4.2.38 Comparación de variación de rigidez traviesa a traviesa. Fuente: Elaboración propia.

En este caso se puede observar que las cuñas prefabricadas formadas por losas tienen un comportamiento muy bueno como transición de rigidez, seguido de la cuña triangular y posteriormente de la cuña en forma de T. Recordemos que, a valores de media parecidos, es mejor tener un valor de desviación típica menor, puesto que significa que los valores se alejan menos de esa media.

4.2.3.4 Estructura rasante

➤ Cuña granular

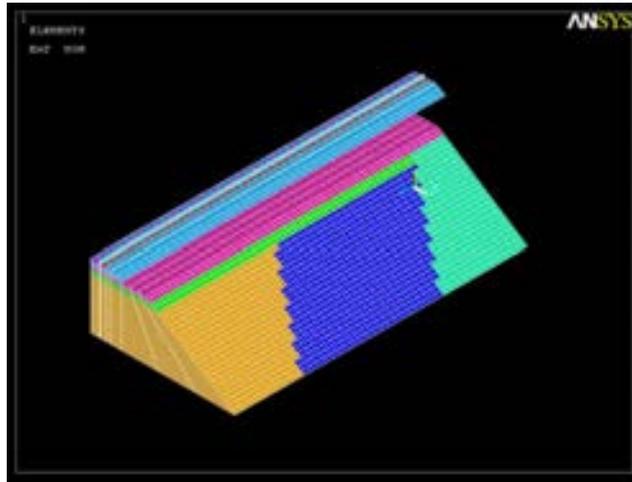


Figura 4.2.66 Modelo de estructura a rasante ($H=2,4$ m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.

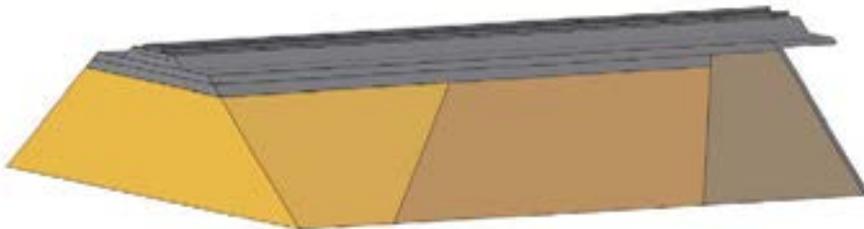
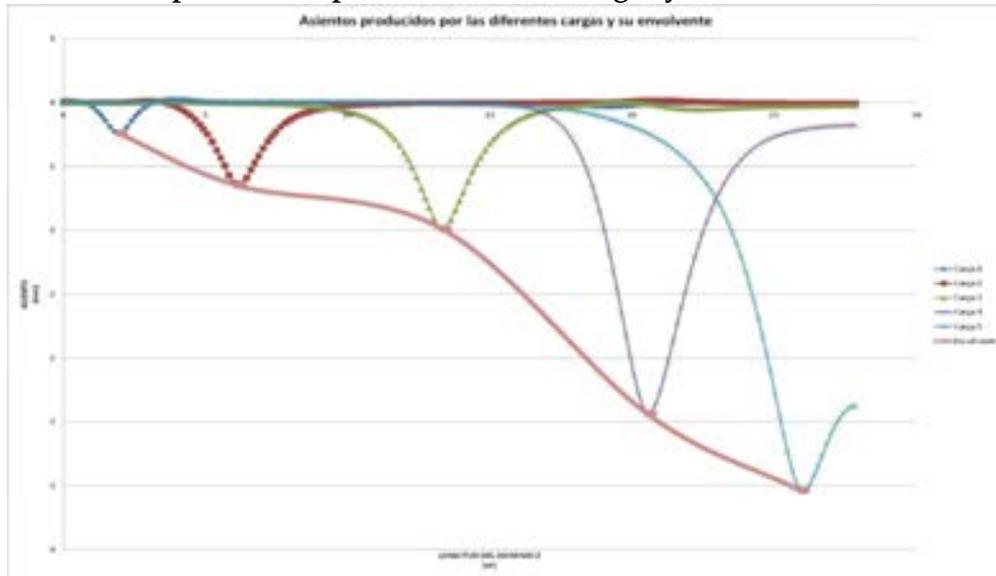


Figura 4.2.67 Esquema de estructura a rasante ($H=2,4$ m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.

Asientos producidos por las diferentes cargas y su envolvente

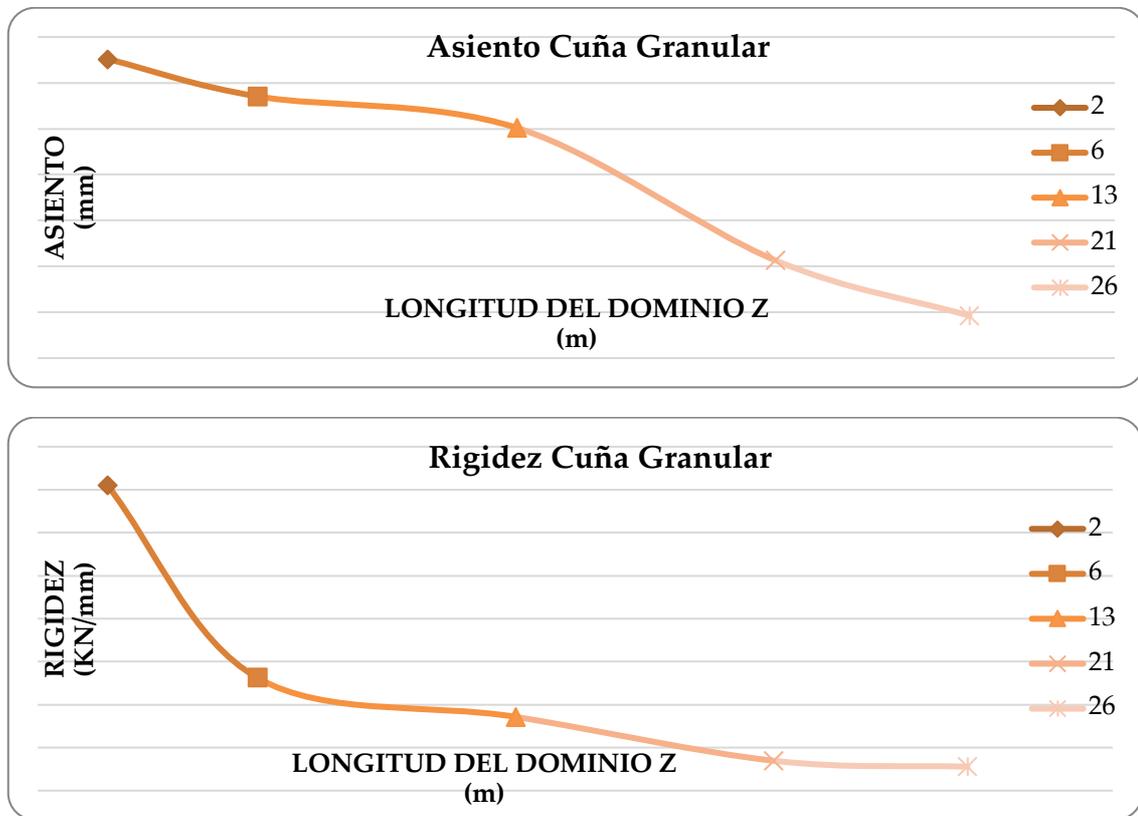


Gráfica 4.2.39 Asientos y envolvente de modelo de estructura a rasante ($H=2,4$ m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.

Resultados de la envolvente

Longitud del dominio Z (m)	Asiento bajo carga (mm)	Rigidez (KN/mm)
1.935	-0,24	356
6.135	-0,65	131
13.335	-0,99	86
20.535	-2,43	35
25.935	-3,04	28

Tabla 4.2.28 Asientos y rigideces de modelo de estructura a rasante ($H=2,4$ m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4.2.40 Asientos y rigideces modelo de estructura a rasante (H=2,4 m), cuña granular. Fuente: Elaboración propia.

➤ **Cuña en forma de T**

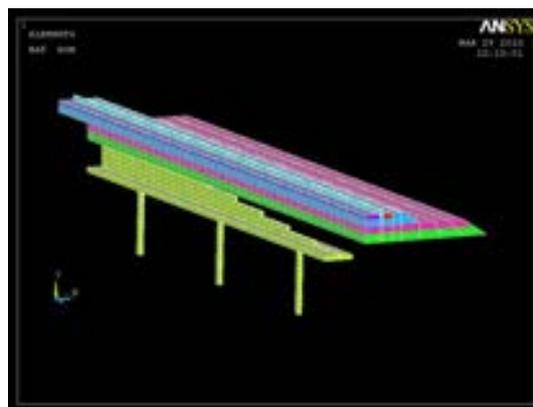


Figura 4.2.68 Modelo de estructura a rasante (H=2,4 m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.

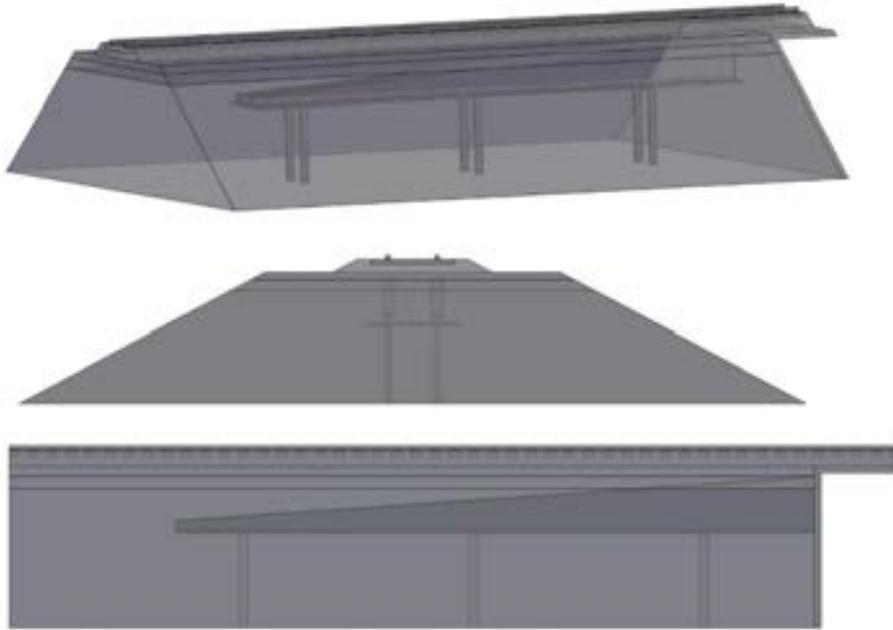
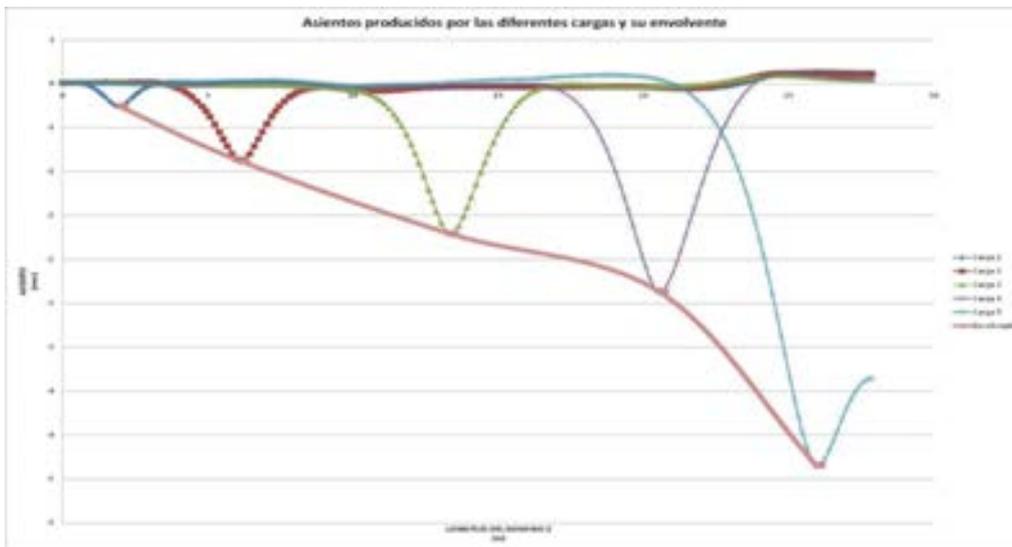


Figura 4.2.69 Esquemas de estructura a rasante ($H=2,4$ m), cuña en forma de T.
Fuente: Elaboración propia.

Asientos producidos por las diferentes cargas y su envolvente

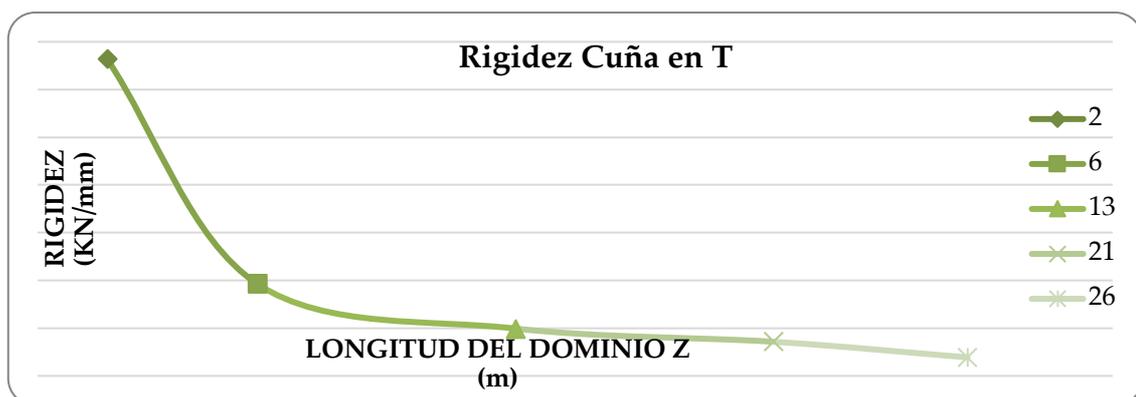
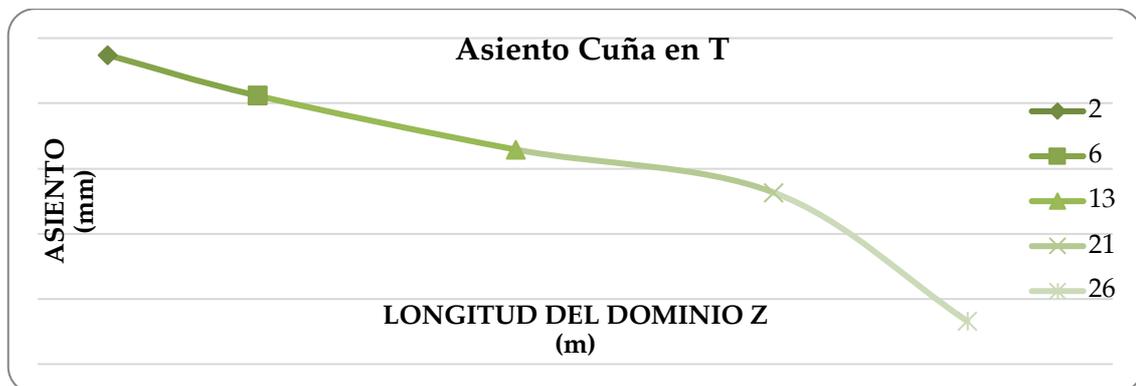


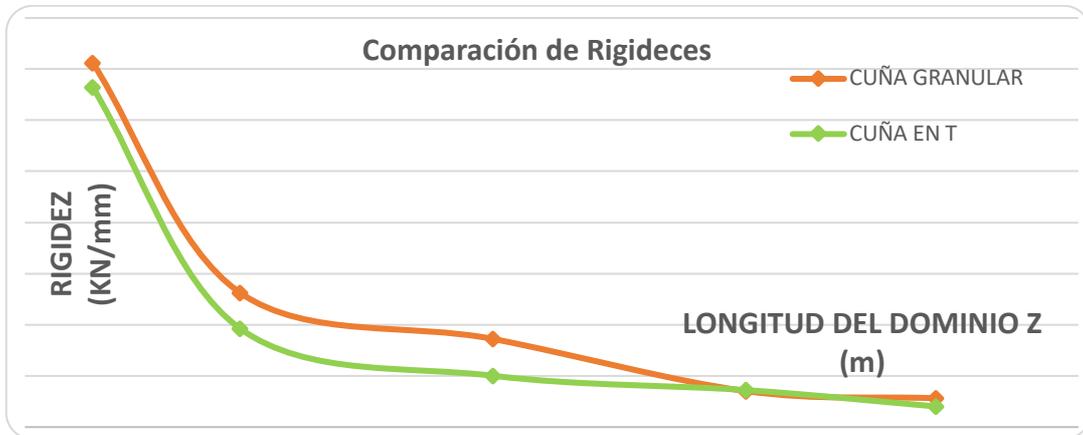
Gráfica 4.2.41 Asientos y envolvente de modelo de estructura a rasante ($H=2,4$ m),
cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.

Resultados de la envolvente

Longitud del dominio Z (m)	Asiento bajo carga (mm)	Rigidez (KN/mm)
1.935	-0,26	332
6.135	-0,88	96
13.335	-1,71	50
20.535	-2,37	36
25.935	-4,34	20

Tabla 4.2.29 Asientos y rigideces de modelo de estructura a rasante (H=2,4 m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.





Gráfica 4.2.42 Asientos, rigideces y comparación con la cuña granular de modelo de estructura a rasante ($H=2,4$ m), cuña en forma de T. Fuente: Elaboración propia.

➤ **Cuña bloque triangular**

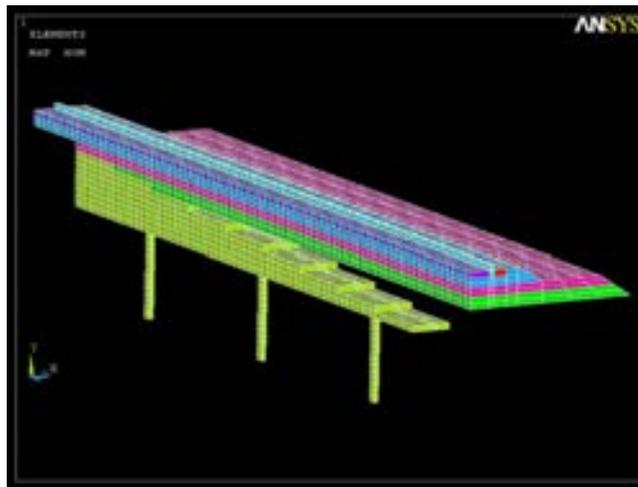


Figura 4.2.70 Modelo de estructura a rasante ($H=2,4$ m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia.

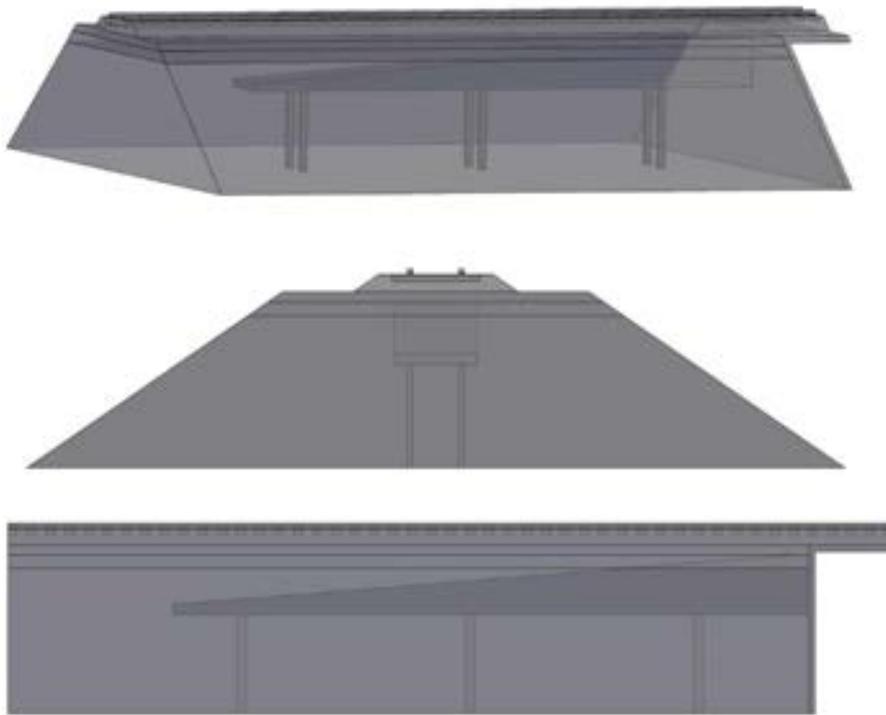
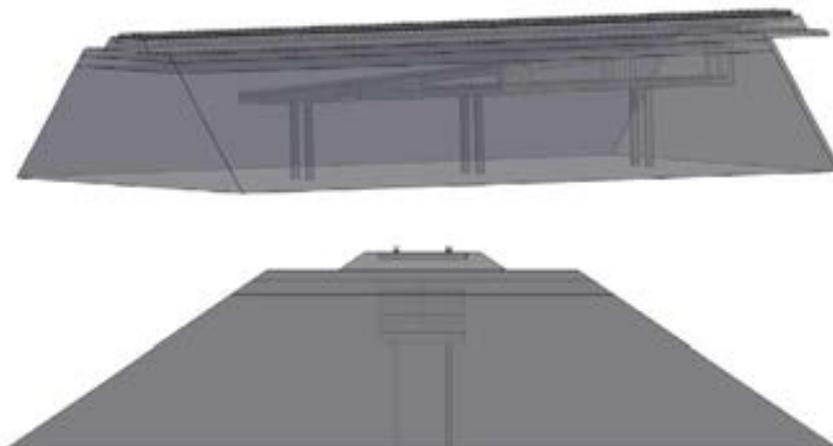
a. Cuña triangular maciza

Figura 4.2.71 Esquema de estructura a rasante ($H=2,4$ m), cuña triangular maciza.
Fuente: Elaboración propia.

b. Cuña triangular hueca formada por módulos

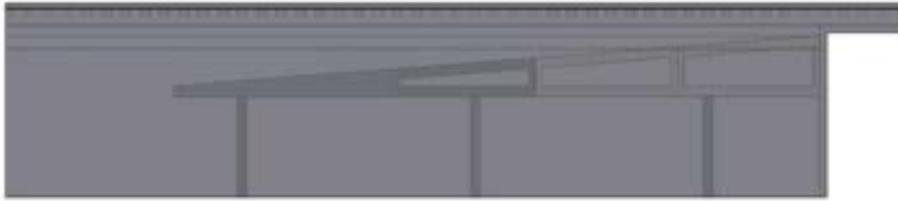


Figura 4.2.72 Esquema de estructura a rasante (H=2,4 m), cuña triangular hueca formada por módulos. Fuente: Elaboración propia

c. Cuña triangular hueca formada con vigas en forma de T y losas

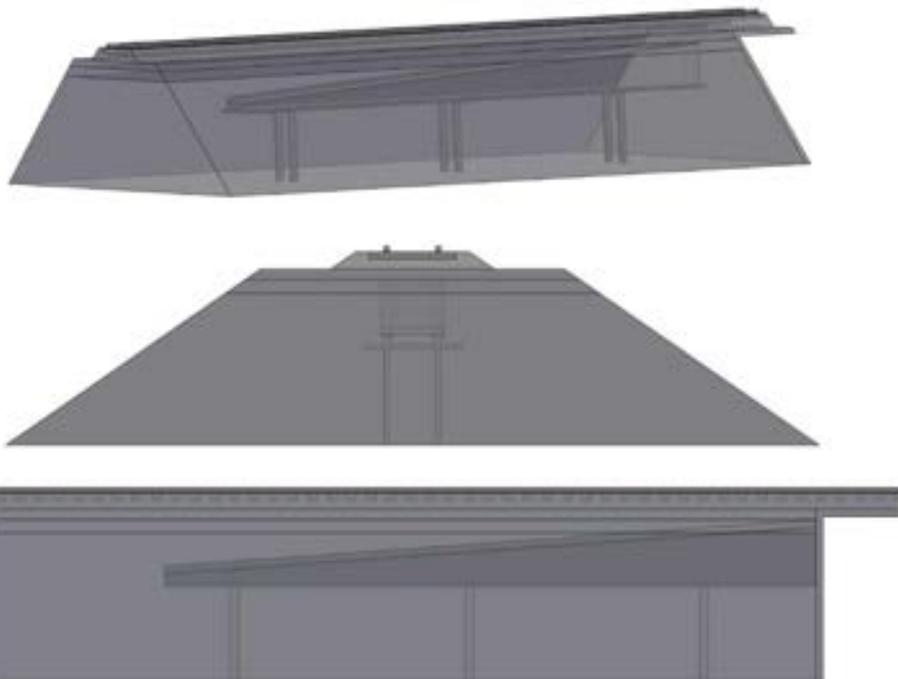
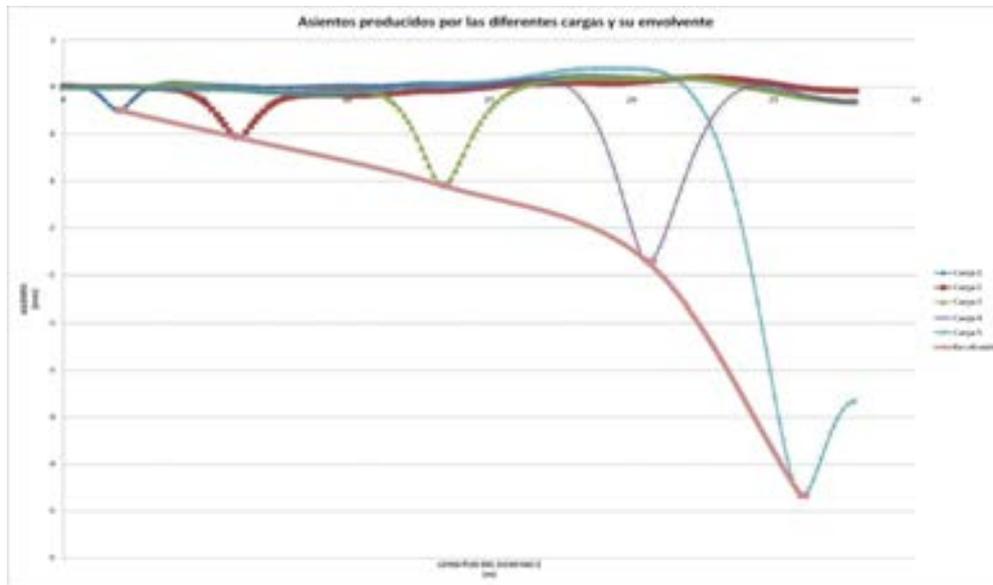


Figura 4.2.73 Esquema de estructura a rasante (H=2,4 m), cuña triangular hueca formada con vigas en forma de T y losas. Fuente: Elaboración propia.

Asientos producidos por las diferentes cargas y su envolvente

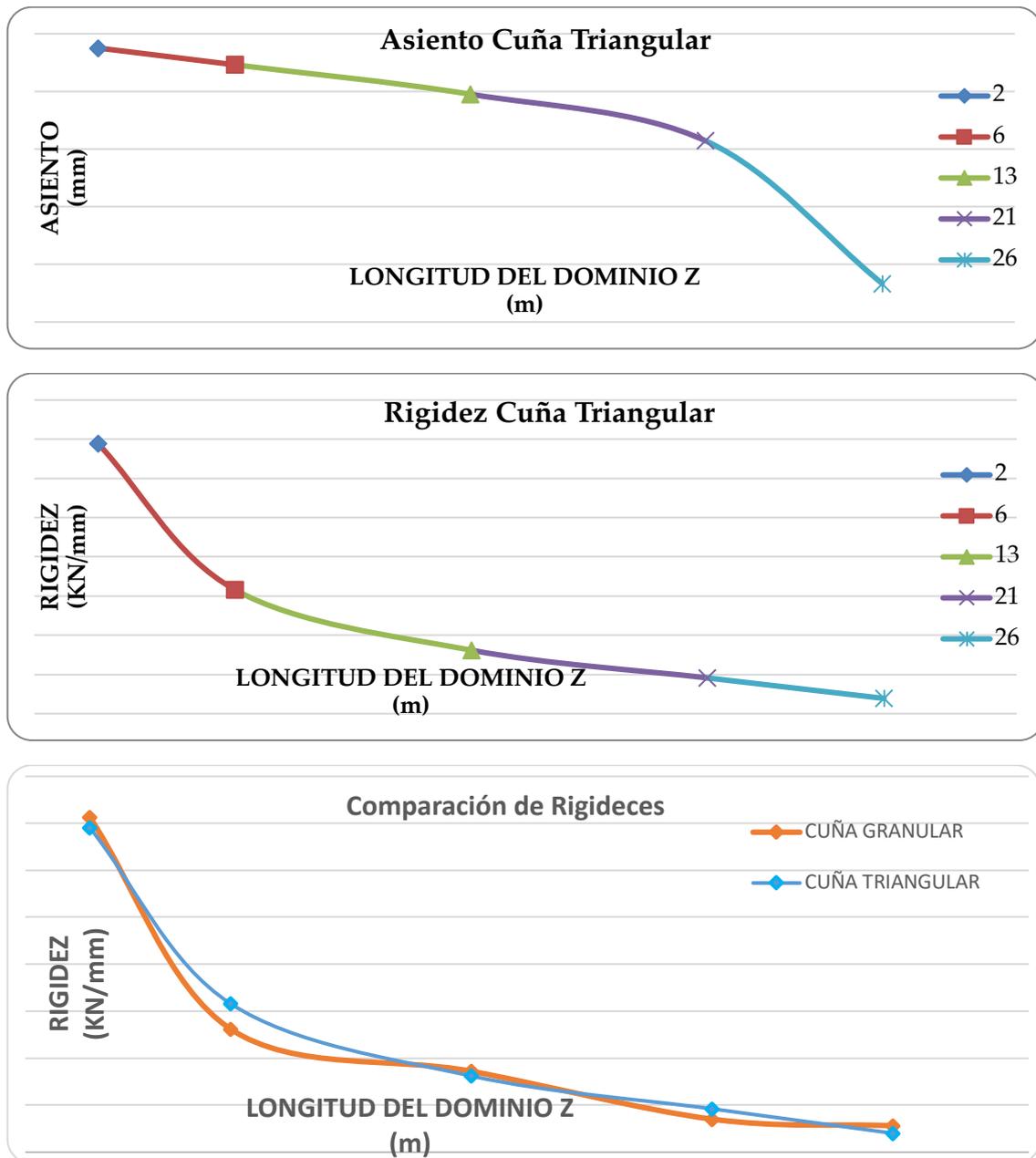


Gráfica 4.2.43 Asientos y envolvente de modelo de estructura a rasante ($H=2,4$ m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia.

Resultados de la envolvente

Longitud del dominio Z (m)	Asiento bajo carga (mm)	Rigidez (KN/mm)
1.935	-0,25	345
6.135	-0,54	158
13.335	-1,05	81
20.535	-1,86	46
25.935	-4,33	20

Tabla 4.2.30 Asientos y rigideces de modelo de estructura a rasante ($H=2,4$ m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4.2.44 Asientos, rigideces y comparación con la cuña granular de modelo de estructura a rasante ($H=2,4$ m), cuña bloque triangular. Fuente: Elaboración propia.

➤ **Cuña formada por losas**

a. **Cuña formada por losas macizas**

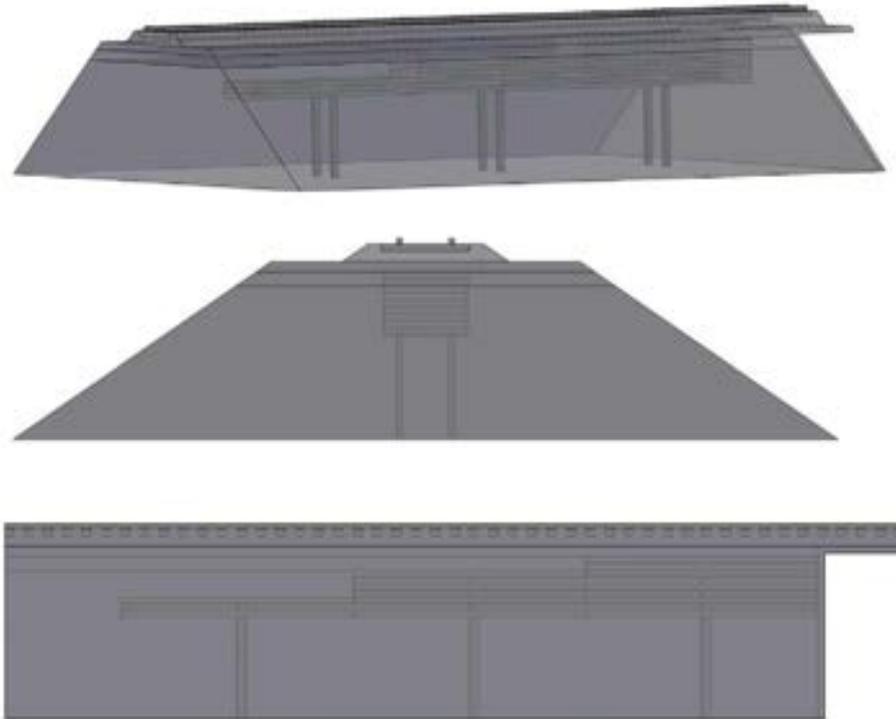
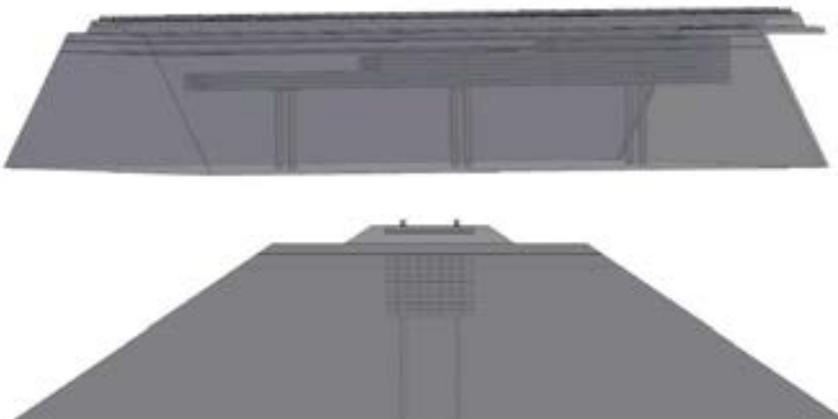


Figura 4.2.74 Esquema de estructura a rasante ($H=2,4$ m), cuña formada por losas macizas. Fuente: Elaboración propia.

b. **Cuña formada por losas alveolares**



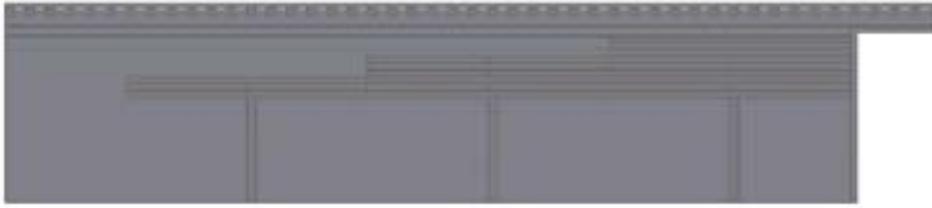
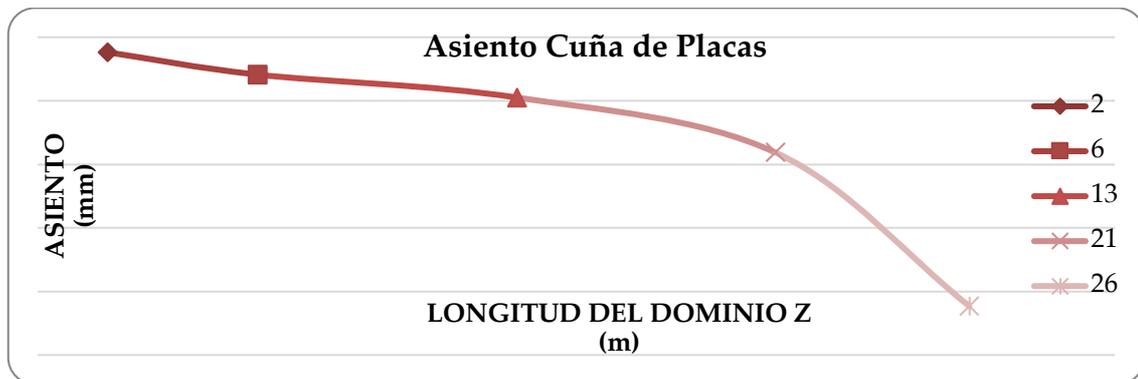


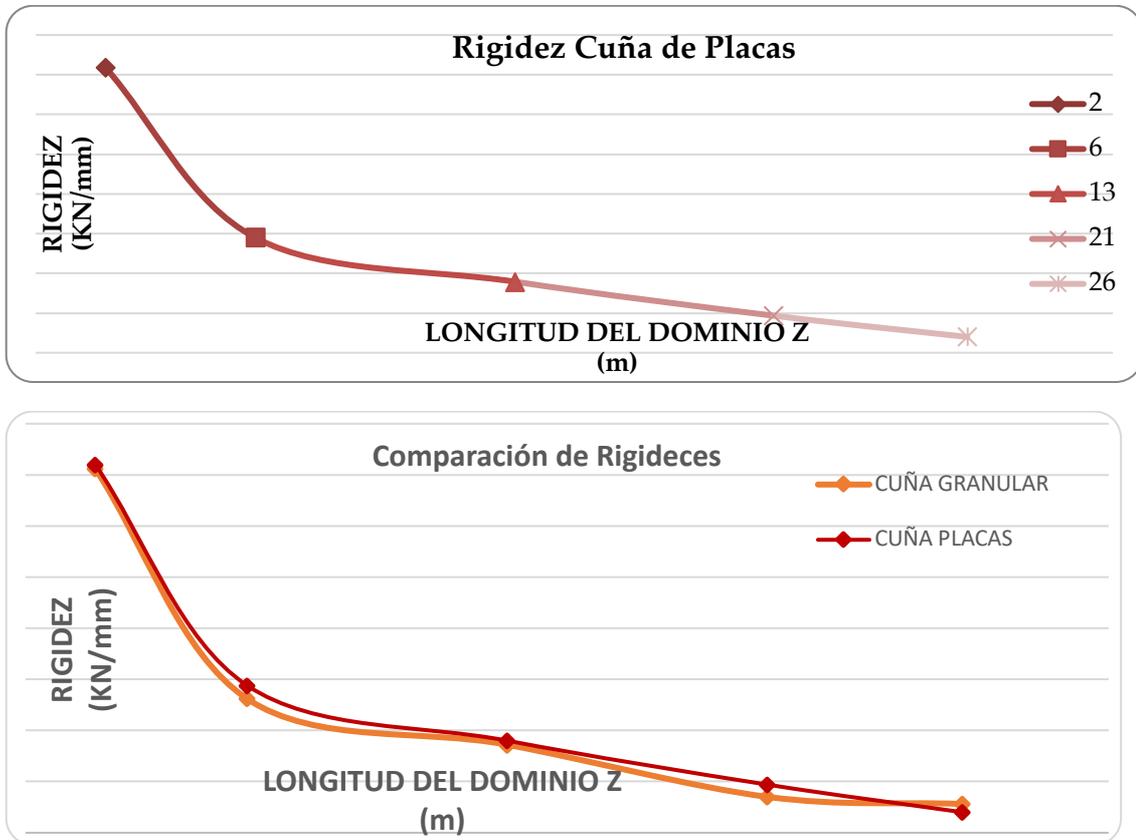
Figura 4.2.75 Esquema de estructura a rasante (H=2,4 m), cuña formada por losas alveolares Fuente: Elaboración propia.

Resultados de la envolvente

Longitud del dominio Z (m)	Asiento bajo carga (mm)	Rigidez (KN/mm)
1.935	-0,24	360
6.135	-0,59	144
13.335	-0,95	90
20.535	-1,81	47
25.935	-4,23	20

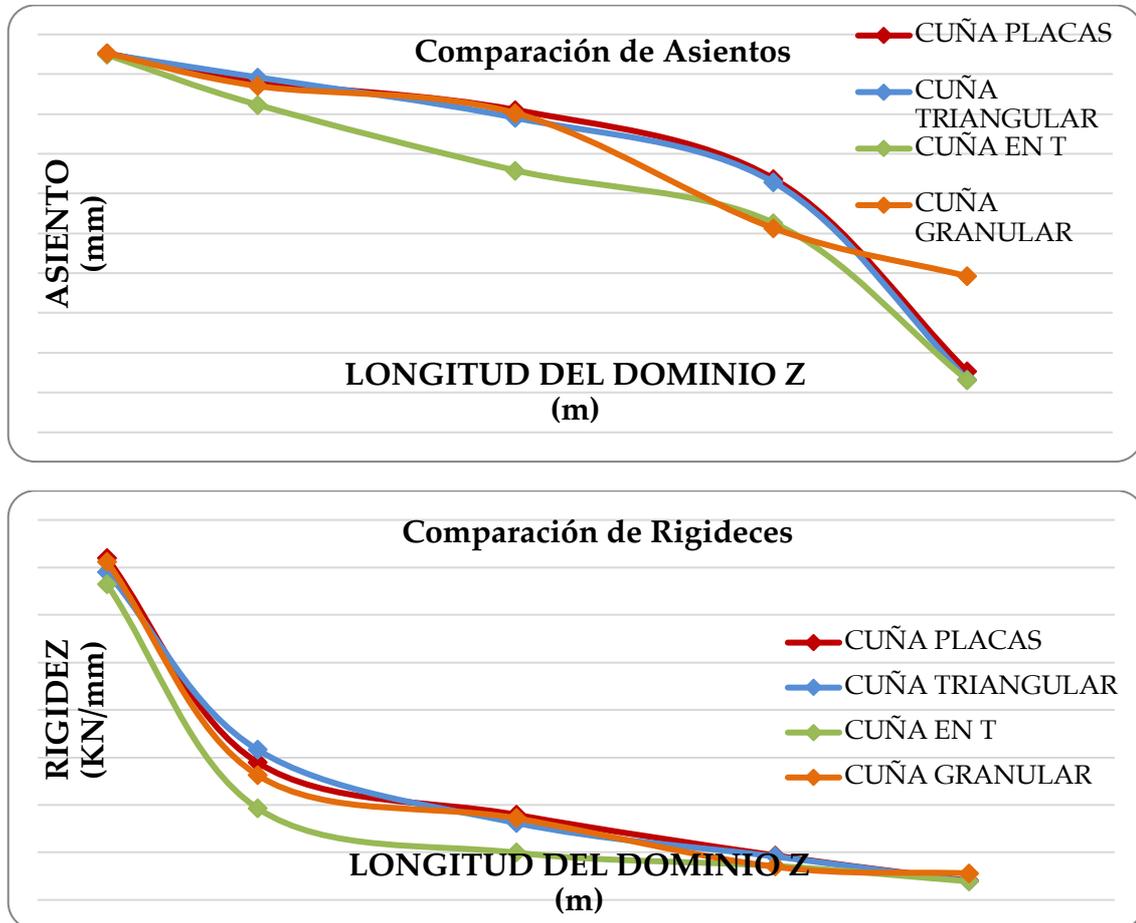
Tabla 4.2.31 modelo de estructura a rasante (H=2,4 m), cuña formada por losas macizas. Fuente: Elaboración propia.





Gráfica 4.2.45 Asientos, rigideces y comparación con la cuña granular de modelo de estructura a rasante (H=2,4 m), cuña formada por losas macizas. Fuente: Elaboración propia

➤ Comparativa



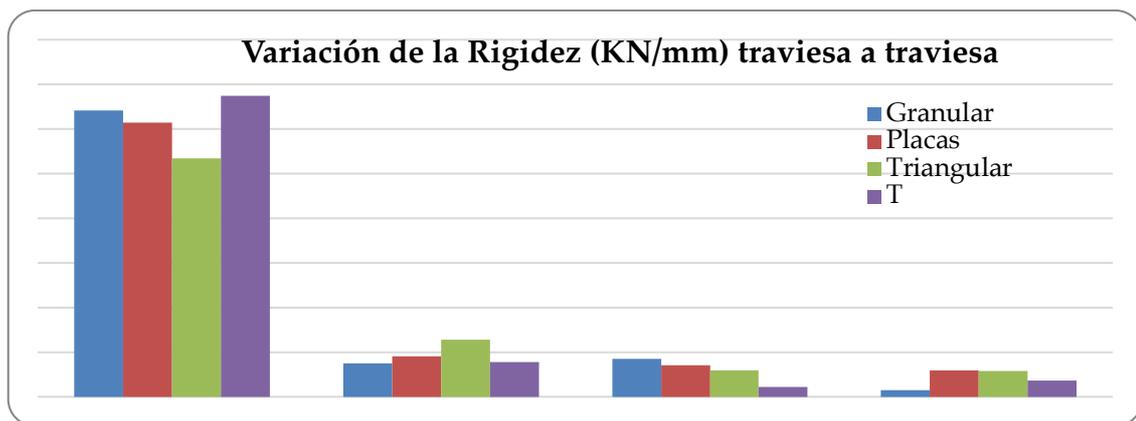
Gráfica 4.2.46 Comparativa entre los grupos de modelos. Fuente: Elaboración propia.

Comparación % variación rigidez (Kmax-Ko)/Ko*100	
Granular	1171,05
Placas	1689,98
Triangular	1657,92
T	1595,41

Tabla 4.2.32 Comparación en % de la variación total de rigidez en la transición. Fuente: Elaboración propia.

Variación de rigidez traviesa-traviesa				
$(K_{i+1}-K_i)/n_{traviesas}$ KN/mm				
	Granular	Placas	Triangular	T
Carga 1-2	32,09	30,74	26,74	33,68
Carga 2-3	3,76	4,56	6,39	3,87
Carga 3-4	4,25	3,56	2,94	1,15
Carga 4-5	0,77	2,98	2,90	1,81
Media	10,22	10,46	9,74	10,13
Desviación Típica	14,66	13,53	11,45	15,74

Tabla 4.2.33 Comparación de variación de rigidez traviesa a traviesa. Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4.2.47 Comparación de variación de rigidez traviesa a traviesa. Fuente: Elaboración propia.

En este caso se puede observar que las cuñas prefabricadas en bloque triangular tienen un comportamiento muy bueno como transición de rigidez, seguido de la cuña formada por losas. Por el contrario, la cuña en forma de T tiene un comportamiento bastante peor. Recordemos que en cualquiera de estos casos se debe pilotar la cuña prefabricada para que realice su función de transición de rigidez.

4.2.4 Análisis simplificado de la dinámica ferroviaria

Para tratar de comprender de forma detallada el comportamiento dinámico de un vehículo ferroviario por las diferentes transiciones modeladas se ha optado por emplear una simplificación mediante un sistema de masas conectadas por mecanismos con propiedades dinámicas. La forma de simular los sistemas reales es, fundamentalmente, mediante un sistema por combinación de tres elementos: masa (m , kg), resorte (k , N/m) y amortiguador (c , N*s/m). La aproximación del modelo planteado resultará más real cuantos más grados de libertad (incógnitas) sean introducidos en la simulación numérica.

4.2.4.1 Caracterización del material móvil

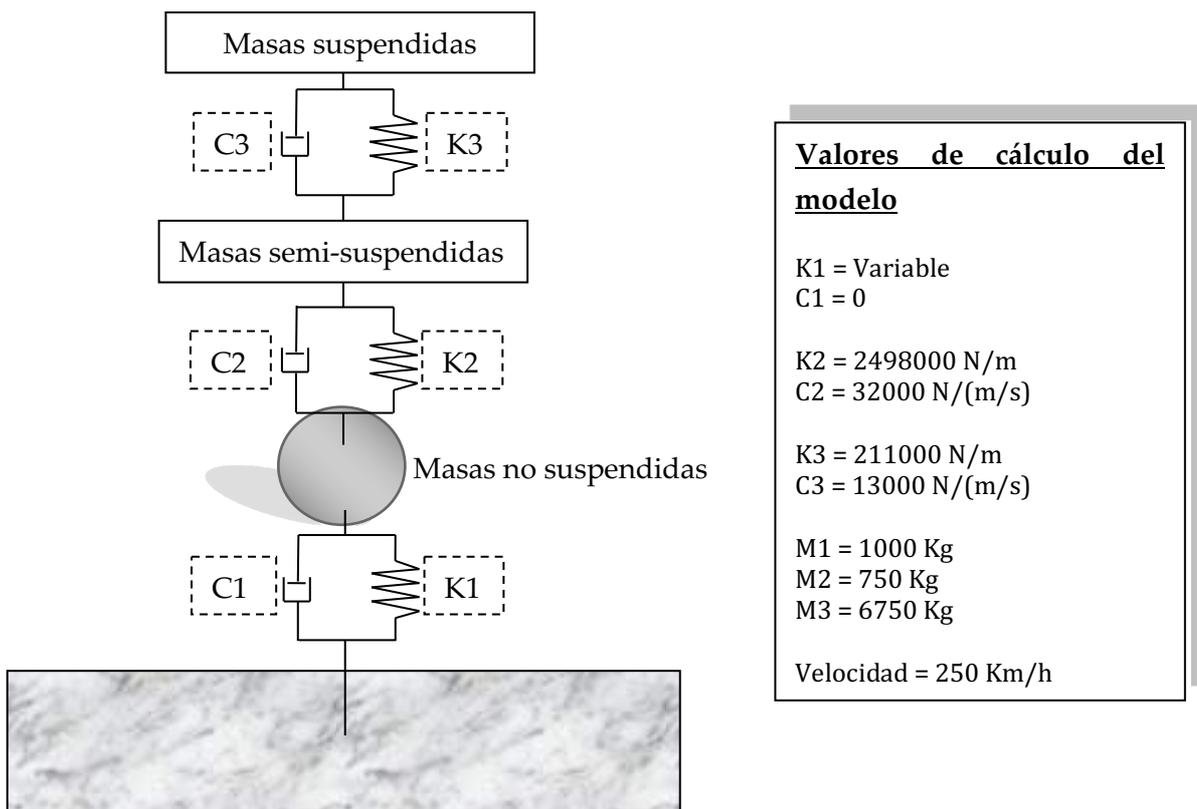


Figura 4.2.76 Modelo de tres masas utilizado para el cálculo de aceleraciones.
Fuente: Elaboración propia.

Con el objetivo de evaluar los efectos dinámicos simulando el comportamiento de un eje ferroviario cuando se desplaza a lo largo de la vía, se propone el sistema de la Figura 4.2.76, compuesto por 3 masas, correspondientes a las masas no suspendidas (tren de rodadura), las masas semi-suspendidas (bogie) y las masas suspendidas (caja) del vehículo ferroviario. Cada una de las masas del modelo está vinculada al resto del modelo mediante un muelle y un amortiguador, cuyos valores de amortiguación y de rigidez se han tomado de los vehículos que circulan por las líneas de alta velocidad, más concretamente, para el modelo de Talgo-Bombardier serie 102. En este sentido, la velocidad de circulación se ha considerado igual a 250 km/h.

Los datos a introducir (condiciones iniciales y de contorno) en el modelo de 3 masas son la velocidad horizontal de avance del vehículo por la vía, y las deformaciones estáticas y relativas, es decir, la envolvente de deformaciones que se produce en cada uno de los modelos numéricos de la plataforma ferroviaria. El problema, es que es necesario tener datos de esa envolvente en intervalos de espacio muy pequeños, por lo que se deben extender los datos de deformaciones, obtenidos en unos pocos puntos (concretamente 7 para los modelos $H=0,4$ m, 1 m y el estribo, 5 para el modelo $H=2,4$ m). Esta extensión de datos se ha realizado aplicando a los puntos el polinomio interpolador de Lagrange. De esta forma, la solución obtenida en unos ciertos puntos se extiende a lo largo del dominio, consiguiendo obtener resultados aproximados en cualquier punto.

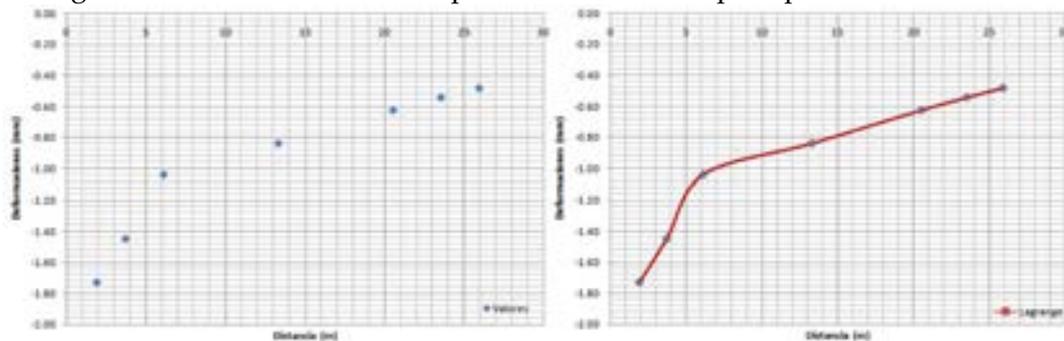


Figura 4.2.77 Interpolación de Lagrange. Fuente: Elaboración propia.

Tras esto, puesto que en el modelo numérico solo se ha representado y calculado la mitad de la obra de fábrica debido a las simplificaciones por simetría introducidas, las envolventes de deformaciones se han extendido simétricamente,

y además se han alargado lo suficiente (hasta los 100 metros de longitud) para observar la atenuación de las vibraciones una vez el vehículo ha sobrepasado la obra en cuestión.

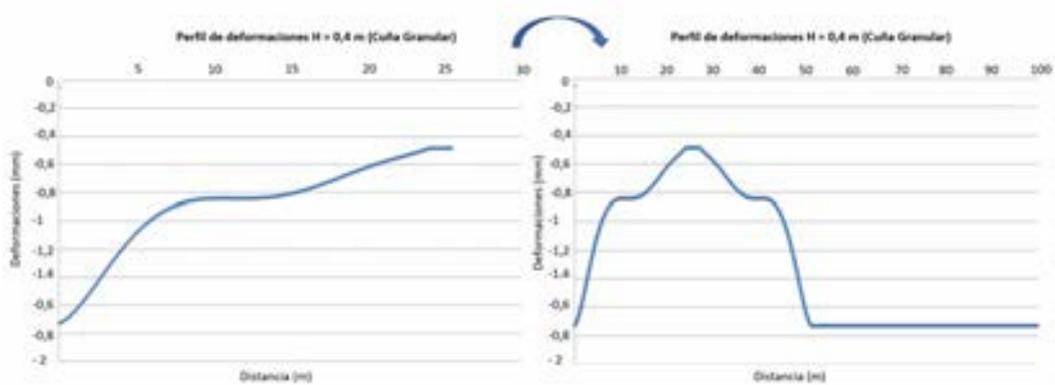


Figura 4.2.78 Extensión de la envolvente de deformaciones. Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenido el perfil de deformaciones de cada caso, se introduce en el modelo de 3 masas, obteniendo como resultado los desplazamientos (x), las velocidades (x') y, sobre todo, las aceleraciones (x'') de cada una de las masas que forman el mismo, todos los resultados respecto al eje vertical. En definitiva, la variación de rigidez se traduce en una excitación del vehículo que provoca aceleraciones verticales de las diferentes masas del mismo.

4.2.4.2 Cálculo dinámico del tramo de vía definido

Seguidamente, se pretende dar una visión general de la metodología explicada mediante la exposición de unos esquemas para el caso de cuña granular (en el resto de modelos el proceso aplicado es idéntico).

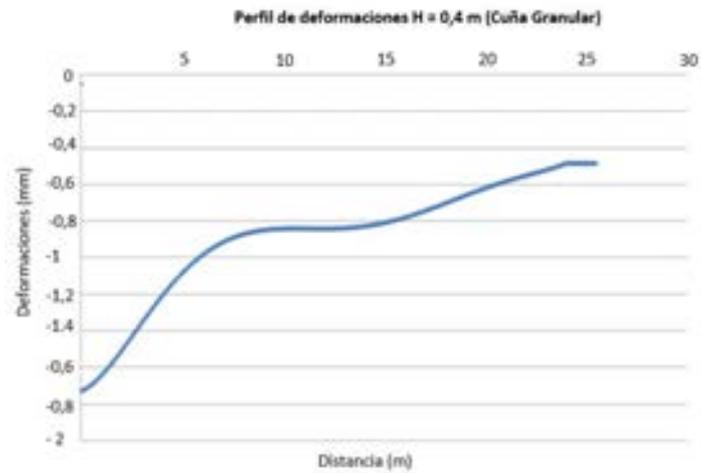
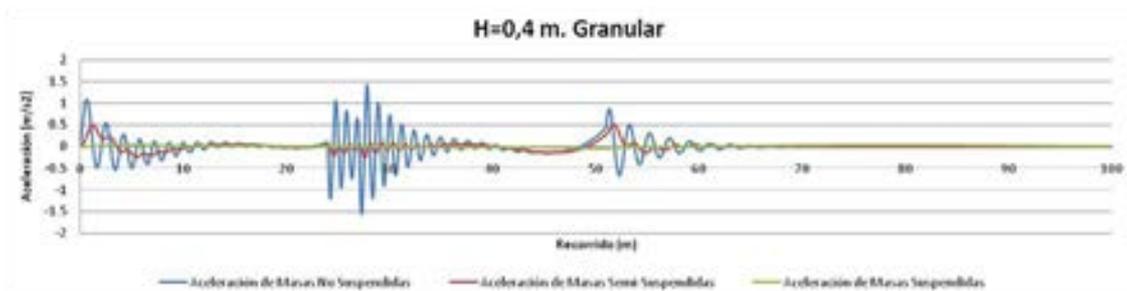
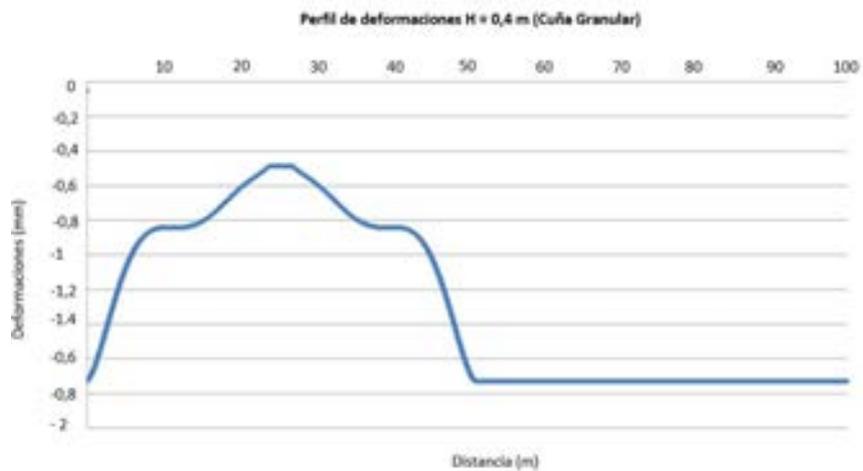
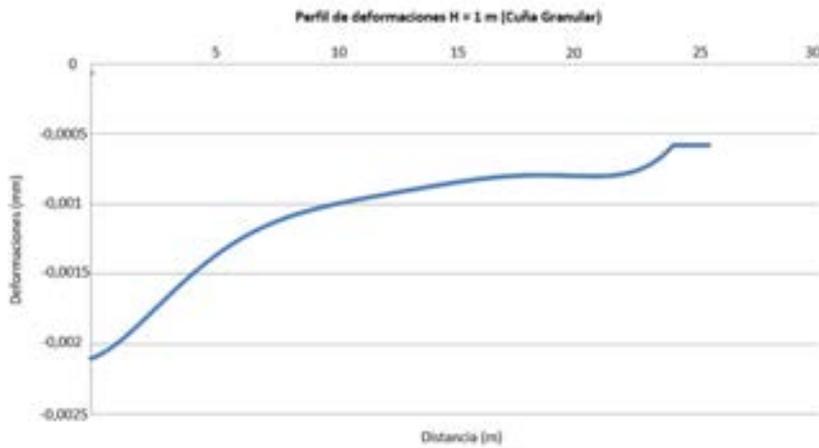
Modelo H = 0,4 m cuña granularModelo H = 0,4 m cuña granular, extendido por simetría

Figura 4.2.79 Esquema de metodología para el caso de cuña granular H=0,4 m.
Fuente: Elaboración propia.

Modelo H = 1 m cuña granular



Modelo H = 1 m cuña granular, extendido por simetría

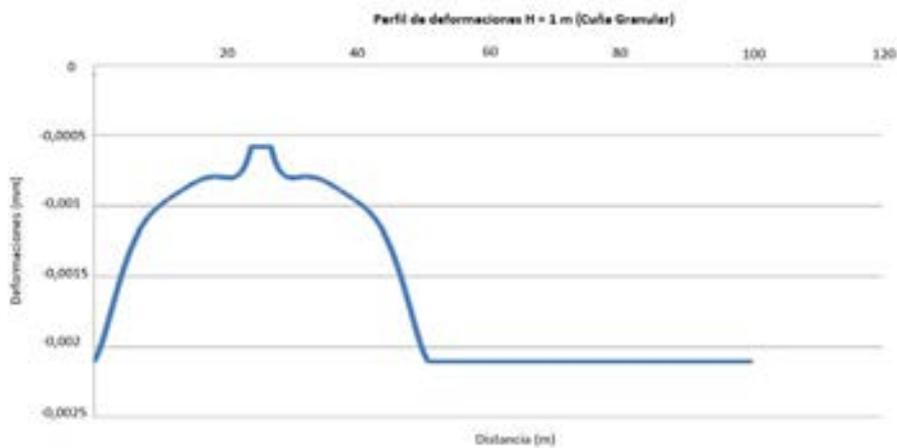


Figura 4.2.80 Esquema de metodología para el caso de cuña granular H=1 m. Fuente: Elaboración propia.

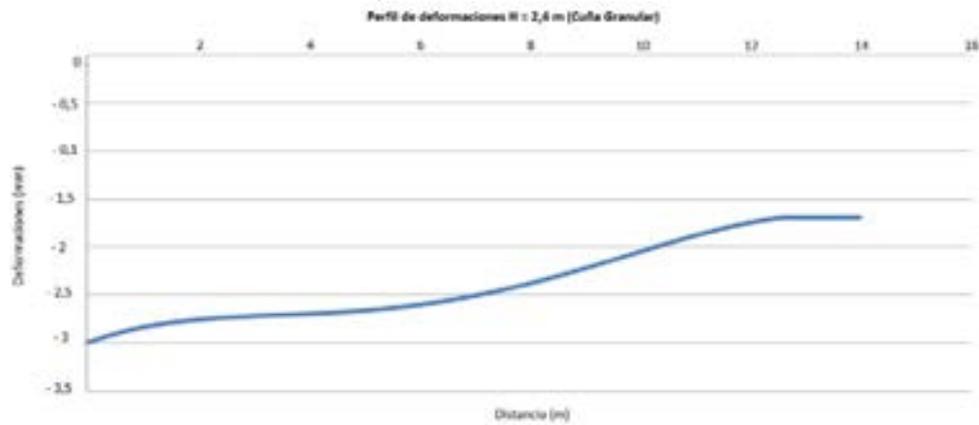
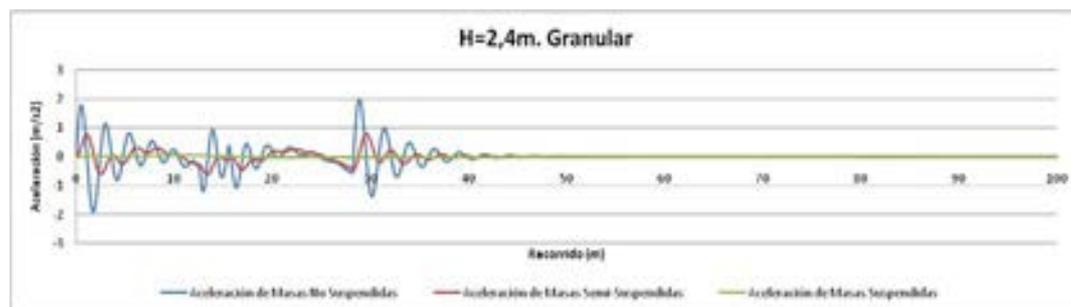
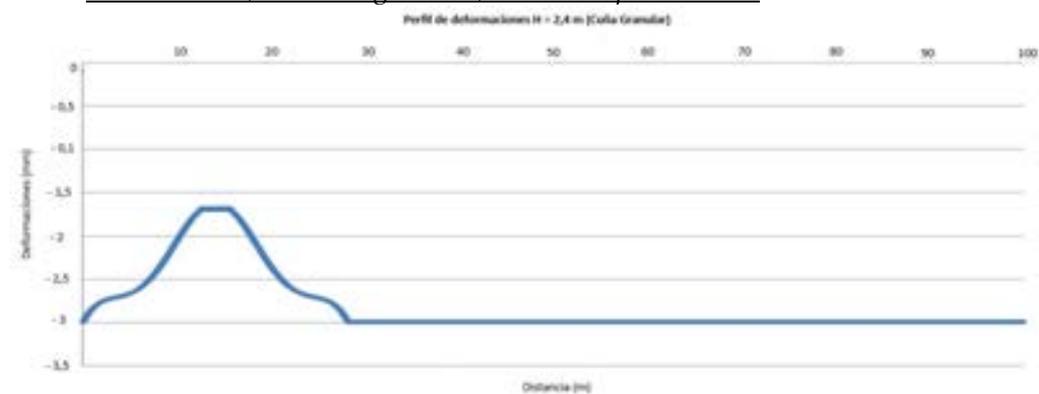
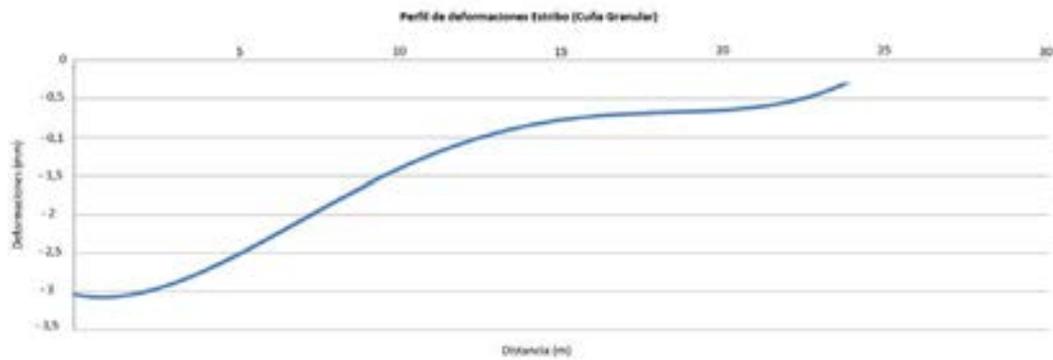
Modelo $H = 2,4$ m cuña granularModelo $H = 2,4$ m cuña granular, extendido por simetría

Figura 4.2.81 Esquema de metodología para el caso de cuña granular $H=2,4$ m.
Fuente: Elaboración propia.

Modelo Estribo, cuña granular



Modelo Estribo, cuña granular, extendido por simetría

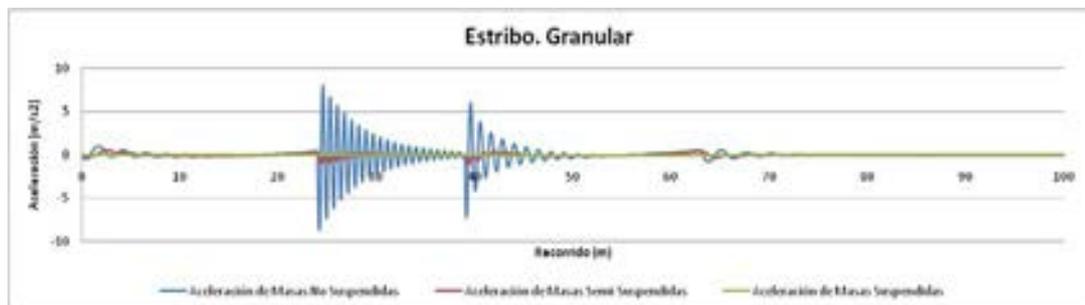
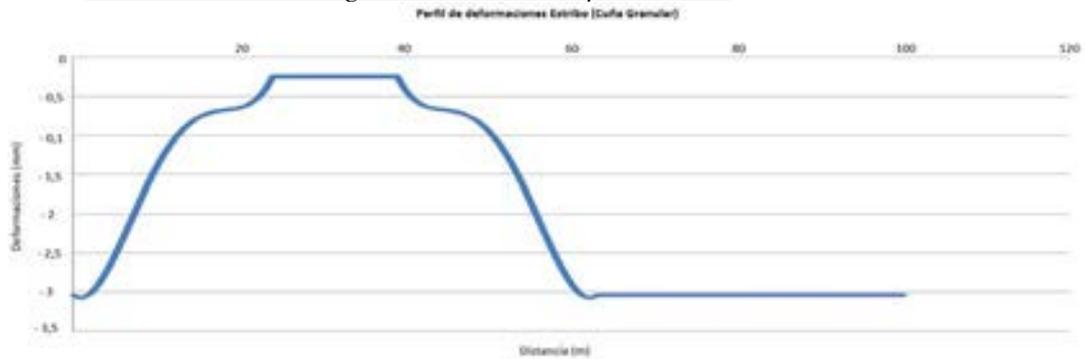


Figura 4.2.82 Esquema de metodología para el caso de cuña granular en estribo. Fuente: Elaboración propia.

Así pues, la presencia de cambios de rigidez en las inmediaciones de la obra de fábrica provoca la aparición de una sobrecarga dinámica, traduciéndose en un aumento de la carga aplicada a través de las aceleraciones inducidas en las masas no suspendidas que están directamente en contacto con la vía, produciendo una degradación de forma acelerada las zonas donde las aceleraciones alcanzan valores

significativos, siendo el material móvil más agresivo sobre la vía cuanto mayores sean estas masas no suspendidas. Por ello, se ha establecido como uno de los criterios para valorar el comportamiento de las cuñas calculadas el valor máximo que alcanzan las aceleraciones de las masas no suspendidas cuando el vehículo circula por la transición.

Otro de los parámetros a tener en cuenta es el valor de las aceleraciones de las masas suspendidas. Estas aceleraciones de las masas suspendidas son las aceleraciones percibidas por los viajeros, pudiendo llegar a causar molestias si se superan ciertos umbrales, teniendo muy presente que la sensibilidad del ser humano a una cierta aceleración depende del valor de la frecuencia con la que se aplica. Para valorar el grado de molestia que pueden causar dichas aceleraciones se ha calculado, en cada caso, el índice de Sperling, el intervalo de mayor sensibilidad tomado en consideración entre los 3 y 7 Hz.

Wz	Confort
1	Ligeramente perceptible
2	Netamente perceptible
2,5	Soportable y todavía no desagradable
3	Fuertemente perceptible, poco agradable, pero todavía soportable
3,25	Fuertemente incómodo
3,5	Extremadamente incómodo y no soportable mucho tiempo
4	Extremadamente desagradable y perjudicial en caso de exposición

Tabla 4.2.34 Valores del índice de Sperling. Fuente: U.I.C.

Las aceleraciones utilizadas para el cálculo del índice de Sperling (aceleraciones de las masas no suspendidas), generalmente vienen obtenidas de los datos medidos en distintas partes de la caja del vehículo y del bogie, es decir, a través de datos registrados en el mismo vehículo durante su movimiento a lo largo de la línea. Sin embargo, los valores obtenidos a lo largo de este estudio del índice de Sperling deben ser analizados teniendo en cuenta que para el cálculo de dicho parámetro las aceleraciones que se han tomado son consecuencia, únicamente, de la variación de rigidez, no teniendo en cuenta las posibles deformaciones presentes en la vía ni de los defectos de rueda, entre otros, que pueden aumentar

significativamente las aceleraciones inducidas en el vehículo y, por tanto, el valor que toma el índice calculado.

Los valores obtenidos en el estudio del índice de Sperling son relativamente reducidos (valores inferiores a 1) si se observa la escala de valores recogida en la tabla anterior, siendo interesante para realizar un análisis comparativo de las diferencias de valores del índice obtenidas para cada una de las cuñas analizadas. Estos valores reducidos son consecuencia de tomar en consideración, únicamente, las aceleraciones producidas por los cambios de rigidez, que son las que se han obtenido en el cálculo numérico.

A la vista de los resultados obtenidos y, fundamentalmente, respecto de las masas no suspendidas, se observa como las aceleraciones mayores se producen en aquellos puntos en los que existe un cambio relativamente brusco de la deformación. Esto se observa a la entrada y salida de la obra de fábrica, pero también al inicio y final de la transición. En estos puntos, dado el modelo numérico implementado, las aceleraciones aumentan de forma significativa.

Las curvas de deformación obtenidas se han calculado mediante la interpolación con 5 datos. Por ello, parece ser necesario, debido a la sensibilidad del modelo a los cambios de deformación, la obtención de un número lo suficientemente grande como para ajustar de forma adecuada la interpolación realizada, dado que un pequeño cambio en el perfil puede influenciar de forma notable las aceleraciones. Por ello, se ha considerado conveniente no tener en consideración los resultados obtenidos mediante este modelo de 3 masas, dado su susceptibilidad respecto al perfil introducido, estando calculado mediante un número de puntos lo suficientemente reducido como para no poder asegurar que el perfil obtenido se ajuste fielmente a la realidad y, por tanto, teniendo una incertidumbre elevada respecto al comportamiento del mismo.

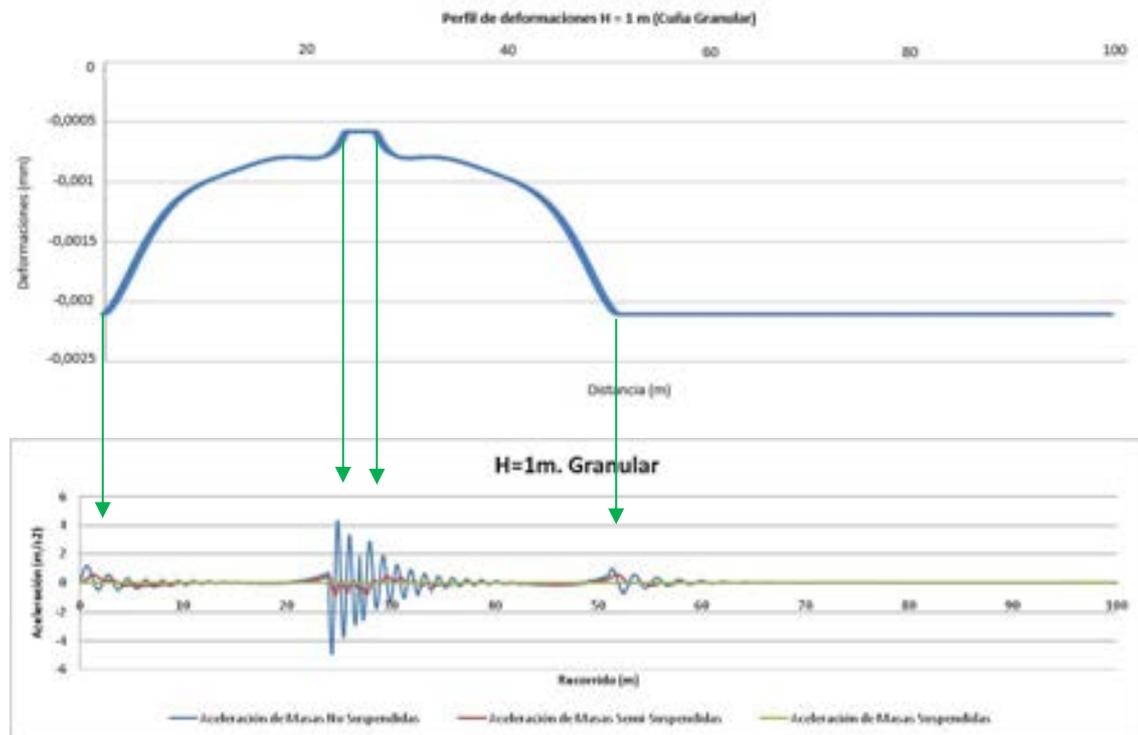


Figura 4.2.83 Influencia de los cambios de deformación en las aceleraciones. Fuente: Elaboración propia.

4.2.5 Consideraciones acerca de la convergencia y el tiempo

Por otro lado, a lo largo del estudio han existido múltiples problemas de convergencia en los modelos planteados. Debido a la presencia de nodos ligados entre el balasto y las traviesas, junto a la presencia de las no-linealidades típicas de los modelos elasto-plásticos empleados en el cálculo numérico planteado se necesita un criterio de convergencia para obtener un resultado satisfactorio. Por ello, dadas las posibilidades de cálculo del programa informático utilizado este criterio se ha establecido, generalmente, del 5 % en fuerzas. Una vez aplicado dicho criterio, se debe definir el número de ecuaciones de equilibrio y el número de substeps, influenciando de manera notable el tiempo de cálculo y la convergencia del modelo utilizado. Por defecto, dichos parámetros se han establecido para obtener un balance entre tiempo de cálculo y un resultado suficientemente bueno,

siendo de 25 y 50 el número de ecuaciones de equilibrio y el número de substeps, respectivamente.

Una vez definidos dichos parámetros, en los modelos cuyas dimensiones son mayores (correspondientes a los casos de $H= 2,4$ metros y el estribo), dichos parámetros ha sido necesario modificarlos convenientemente, puesto que en muchos de los casos no son lo suficientemente elevados como para que el modelo converja. Por ello, los diferentes modelos planteados sin éxito debido a la insuficiencia de ecuaciones de equilibrio y substeps ha sido considerable, siendo el tiempo total de cálculo empleado superior a las 2000 horas (más de 2 meses de cálculo con un ordenador). Sumado a esto, cabe citar los inconvenientes sufridos debido a los cortes de luz durante los cálculos realizados, llevando dichos problemas a reiniciar los modelos que se encontraban en proceso, aumentando las horas empleadas en obtener los cálculos presentados en este estudio.

El tiempo de cálculo necesario para calcular cada uno de los modelos planteados oscila desde las 14-15 horas para los modelos más reducidos ($H= 0,4$ m) llegando a los 3-4 días para los casos de estribo. Sumando las horas de cálculo totales empleadas para el estudio resultan más de 4500 horas, para el que se necesitaría el uso de un ordenador durante 190 días seguidos con el fin de obtener los resultados previstos. Este estudio se ha llevado a cabo mediante una serie de computadoras, teniendo en cuenta las limitaciones de cada una de ellas y del tiempo del personal responsable del estudio.

Así pues, en la siguiente tabla se resume el tiempo requerido para cada una de las fases de cálculo:

Modelo	Tiempo de cálculo medio en horas, para cada carga	Número de cargas calculadas	Tiempo total estimado (horas)
0,4	15	42	630
1	24	42	1008
2.4	48	20	960
Estribo	72	20	1440

Estado	Tiempo total aproximado (horas)
Cálculos convergentes	4038
Cálculos no convergentes	2000

Tabla 4.2.35 Tiempos de cálculo empleados para el estudio. Fuente: Elaboración propia.

Tiempo total de cálculo aproximadamente ha sido de unas 6000 horas, siendo dicho tiempo total de más de 250 días de cálculo ininterrumpido para una computadora.

Se ha desarrollado mediante el uso inicial de un ordenador, siendo dicho número incrementado hasta los 7 ordenadores, para tratar de acelerar los cálculos realizados y obtener resultados con un tiempo razonable, llevando alrededor de 2 meses el tiempo necesario para completar todos los modelos necesarios mediante los sistemas informáticos que se han dispuesto en cada instante.

4.3 SELECCIÓN DE SOLUCIONES ÓPTIMAS. TOMA DE DECISIÓN

Entre los criterios utilizados que se han manejado para dar respuesta a diferentes valoraciones para determinar el diseño óptimo del elemento estructural se explican a continuación:

- Manejabilidad de las piezas en fábrica
- Coste de fabricación
- Dificultad del transporte y descarga
- Coste del transporte
- Dificultad de puesta en obra
- Coste de puesta en obra
- Comportamiento estructural de transición de rigidez

Una vez se han analizado todos los modelos seleccionados y se han obtenido los resultados correspondientes, se procede a seleccionar las soluciones más óptimas planteando un problema de Toma de decisiones con criterios múltiples o multicriterio (en inglés Multiple Criteria Decision Making, MCDM).

Basándose en la clasificación de los problemas en discretos y continuos, se puede realizar la siguiente clasificación de técnicas de resolución de los problemas de Decisión multicriterio (Korhonen et al. 1992):

DENOMINACIÓN	DESCRIPCIÓN BÁSICA	APLICACIONES
MÉTODOS BASADOS EN LA TEORÍA DE LA UTILIDAD MULTICRITERIO	Se dispone de una información completa sobre las preferencias del decisor de tal forma que se puede construir una función de valor o función de utilidad, en el caso de que exista incertidumbre, que agrega las funciones de valor/utilidad de cada uno de los criterios.	* Caso discreto - Asignación de la función de valor/utilidad * Caso continuo - Resolver el programa matemático $\max v(z(x))$ $x \in X$
MÉTODOS DE PROGRAMACIÓN MULTIOBJETIVO	El conjunto X de alternativas es continuo. No se tiene la información sobre las preferencias del decisor suficiente para construir una función de valor. Se plantean unas funciones objetivo que hay que optimizar.	* Programación compromiso * Programación por metas
MÉTODOS INTERACTIVOS	Se tiene información parcial sobre las preferencias del decisor. Interactúa el analista con el decisor de forma que se parte de una solución inicial que el decisor evalúa en base a sus preferencias, las cuales se	* Método STEM * Método de Zionts y Wallenius * Método de Geoffrion, Dyer y Feinberg * Surrogate Worth Tradeoff * Otros

	introducen en el modelo para generar una nueva solución.	
MÉTODOS DISCRETOS	El conjunto X de alternativas es discreto	* Métodos basados en la función de valor: - Suma ponderada - Método UTA - Programa VISA
		* Método de las Jerarquías Analíticas (AHP)
		* Métodos de sobre clasificación - ELECTRE - PROMETHEE
		* Método PRES
		* TOPSIS
		* CODASID

Tabla 4.3.1 Clasificación de técnicas de resolución de los problemas de Decisión multicriterio. Fuente: Korhonen et al. 1992.

El método utilizado para la elección de la cuña prefabricada adecuada es el denominado método PRES, desarrollado por el profesor Gómez-Senent en la Universidad Politécnica de Valencia.

En este método, una vez se tienen las posibles alternativas existentes, se definen una serie de criterios a tener en cuenta.

Alternativas	
Tipo 1	Cuña triangular hueca formada por módulos
Tipo 2	Cuña triangular maciza
Tipo 3	Cuña formada por losas alveolar
Tipo 4	Cuña formada por vigas TI de canto variable y losa
Tipo 5	Cuña formada por vigas TI de canto variable
Tipo 6	Cuña formada por losas macizas

Criterios	
Facilidad productiva V.S. Facilidad de industrialización (1)	
Manejabilidad de las piezas en fábrica (2)	

Coste de fabricación (3)
Dificultad del transporte y descarga (4)
Coste del transporte (5)
Dificultad de puesta en obra (6)
Coste de puesta en obra (7)
Comportamiento estructural como transición de rigidez (8)

Tabla 4.3.2 Clasificación de alternativas y criterios utilizados. Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar que los criterios utilizados que se han manejado responden a diferentes valoraciones intuitivas que se explican a continuación:

- Manejabilidad de las piezas en fábrica: valoración intuitiva en base a peso número y forma.
- Coste de fabricación: valoración intuitiva en base al peso y dificultad productiva.
- Dificultad del transporte y descarga: valoración intuitiva en base a forma, peso y tipo de grúa.
- Coste del transporte: valoración intuitiva en base al peso y necesidad transporte especial.
- Dificultad de puesta en obra: valoración en base número de elementos, peso unitario, conexión y manipulación.
- Coste de puesta en obra: intuitiva en base a número elementos, tipo de grúa necesario, complejidad montaje.

A continuación, se le asigna un peso a cada criterio y se califica cada alternativa con respecto a los criterios planteados.

Matriz de valoración								
Atributos	Facilidad productiva V.S. Facilidad de industrialización (1)	Manejabilidad de las piezas en fábrica (2)	Coste de fabricación (3)	Dificultad del transporte y descarga (4)	Coste del transporte (5)	Dificultad de puesta en obra (6)	Coste de puesta en obra (7)	Comportamiento estructural como transición de rigidez (8)
Alternativas								
Peso	2	1	3	1	2	2	3	5
Tipo 1	5	4	4	4	4	5	4	5
Tipo 2	4	3	1	4	2	3	5	5
Tipo 3	4	5	5	5	4	4	4	4,5
Tipo 4	5	5	4	4	3	5	5	4,5
Tipo 5	3	4	3	4	4	4	5	2
Tipo 6	4	4	5	5	5	4	4	5

Tabla 4.3.3 Matriz de valoración de las alternativas. Fuente: Elaboración propia.

Para un correcto tratamiento de los datos, se han de normalizar los valores de los pesos de cada criterio (sumatorio de todos los pesos igual a 1) y se transforman las escalas de evaluación de los criterios para que sean comparables, teniendo en cuenta el tipo de escala y el sentido de preferencia de cada criterio.

$$\text{Pesos: } p_j = \frac{P_j}{\sum_{j=1}^N P_j};$$

Siendo:

P_j el peso correspondiente

$\sum_{j=1}^N P_j$ el sumatorio de todos los pesos

$$\text{Evaluación criterios: } c_j = \frac{C_j(X)}{\max C_j};$$

Siendo:

$C_j(X)$ la calificación en base a un determinado criterio de una alternativa
 $\max C_j$ la máxima calificación en base a ese criterio obtenida entre todas las alternativas.

Matriz de valoración normalizada								
Atributos	Facilidad productiva V.S. Facilidad de industrialización (1)	Manejabilidad de las piezas en fábrica (2)	Coste de fabricación (3)	Dificultad del transporte y descarga (4)	Coste del transporte (5)	Dificultad de puesta en obra (6)	Coste de puesta en obra (7)	Influencia del comportamiento
Alternativas								
Peso	0,105	0,053	0,158	0,053	0,105	0,105	0,158	0,263
Tipo 1	1	0,8	0,8	0,8	0,8	1	0,8	1
Tipo 2	0,8	0,6	0,2	0,8	0,4	0,6	1	1
Tipo 3	0,8	1	1	1	0,8	0,8	0,8	0,9
Tipo 4	1	1	0,8	0,8	0,6	1	1	0,9
Tipo 5	0,6	0,8	0,6	0,8	0,8	0,8	1	0,4
Tipo 6	0,8	0,8	1	1	1	0,8	0,8	1

Tabla 4.3.4 Matriz de valoración normalizada de las diferentes alternativas. Fuente: Elaboración propia.

Tras estas consideraciones, el método se basa en comparar cada alternativa con todas las demás. Mediante una comparación binaria de una iniciativa a con otra b para cada criterio se obtiene la Matriz de dominación.

Los elementos (i, j) de la matriz de dominación vienen dados por el sumatorio de las diferencias entre las calificaciones de los diferentes criterios en que domina.

$$T(i, j) = \sum_{k=1}^N (pk * (gk(i) - gk(j))) ;$$

con $gk(i) \geq gk(j)$

Matriz de dominación							
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	Tipo 6	Di
Tipo 1	-	0,211	0,068	0,047	0,253	0,042	0,621
Tipo 2	0,032	-	0,058	0,026	0,179	0,032	0,326
Tipo 3	0,053	0,221	-	0,063	0,237	0,011	0,584
Tipo 4	0,042	0,200	0,074	-	0,237	0,084	0,637
Tipo 5	0,032	0,137	0,032	0,021	-	0,032	0,253
Tipo 6	0,063	0,232	0,047	0,111	0,274	-	0,726
di	0,221	1,000	0,279	0,268	1,179	0,200	

Tabla 4.3.5 Matriz de dominación, para las diferentes alternativas. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se calcula el índice PRES mediante los sumatorios de fila y columna correspondientes a cada criterio.

$$I_i = \frac{D_i}{d_i};$$

Siendo:

D_i suma de las filas de $T(i, j)$, dominio de la alternativa i sobre las demás.

d_i suma de las columnas de $T(i, j)$, dominio de las demás alternativas sobre

i.

Valor I_i de las diferentes alternativas		
Tipo 1	Cuña triangular hueca formada por módulos	2,810
Tipo 2	Cuña triangular maciza	0,326
Tipo 3	Cuña formada por losas alveolar	2,094
Tipo 4	Cuña formada por vigas TI de canto variable y losa	2,373
Tipo 5	Cuña formada por vigas TI de canto variable	0,214
Tipo 6	Cuña formada por losas macizas	3,632

Tabla 4.3.6 Valor I_i para las diferentes alternativas planteadas. Fuente: Elaboración propia.

La mejor alternativa es la que obtiene un mayor índice PRES. Por lo tanto, puesto que el estudio pretende seleccionar las dos mejores alternativas para llevarlas a cabo, estas son la Tipo 1 y la Tipo 6.

En base a estas consideraciones resulta óptimo la creación de un elemento prefabricado, fácil de transportar y colocar, con capacidad de adaptación al entorno y a los requerimientos técnicos de transición de rigidez.

4.4 DIMENSIONADO DE SOLUCIONES ÓPTIMAS

En este apartado, una vez determinados los criterios que se han considerado más relevantes a la hora de valorar las diferentes alternativas planteadas al inicio, desde el punto de vista técnico, económico y estructural, se han dimensionado y calculado las dos soluciones más favorables obtenidas del análisis multicriterio que deben ser construidas para la elaboración del banco de pruebas.

Dado que las características resistentes de los materiales empleados en el cálculo influyen en los resultados obtenidos, es necesario realizar de nuevo un proceso de cálculo con los valores obtenidos de los ensayos practicados a cada uno de los materiales que se llevará a cabo previamente a la construcción del banco de pruebas.

Ahora bien, para llevar a cabo el dimensionamiento estructural de los elementos prefabricados, las acciones consideradas en la modelización de la estructura y el estudio de los resultados se han tomado en consideración bajo la normativa en lo referente a los materiales empleados, que se nombra a continuación:

- EHE-08. Instrucción de hormigón estructural EHE.
- EC-2. Eurocódigo 2, "Proyecto de Estructuras de Hormigón".
- IGP-2008. Instrucciones y Recomendaciones para la redacción de proyectos de plataforma.
- Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de ferrocarril, (IAPF-07).
- NCSP-07. Norma de construcción sismorresistente: Puentes.

El dimensionado óptimo de la alternativa mejor valorada está compuesta por elementos modulares prefabricados de hormigón armado es de 0,20 m de canto; 2,5

m de anchura y con longitudes de 1,8, 3,6 y 7,2 m. Las cuñas de transición están formadas por tres tramos de altura variable, cada uno de ellos formado por varias losas de hormigón armado de 0,20 m de espesor y, con dimensiones en planta, de 7,20 x 2,50 m o 3,60 x 2,50 m, según se trate, colocadas “al tresbolillo”.

Este tipo de solución permite una adaptabilidad a múltiples situaciones, pudiéndose aumentar el número de escalones formados por las placas prefabricadas para adaptarse, en cada caso concreto, a la altura necesaria y así formar una transición de rigidez lo más gradual posible.

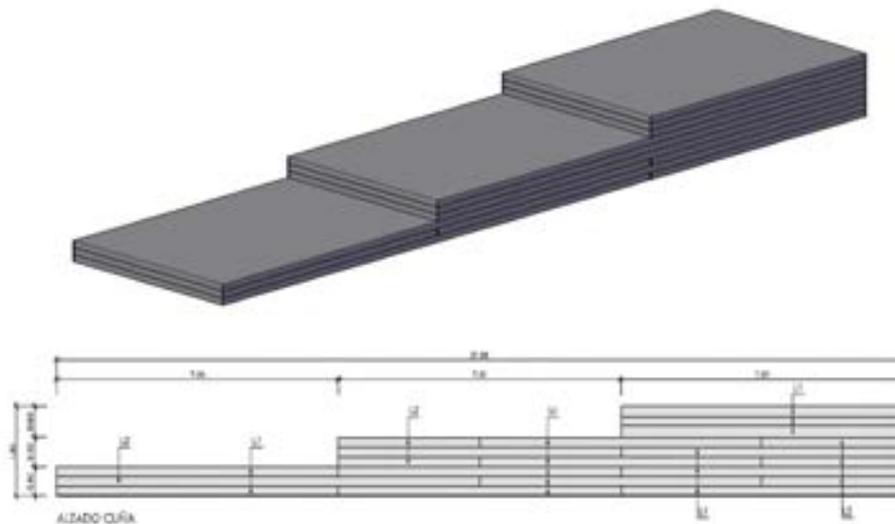


Figura 4.4.1. Alternativa compuesta por placas macizas. Fuente: Elaboración propia.

La segunda solución obtenida del análisis multicriterio, se compone de marcos prefabricados de hormigón armado cuyas dimensiones aumentan proporcionalmente a medida que se localizan más cercanos a la obra de fábrica. En este caso, de forma similar al anterior, el incremento de rigidez se consigue progresivamente para una mayor altura de marco y menor espesor de capa granular de la plataforma.

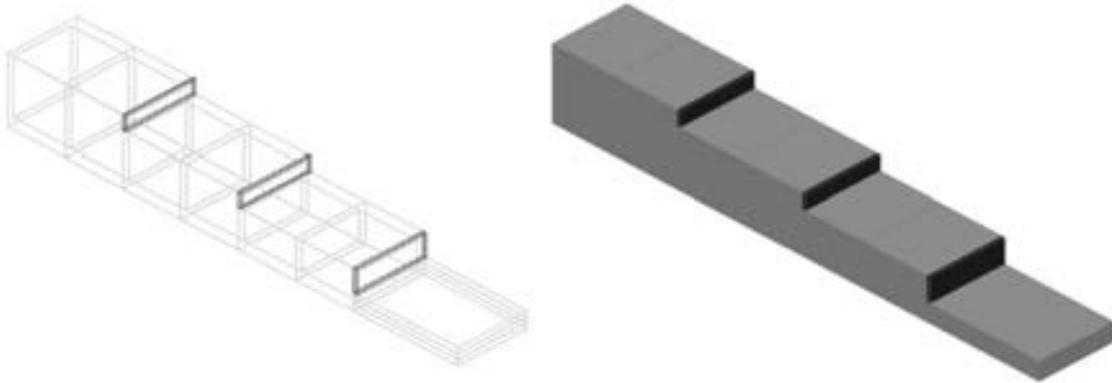


Figura 4.4.2 Alternativa compuesta por marcos. Fuente: Elaboración propia.

4.4.1 Caracterización mecánica del elemento estructural

El material diseñado en esta tesis debe contar con una serie de prestaciones que permitan su total desempeño como elemento de acondicionamiento de la infraestructura de vía en la zona de transición para atenuar el asiento diferencial producto de la variación de rigideces.

El material más idóneo para la función de transición de la rigidez en las zonas de transición es el hormigón armado, capaz de integrarse en el entorno terreno-obra de paso-estribo con eficacia.

Las características de los materiales que se emplearán en la construcción de las losas prefabricadas que forman la cuña de transición se detallan a continuación:

HORMIGÓN ARMADO

- Tipo HA-30/B/12/IIa.
- Resistencia característica f_{ck} 30,00 N/mm².
- Resistencia media f_{cm} 38,00 N/mm².
- Coeficiente de minoración γ_c 1,50.
- Resistencia de cálculo a compresión $\alpha_{cc}f_{ck}/\gamma_c$ 17,00 N/mm².
- Resistencia de cálculo a tracción $\alpha_{ct}f_{ctk}/\gamma_c$ 1,33 N/mm².
- Módulo de Elasticidad inicial E_c 33,577 N/mm².
- Módulo de Elasticidad secante E_{cm} 28,577 N/mm².
- Módulo de Poisson ν_c 0,20.

ARMADURAS PASIVAS

- Tipo B - 500 S.
- Resistencia característica f_{yk} 500 N/mm².
- Coeficiente de minoración γ_s 1,15.
- Resistencia de cálculo f_{yd} 435 N/mm².
- Módulo de Elasticidad E_s 200.000 N/mm².

Por otro lado, es necesario caracterizar el ambiente al que estarán sometidas las piezas. Se ha considerado que estos elementos estarán sometidos a una clase de exposición IIa, teniendo en cuenta que, de existir situaciones especiales que puedan causar problemas a las piezas, deberán tomarse las medidas oportunas para asegurar su resistencia. Para ese tipo de ambiente, el hormigón debe cumplir los siguientes requisitos:

AMBIENTE IIa:

- Relación máxima agua / cemento de 0,60.
- Contenido mínimo en cemento de 275 kg/m³.
- Considerando una resistencia característica de 30 MPa, un cemento tipo CEM I, una vida útil de 100 años, un control intenso de la ejecución y tipo de elemento prefabricado, se adopta un recubrimiento nominal de 25 mm.
- Máxima abertura de fisura de 0,30 mm.
- Resistencia mínima recomendada de 25 MPa.

Dicho ambiente está definido para elementos interiores sometidos a humedades relativas medias altas (>65%) o a condensaciones, así como para exteriores en ausencia de cloruros y expuestos a la lluvia en zonas con precipitación media anual superior a 600 mm y elementos enterrados o sumergidos, siendo este último el caso que concierne a esta tesis.

Por otro lado, y junto con el ambiente y tipo de material, es necesario definir los recubrimientos mínimos de los que se deben disponer en las piezas y las longitudes de solapo de las armaduras. Para el tipo de hormigón utilizado, en función del diámetro de la barra, se pueden obtener estas longitudes mínimas tal y como se observa en la tabla siguiente:

HA-30 (B-500S)	SOLAPO (Ls) (cm)		ANCLAJE (Lb) (cm)	
	Ls I	Ls II	Lb I	Lb II
10	50	72	25	36
12	60	86	30	43
14	70	100	35	50
16	80	114	40	57
20	104	146	52	73
25	162	228	81	114
32	266	372	133	186

Tabla 4.4.1 Tabla de longitudes de solapo y anclaje. Fuente: EHE-08.

La EHE define como recubrimiento mínimo (r_{\min}) de una armadura pasiva aquel que debe cumplirse en cualquier punto de la misma. Además, para garantizar este valor mínimo, establece un valor nominal del recubrimiento (r_{nom}) definido como:

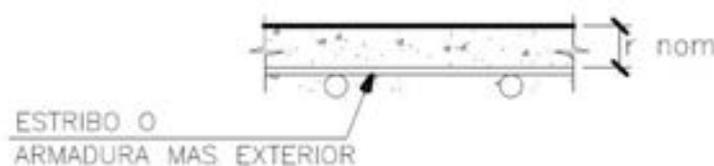


Figura 4.4.3. Recubrimiento nominal.

$$r_{\text{nom}} = r_{\min} + \Delta r$$

donde:

Δr es el margen de recubrimiento. En el caso de elementos prefabricados con control INTENSO, este valor vale 0 mm.

En base a los criterios anteriores se ha fijado, para la clase de exposición que se ha definido como IIa, un recubrimiento mínimo de las armaduras de 25,0 mm, y un recubrimiento nominal de **25,0 mm** dado que Δr , como ya se ha comentado anteriormente, es igual a 0.

4.4.2 Dimensionado de las losas

Para llevar a cabo un dimensionamiento de las losas prefabricadas de hormigón armado es necesario, por un lado, definir las acciones a las que se verá

sometida la misma durante las distintas fases de elaboración, transporte y construcción, así como aquellas fuerzas que deberá soportar durante su vida útil. Por otro lado, se deben caracterizar convenientemente los materiales y el ambiente al que estarán expuestas las piezas para asegurar que, a lo largo de la vida útil de la pieza en cuestión, no se producen problemas de deterioro y por tanto quede reducida su durabilidad.

Teniendo en cuenta que los elementos prefabricados se han modelizado numéricamente como un bloque de elementos continuos de espesor variable, se ha considerado que se produce la transmisión íntegra del esfuerzo rasante entre las diferentes placas mediante el rozamiento que éstas son capaces de movilizar al estar en contacto directo sus superficies. Así pues, no se han tenido en cuenta elementos de contacto tangencial entre las diferentes losas que componen la cuña de transición.

En el dimensionamiento se ha considerado una altura total de tierras sobre la estructura enterrada (marco u obra de drenaje) igual a 3,40 m de los cuales, el primer metro, se corresponde con el espesor de la superestructura ferroviaria (balasto, subbalasto y capa de forma) y, los 2,40 m restantes, con el terreno de la cuña de transición. El gálibo total considerado en la estructura enterrada es de 2,40 m, incluyendo la altura interior más los espesores de las losas superior e inferior, siendo dicho espesor, igual a 0,20 m.

4.4.2.1 Hipótesis de carga

Para realizar el dimensionamiento es necesario identificar detalladamente las acciones a las que se verá sometida la pieza. Así pues, se han considerado tres hipótesis de carga, que representan la acción de diversos ejes de un vehículo ferroviario, tal y como se detalla a continuación:

- Cargas permanentes y carga de una de las ruedas del eje del tren de AVE, de 85 KN cada una.
- Cargas permanentes y carga de dos de las ruedas del eje del tren de AVE, de 85 KN cada una.
- Cargas permanentes y carga de cuatro de las ruedas del eje del tren de AVE, de 85 KN cada una.

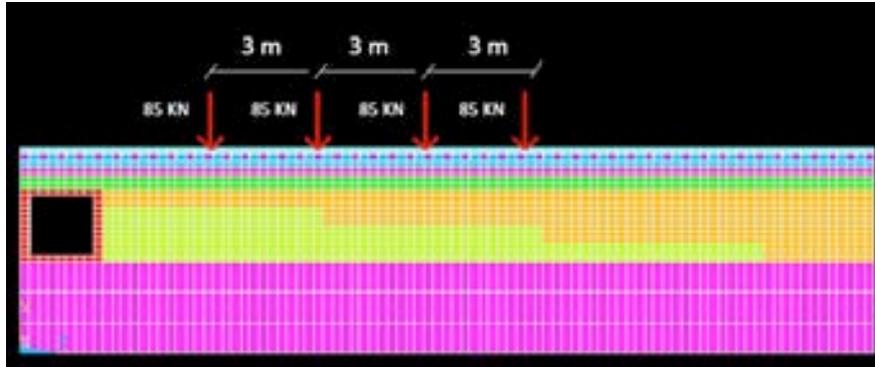


Figura 4.4.4 Hipótesis de carga 3. Fuente: Elaboración propia.

4.4.2.2 Cálculo del armado

➤ Armadura requerida en servicio

De todas las hipótesis de cálculo que han sido analizadas para el dimensionamiento de las armaduras de las losas de las cuñas de transición, la que produce unas mayores solicitaciones es aquella que supone una mayor carga aplicada (Hipótesis 3) en la sección $z = 17,07\text{m}$ (la que queda situada en una zona intermedia de la cuña).

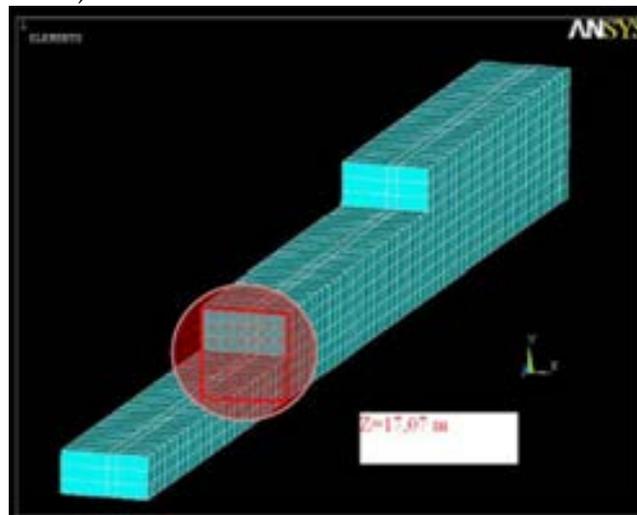


Figura 4.4.5 Sección más solicitada. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se detalla el proceso que se ha seguido para la obtención de la armadura en esta sección, puesto que es la más solicitada.

➤ **Proceso de cálculo**

Analizando los resultados obtenidos en el cálculo numérico, la losa inferior está sometida a una tracción promedio de 2,20 MPa y de 0,80 MPa en sus bordes inferior y superior respectivamente, tal como se muestra en la siguiente tabla.

X	Y	Z	$\sigma_{x, prom}$	$\sigma_{y, prom}$	$\sigma_{z, prom}$	$\tau_{xy, prom}$	$\tau_{yz, prom}$	$\tau_{xz, prom}$	
(m)	(m)	(m)	(N/mm ²)						
0.00	3.00	17.07	0.317	-0.090	2.203	-0.005	-0.028	-0.022	LOSA 1
0.69	3.00	17.07							
0.84	3.00	17.07							
1.30	3.00	17.07							
0.00	3.20	17.07	0.027	-0.232	0.804	0.044	-0.185	-0.001	
1.30	3.20	17.07							

Tabla 4.4.2 Tensiones calculadas para diferentes secciones. Fuente: Elaboración propia.

Los valores obtenidos por el programa se corresponden con una hipótesis de cálculo característica donde no se han considerado las acciones mayoradas. Para el dimensionamiento de la armadura, estos resultados sí han supuesto un aumento del valor mediante un coeficiente de seguridad de 1,50 que engloba tanto las cargas permanentes como las 4 cargas correspondientes a 4 ejes de un vehículo de alta velocidad (de 85 KN cada una).

	$\sigma_{x, prom}$	$\sigma_{y, prom}$	$\sigma_{z, prom}$
MÁXIMA TRACCIÓN PROMEDIO (MPa)	0.32	Compresión	2.20
MÁX. TRACCIÓN PROMEDIO MAYORADA (MPa)	0.48	Compresión	3.30
RESISTENCIA DE CÁLCULO A TRACCIÓN f_{ctd} (MPa)	1.33		
MÁXIMA TRACCIÓN DE CÁLCULO N_d (KN)	1127.70		
ARMADURA TOTAL (cm ²)	25.94		
ARMADURA POR CAPA (cm ²)	12.97		
ARMADURA POR CAPA POR ANCHO (cm ² /m)	5.19		
ROZAMIENTO MÍNIMO NECESARIO (τ_{yz}/σ_y)	0.80		

Tabla 4.4.3 Tensiones promedio. Fuente: Elaboración propia.

La resistencia de cálculo a tracción de un hormigón HA-30 posee un valor de 1,33 N/mm², lo que indica que sólo es necesario disponer, por cuestiones de cálculo,

armadura longitudinal (dirección según el eje Z) debido a que, en la dirección transversal (dirección según los ejes definidos como X), los valores de tracciones obtenidos son inferiores a la resistencia de cálculo a tracción del hormigón. Teniendo en cuenta que la losa tiene una sección transversal de 0,20 x 2,50 m y suponiendo una distribución lineal de tensiones a través de su altura, la resultante de tracciones en la losa en la dirección longitudinal será de:

$$1,50 \cdot 1,5035 \cdot 200 \cdot 2,500 = 1.127.625 \text{ N} = 1.127,70 \text{ KN}$$

Para resistir esa tracción, es necesario disponer una armadura total en la sección de:

$$\frac{1.127,70}{434.782} = 2.594 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 = 25,94 \text{ cm}^2$$

Disponiendo la armadura en dos capas (una superior y otra inferior), sería necesario una cuantía de armado por capa de:

$$\frac{25,94}{2} = 12,97 \text{ cm}^2$$

Que se corresponde con una cuantía a través del ancho de la sección de:

$$\frac{12,97}{2,50} = 5,19 \text{ cm}^2/\text{m} \text{ (\Phi12/0,20 en cada cara)}$$

Hay que tener en cuenta que los resultados obtenidos del cálculo parten de la hipótesis de considerar la cuña de transición como elemento continuo, es decir, que las tensiones tangenciales entre cada una de las diferentes losas deben de resistirse por el propio rozamiento entre las caras de hormigón.

Considerando el rozamiento como una fracción μ de la carga vertical ($F_r = \mu N$), el coeficiente de rozamiento mínimo que se debería garantizar en esta sección es de:

$$\frac{\zeta_{yz}}{\sigma_y} = \frac{0,185}{0,232} = 0,80$$

Durante la construcción de las cuñas deberá asegurarse que el terreno sobre el que apoyan las losas de las cuñas de transición tiene la capacidad portante adecuada y se asegura el rozamiento entre éste y las losas, de igual manera que en el caso anterior.

➤ **Armadura requerida durante el izado**

A continuación, se analizará el armado requerido durante el proceso de izado para una losa de $7,20 \times 2,50 \times 0,20$ m, que es la de mayores dimensiones. Considerando una densidad del hormigón de 25 KN/m^3 y una sección transversal de $0,5 \text{ m}^2$, la carga mayorada debida a la acción de peso propio por unidad de longitud será de:

$$Q_d = 1,35 \cdot 25 \cdot 0,50 = 16,88 \text{ KN/m}$$

Para esa carga, suponiendo la losa sujeta de los puntos más extremos, el momento de cálculo (M_d) y la tracción de cálculo en las armaduras (T_d) será de:

$$M_d = 16,88 \cdot \frac{7,20^2}{8} = 109,4 \text{ KNm}$$

$$T_d = \frac{109,4}{0,8 \cdot 0,20} = 684 \text{ KN}$$

Con esa tracción de cálculo se requiere una armadura en la cara de tracción de:

$$A_s = \frac{684}{434,782} = 1,57 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 = 15,73 \text{ cm}^2$$

$$A_s = \frac{15,73}{2,50} = 6,30 \text{ cm}^2/\text{m} (\Phi 12/0,15)$$

➤ **Armadura a disponer en las losas**

Del dimensionamiento de las armaduras, tanto en servicio como en la fase de izado de la losa, se ha obtenido que, durante la fase de izado, se alcanzan unas sollicitaciones que requieren una armadura de mayor cuantía.

Por tanto, parece lógico modificar los puntos de elevación para que la armadura requerida en fase de servicio sea la que realmente haya que disponer. Para ello, se ha considerado la existencia de dos voladizos con longitudes en torno al 22% de la longitud de la losa.

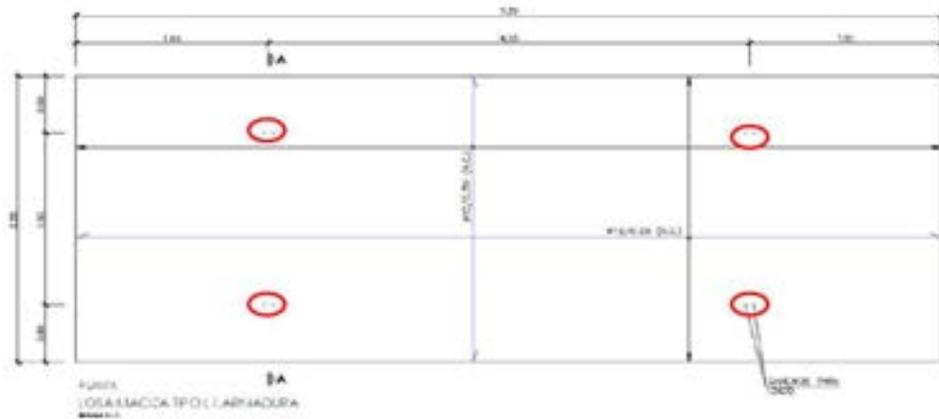


Figura 4.4.6 Definición de los puntos de elevación. Fuente: VALTER.

La situación de los ganchos de izado se ha diseñado con el fin de que el voladizo proporcione prácticamente el momento de empotramiento de una losa biempotrada con una luz igual a la distancia entre apoyos, permitiendo reducir la armadura requerida debido a la compensación que se produce. El detalle de la sección transversal de las losas se observa a continuación:



Figura 4.4.7 Detalle de armado. Fuente: VALTER.

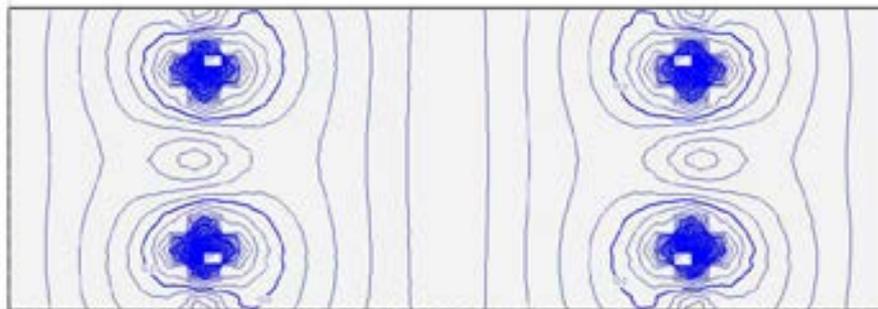


Figura 4.4.8 Detalle de tensiones producidas por el izado. Fuente: VALTER.

En la fase de izado y colocación de las losas, se generan unos esfuerzos locales (donde la placa se iza únicamente a través de la sujeción) en los puntos de sujeción de éstas, que deben ser considerados para evitar problemas durante la fase de colocación. Se ha analizado este fenómeno obteniéndose unos esfuerzos cortantes en el entorno de los apoyos de 57,10 KN/m.

Si se considera que el cortante resistido por una losa de hormigón HA-30 y 0,20 m de canto es de 130,91 KN/m, supone un valor superior al cortante anteriormente citado de 57 KN por lo que, la placa debe resistir dichos esfuerzos.

4.4.3 Dimensionado de los marcos

Al igual que se ha realizado para las losas prefabricadas, la solución compuesta por marcos prefabricados de hormigón armado debe ser dimensionada para resistir los esfuerzos a lo largo de la vida útil de la pieza. Así pues, se pretende dimensionar unas cuñas de transición entre elementos de distinta rigidez a base de marcos prefabricados de hormigón de altura variable.

La geometría prevista de los marcos es de 2,00 x 1,00 m; 2,00 x 1,50 m y 2,00 x 2,00 m, siendo la dimensión progresivamente superior a medida que se sitúan más cercanos a la obra de fábrica. La estructura se diseña totalmente prefabricada y de tal manera que la sección transversal de cada uno de los módulos está compuesta por una única pieza con forma de marco. Dispone de dos losas horizontales: el dintel, capaz de soportar las acciones verticales, y la solera, encargada de la correcta transmisión de las cargas al terreno. Estos elementos se unen entre sí mediante dos hastiales verticales que soportan los empujes horizontales del terreno. La geometría de la sección rectangular se ha acartelado en las esquinas con la intención de dar mayor rigidez a la estructura.

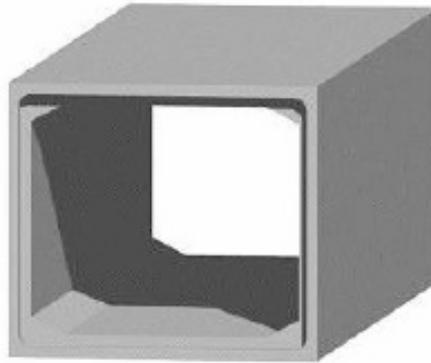


Figura 4.4.9 Elemento tipo marco para cuñas de transición. Fuente: [85]

Para llevar a cabo el dimensionamiento, se deben caracterizar totalmente las acciones en las diferentes situaciones. Es decir, durante la construcción, transporte, colocación en obra y/o puesta en servicio, considerando las características de los materiales y el ambiente al que estarán expuestas las piezas.

4.4.3.1 Hipótesis de carga

Se ha calculado la estructura considerando que se encuentra enterrada bajo una capa de 0,50m de balasto más 2,50 m de rellenos. Los pesos específicos adoptados en los cálculos son los siguientes:

- Peso hormigón armado: 25 KN/m³.
- Peso del relleno: 20 KN/m³.
- Peso del balasto: 20 KN/m³.

Tanto para el banco de pruebas como para posteriormente, cuando los marcos deban ser colocados en el cuerpo del terraplén, deberán considerarse las características geotécnicas del terreno puesto que éstas varían de un lugar a otro.

El tren de cargas contemplado en los cálculos está formado por:

- Cuatro ejes de 170 KN cada uno, separados longitudinalmente entre sí 3 m, en la posición más desfavorable para el elemento y efecto en estudio.
- Una sobrecarga uniformemente repartida de 80 KN/m extendida en la longitud y posición que sea más desfavorable para el elemento y efecto en estudio, pudiéndose situar por tramos discontinuos.

Las cargas definidas anteriormente se han multiplicado por un coeficiente de clasificación de la vía, que vale 0,90 para vías de ancho métrico y 1,21 para vías RENFE y de ancho internacional.

Se han considerado las siguientes acciones debidas al empuje del relleno:

- Peso específico del relleno 20 KN/m³.
- Ángulo de rozamiento interno 30°.
- Coeficiente de empuje al reposo 0,50.

4.4.3.2 Cálculo del armado

Para el cálculo del armado de los marcos se han considerado los diversos estados límite de servicio E.L.S. y estados límites últimos E.L.U en las que en las diferentes situaciones permanentes o transitorias se han comprobado las combinaciones oportunas.

Las diferentes combinaciones de cálculo realizadas se recogen a continuación:

E.L.U.

C001) $1.35 \times P_p + 1.35 \times A_{m,1}$
 C002) $1.35 \times P_p + 1.35 \times A_{m,2}$
 C003) $1.35 \times P_p + 1.35 \times A_{m,3}$
 C004) $1.35 \times P_p + 1.35 \times A_{m,4}$
 C005) $1.35 \times P_p + 1.35 \times A_{m,5}$
 C006) $1.35 \times P_p + 1.35 \times A_{m,6}$
 C007) $1.35 \times P_p + 1.35 \times A_{m,7}$
 C008) $1.00 \times P_p + 1.50 \times C_r + 1.50 \times E_{r,r}$
 C009) $1.35 \times P_p + 1.00 \times C_r + 1.00 \times E_{r,r}$
 C010) $1.35 \times P_p + 1.50 \times C_r + 1.50 \times E_{r,r}$
 C011) $1.00 \times P_p + 1.00 \times C_r + 1.00 \times E_{r,r} + 1.50 \times E_{v,r}$
 C012) $1.00 \times P_p + 1.50 \times C_r + 1.50 \times E_{r,r} + 1.50 \times E_{v,r}$
 C013) $1.35 \times P_p + 1.00 \times C_r + 1.00 \times E_{r,r} + 1.50 \times Q_{v_A}$
 C014) $1.35 \times P_p + 1.50 \times C_r + 1.50 \times E_{r,r} + 1.50 \times Q_{v_A}$
 C015) $1.35 \times P_p + 1.00 \times C_r + 1.00 \times E_{r,r} + 1.50 \times Q_{v_B}$
 C016) $1.35 \times P_p + 1.50 \times C_r + 1.50 \times E_{r,r} + 1.50 \times Q_{v_B}$
 C017) $1.35 \times P_p + 1.50 \times C_r + 1.50 \times E_{r,r} + 1.50 \times Q_{v_A} + 1.50 \times E_{v,r}$
 C018) $1.35 \times P_p + 1.50 \times C_r + 1.50 \times E_{r,r} + 1.50 \times Q_{v_B} + 1.50 \times E_{v,r}$
 C019) $1.35 \times P_p + 1.50 \times C_r + 1.50 \times Q_{v_A}$

Figura 4.4.10 Combinaciones ELU realizadas. Fuente: Elaboración propia

E.L.S

C001) $1.00 \times P_p$

C002) $1.00 \times P_p + 1.00 \times C_r + 1.00 \times E_{r,r}$

C003) $1.00 \times P_p + 1.00 \times C_r$

Figura 4.4.11 Combinaciones ELS realizadas. Fuente: Elaboración propia

Donde:

- P_p : peso propio del marco prefabricado.
- C_r : peso del relleno que gravita sobre el dintel.
- $E_{r,r}$: empuje horizontal de tierras sobre los laterales (reposo).
- $E_{r,v}$: empuje horizontal de las sobrecargas sobre los laterales (reposo).
- $Q_{v,A}$: cargas sobre el dintel debido a sobrecargas (carro centrado).
- $Q_{v,B}$: cargas sobre el dintel debido a sobrecargas (carro desplazado).
- $A_{m,i}$: diferentes posiciones del terraplén en el proceso de relleno.

A continuación, se detalla el armado para cada una de los 3 elementos que conforman la transición mediante marcos prefabricados.

Marco 2 x 2 m

Marco 2 x 1,5 m

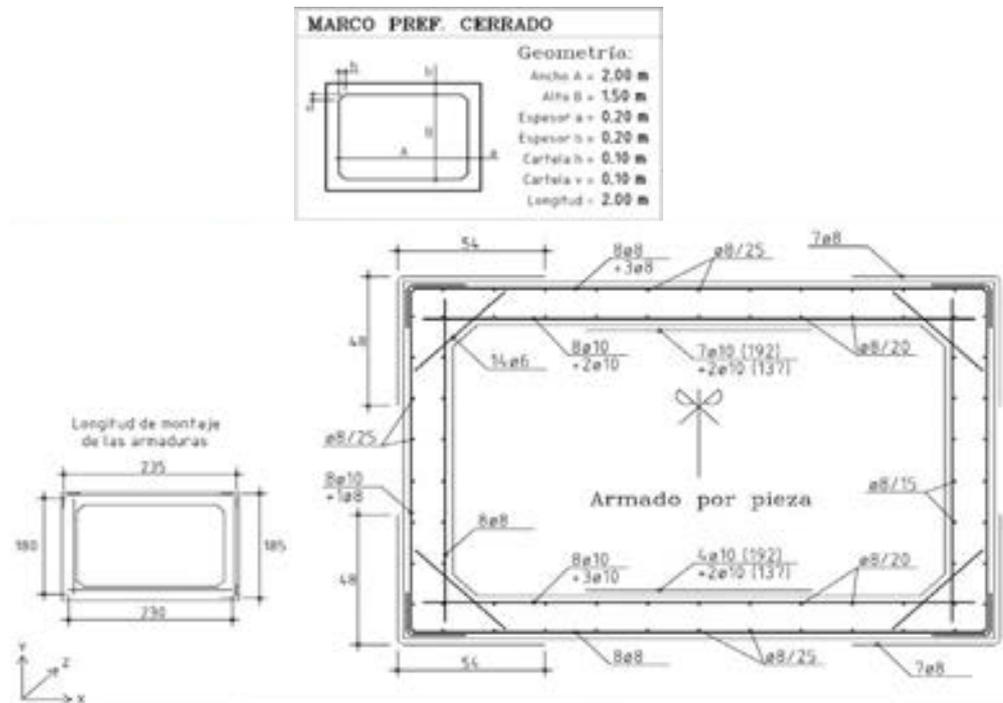


Figura 4.4.13 Geometría y detalle de armado de la sección del marco de 2x1,5m.
Fuente: [85]

Marco 2 x 1 m

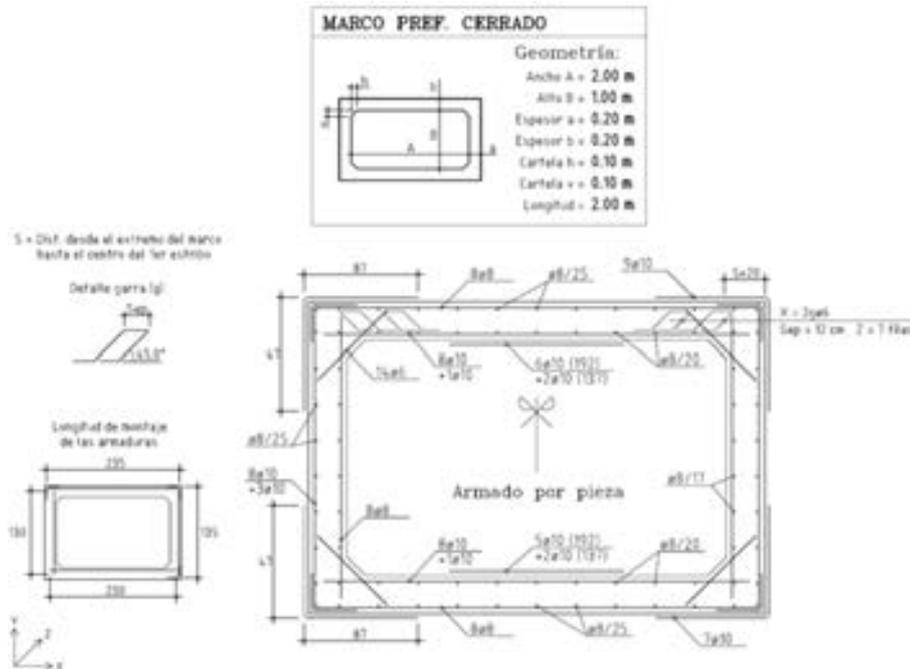
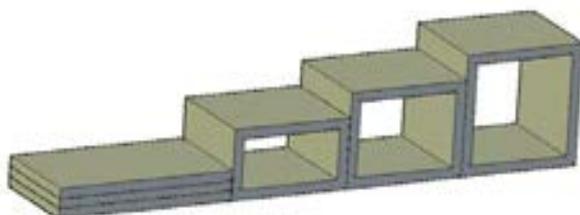


Figura 4.4.14 Geometría y detalle de armado de la sección del marco de 2x1m. Fuente: [85]

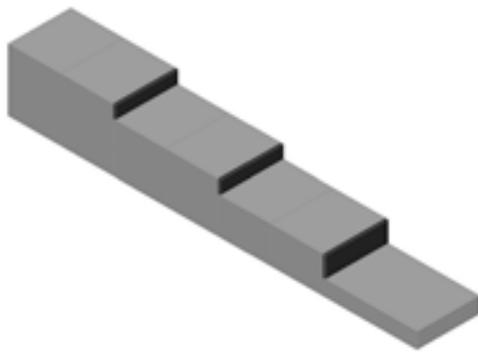
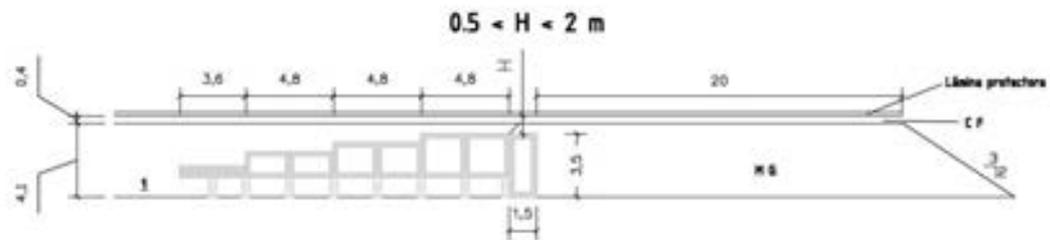
Tras analizar la solución formada por marcos, se ha considerado conveniente disponer lo mismo con los hastiales perpendicularmente a la vía, dado que los huecos laterales deben ser cerrados para evitar la entrada de terreno cuando se dispongan en el interior de los terraplenes.

Así pues, la solución inicialmente considerada debe girarse 90 grados, no influyendo el dimensionamiento de las piezas ya que se ha realizado considerando un valor para las cargas aplicadas suficientemente elevado como para resistir los esfuerzos aplicados, considerando el giro descrito.



Solución inicial

Marcos dispuestos con hastiales enfrentados, necesidad de tapar los huecos con elementos auxiliares.



Solución propuesta

Giro de los marcos y sellado de los huecos para evitar la entrada de material granular.

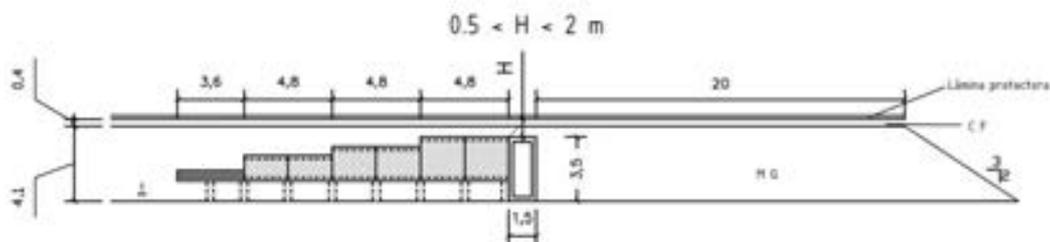


Figura 4.4.15 disposiciones inicial y final de la cuña prefabricada formada por marcos. Fuente: elaboración propia

5. DISEÑO DE LA SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA

DISEÑO DE LA SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA EN BANCO DE PRUEBAS

En el presente apartado se plantea el diseño de la solución constructiva en un escenario de pruebas sobre cuñas de transición construidas a escala real, tanto las cuñas finalistas como cuñas granulares para comparar resultados

Este bloque de la tesis doctoral se dividirá en 3 subapartados. En primer lugar, se describirá el banco de pruebas diseñado y construido para llevar a cabo un ensayo experimental a cargas verticales sobre las cuñas de transición finalistas del análisis multicriterio anterior construidas a escala real, incluyendo un estudio exhaustivo de las propiedades mecánicas del terreno en la zona de actuación para su correcta caracterización. En segundo lugar, se describirá el material instrumental utilizado y su proceso de montaje para la auscultación mecánica de las cuñas de transición construidas en el banco de pruebas con el objetivo de evaluar el comportamiento estructural de las cuñas frente a cargas verticales. Y, por último, se analizarán los resultados obtenidos, y se valorará el comportamiento de las soluciones finalistas junto con una solución convencional.

5.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS

La reproducción de los fenómenos mediante ensayos controlados a escala real son los ensayos que mejor simulan la realidad presente en una vía férrea y de los que se obtiene una mayor información dado que permiten reproducir un fenómeno físico complejo.

En esta tesis, se ha planteado la construcción de un banco de pruebas en el que se pretende reproducir las condiciones existentes en las transiciones de rigidez que se producen en el ferrocarril. De acuerdo con las indicaciones recogidas en el IGP 2008 de ADIF, se han de ensayar las cuatro situaciones existentes en el ferrocarril para diferentes recubrimientos sobre la obra de fábrica donde se reproducirán las distintas situaciones de carga.

Los resultados obtenidos mediante el banco de pruebas se deben considerar teniendo en cuenta que el giro de las tensiones principales tiene una marcada influencia en el comportamiento de los materiales granulares (Momoya et al [86]) por lo que, conseguir reproducirlo como es el caso, a escala real, es de gran importancia para poder representar correctamente dicho efecto.

Pasando a describir con detalle el banco de pruebas que se debe realizar para el análisis de las diferentes cuñas hay que plantearse la organización y diseño del mismo.

En las instalaciones de Forte Hormigones Tecnológicos, S.L., tanto de Yecla como de Chinchilla, se han fabricado los elementos modulares de hormigón armado, losas y marcos respectivamente, que se colocarán en los bancos de pruebas. Para la fabricación de ambas alternativas se ha invertido 4 meses en cada una de las plantas.

En el caso de las losas, se ha planteado la prefabricación montando en planta un banco horizontal nivelado que sirve de encofrado de las caras laterales e inferior de cada una de las placas, albergando la armadura de cada elemento o losa. La armadura de cada losa se monta por separado en la planta y se coloca en estos moldes como un todo uno.

De la misma forma, la configuración de la armadura convive con la instrumentación colocada para la recoger la posterior lectura de datos en el

momento de la auscultación tras el paso de los vehículos en varios ciclos de carga. La instrumentación que se deja colocada se compone de extensómetros de cuerda vibrante que medirán la deformación sufrida por las armaduras con las circulaciones.



Figura 5.1.1 Imagen colocación instrumentación de losas. Extensómetros. Fuente: Elaboración propia.

Los datos registrados servirán para corregir y reajustar, si fuera necesario, los modelos matemáticos de cálculo y simulación utilizados para el diseño de los prototipos. Todas las labores que se ejecutan realimentan otras y de este modo, con las conclusiones que se obtienen, se va dirigiendo el resultado de esta tesis hacia la solución más idónea de resolución de transiciones de rigidez.

Sobre el montaje anteriormente descrito se vierte el hormigón fresco y se vibra mediante regla vibrante hasta conseguir la nivelación de la cara superior. Esta cara queda algo más rugosa que la inferior y laterales.



Figura 5.1.2 Imagen vertido hormigón fresco. Fuente: Elaboración propia.

Previo al hormigonado de las losas, se dejan colocados cuatro elementos, convenientemente cubiertos para evitar el contacto con el hormigón, que servirán de agarre en el momento del izado. Una vez el hormigón ha adquirido la resistencia necesaria se procede a izar la pieza y apilarla en la zona de la planta destinada a su almacenamiento.

En el caso de los marcos, el proceso de prefabricado es similar sólo que se montarán moldes o encofrados interiores y exteriores de las dimensiones necesarias en los que se vierte el hormigón fresco y se vibra mediante vibradores de aguja. En este caso, se han fabricado marcos de una dimensión constante de 2 m de anchura y altura variable de 1 m, 1,5 m y 2 m de forma que, se va incrementando de forma proporcional conforme se aproximan a la obra de fábrica. Al igual que en las losas, en los marcos también se deja colocada la instrumentación (extensómetros) en las armaduras para poder medir cómo y cuánto se deforma el acero con el paso de las circulaciones de los vehículos por las transiciones del banco de pruebas.

Para la posterior manipulación de los marcos, mientras se fabrican se les dota de unos orificios pasantes por donde se introducirán unos elementos a modo de pernos con su determinada tuerca de fijación y que, servirán de elementos de enganche para su izado, manipulación y posterior colocación.

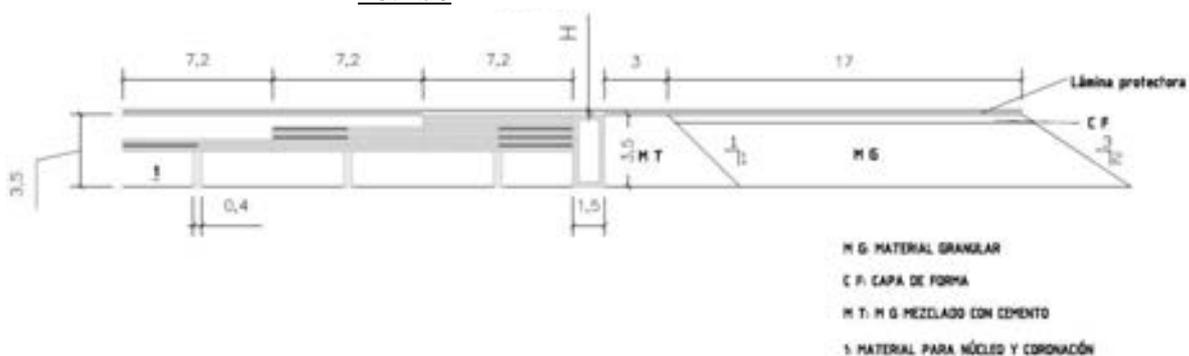
A continuación, se describen las cuñas que deben materializarse:

- Cuñas prefabricadas formadas por losas:
 - Estribo
 - Caso $0 < H \leq 0,5$.
 - Caso $0,5 < H \leq 2$.
 - $H > 2$.
- Cuñas prefabricadas formadas por marcos:
 - Estribo
 - Caso $0 < H \leq 0,5$
 - Caso $0,5 < H \leq 2$
 - $H > 2$

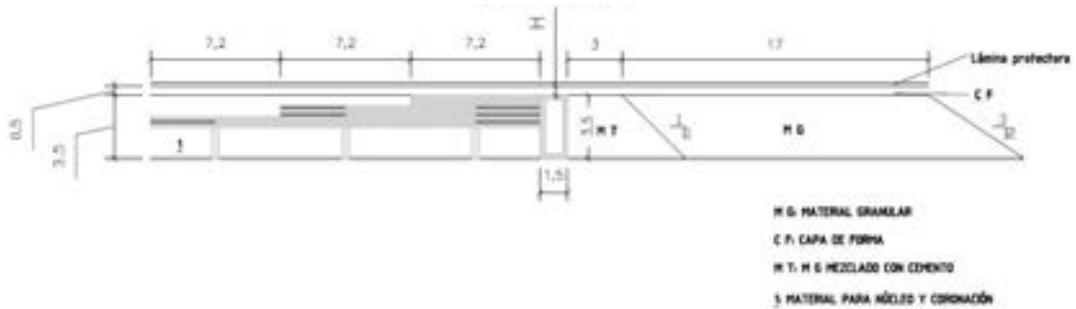
Estas 8 cuñas, correspondientes a cada prototipo combinado con cada caso particular definido por ADIF están constituidas a un lado, la transición formada por elementos prefabricados mientras que, al otro lado de la obra de fábrica, se localiza la cuña granular, tal y como se muestra a continuación.

➤ **Cuñas formadas por losas**

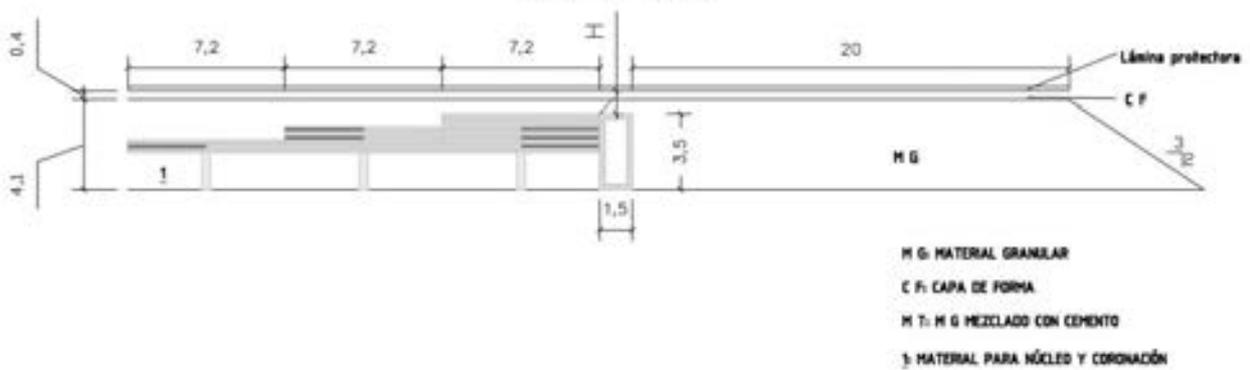
- Estribo



- Caso $0 < H \leq 0,5$



- Caso $0,5 < H \leq 2$



- Caso $H > 2$

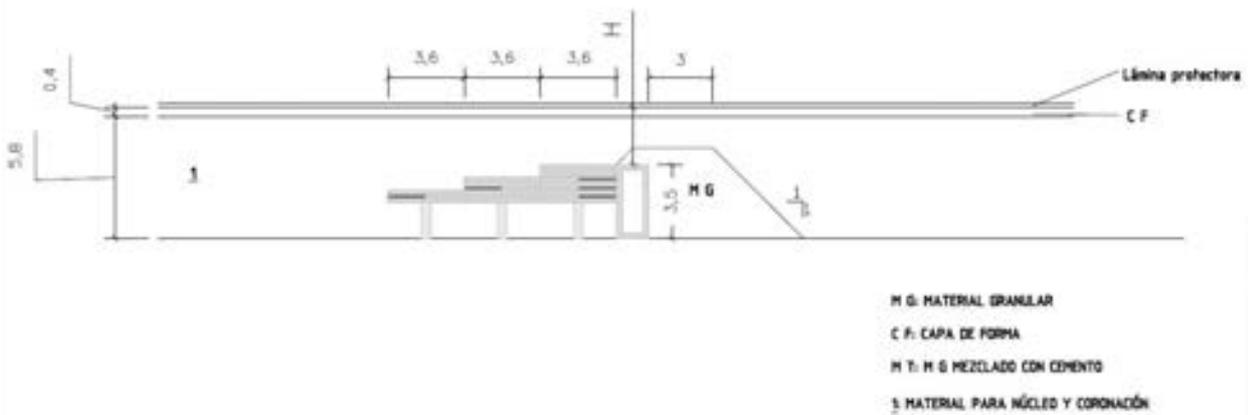
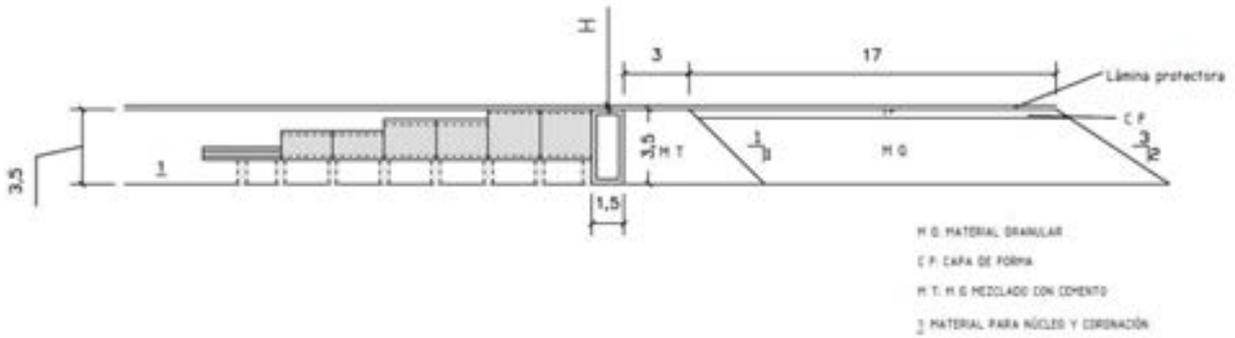


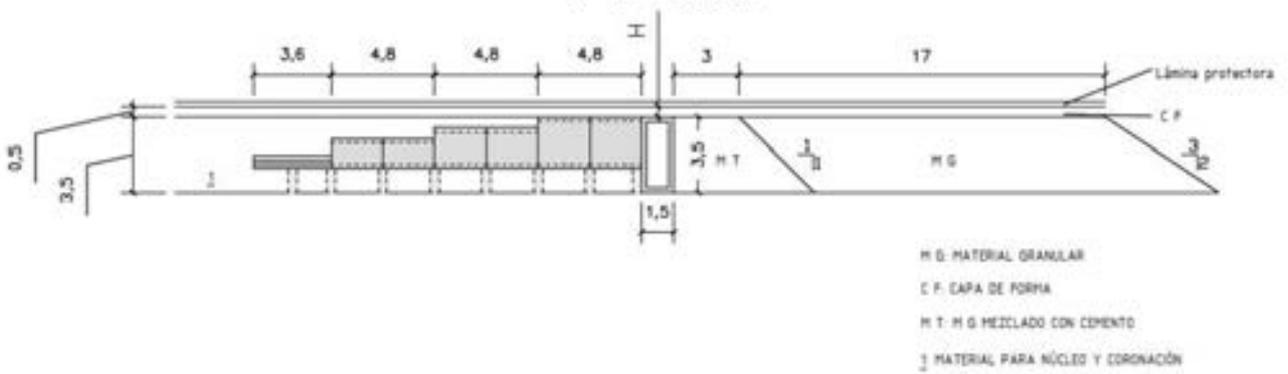
Figura 5.1.3 Secciones en alzado del banco de pruebas de cuñas formadas por losas enfrentadas con cuñas granulares. Fuente: elaboración propia.

➤ **Cuñas formadas por marcos**

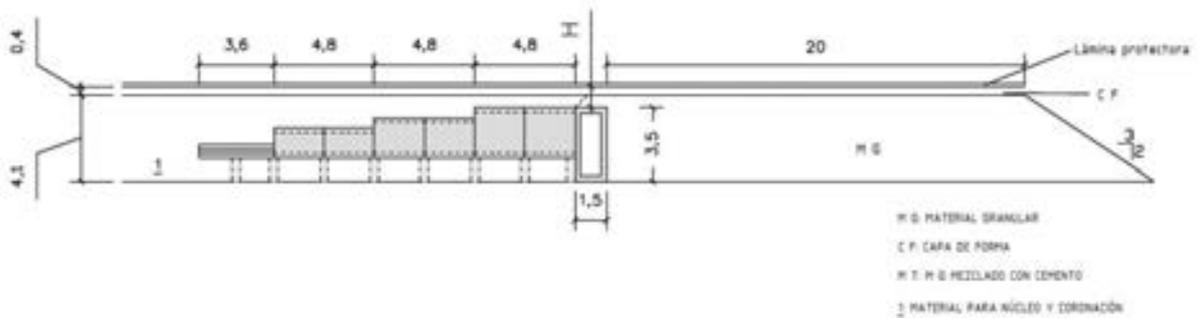
- Estribo



- Caso $0 < H \leq 0,5$



- Caso $0,5 < H \leq 2$



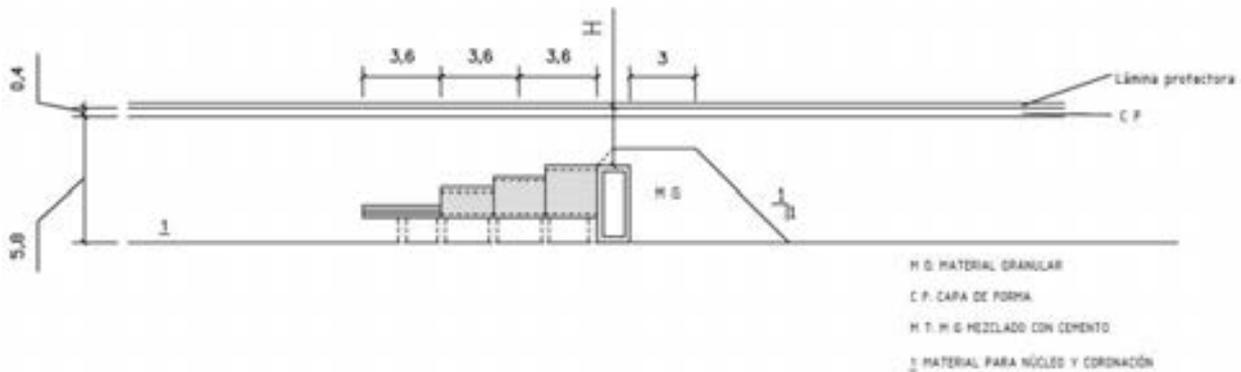
- Caso $H > 2$ 

Figura 5.1.4 Secciones en alzado del banco de pruebas de cuñas formadas por marcos enfrentadas con cuñas granulares. Fuente: elaboración propia.

5.1.1 Diseño del banco

Para llevar a cabo la construcción del banco de pruebas es importante organizar la disposición del mismo, para optimizar el rendimiento constructivo en visión de posibilitar el estudio de las transiciones de forma adecuada cuando circulen vehículos a lo largo de las diferentes transiciones.

Visto el emplazamiento del mismo, se ha considerado oportuno diseñar el banco de pruebas mediante la disposición de las cuñas paralelamente, de forma que para una situación determinada de recubrimiento, es decir, para una cierta H (recordar que existen 4 casos diferenciados por ADIF en función del valor de este parámetro) se colocan las dos tipologías de cuñas prefabricadas, una junto a la otra, separadas al menos una distancia de 5 m entre ejes de cuñas, mientras que al otro lado de la obra de fábrica se dispone la cuña granular definida por ADIF.

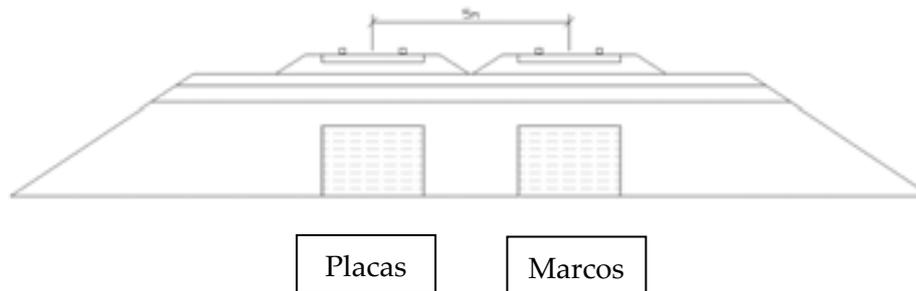


Figura 5.1.5 Sección transversal del banco de pruebas: un terraplén.

Fuente: elaboración propia.

Dicha distancia de 5 m entre ejes de cuñas, para un mismo caso de recubrimiento, debe asegurarse a su vez para el resto de cuñas adyacentes, evitando que las cargas aplicadas sobre cualquiera de las transiciones afecten al resto. Esta distancia es suficiente para impedir que la aplicación de la carga, que representa el efecto de un eje ferroviario en el banco, influya en el resto de transiciones, siendo esta dimensión aproximadamente la distancia entre ejes de vía que se recoge en las IGP de ADIF, donde se considera que no existe influencia entre una vía y la contigua.

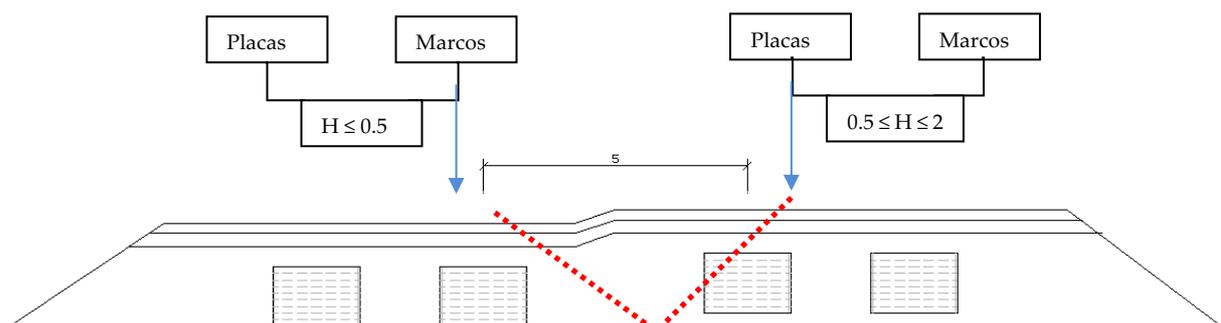


Figura 5.1.6 Sección transversal del banco de pruebas: dos terraplenes contiguos. Fuente: elaboración propia.

Esta primera ejecución del banco de pruebas, mediante la instrumentación interna y externa que se coloque, aportará los datos necesarios referentes al comportamiento de las transiciones de rigidez. Estos datos se utilizarán para modelizar esta situación en concreto y, de las conclusiones que se extraigan, se valorará si es necesario ejecutar un banco de pruebas añadiendo a la infraestructura la típica configuración de la superestructura ferroviaria o directamente estas composiciones se podrían colocar en tramos de vía con garantías de un perfecto funcionamiento en las transiciones.

5.1.2 Caracterización mecánica de la infraestructura de tierra

Para realizar un correcto control de calidad previo y durante la construcción del banco de pruebas, se procede a caracterizar la zona donde se va a construir éste. Para ello, se han tomado muestras de suelos de la parcela que albergará el banco de pruebas mediante calicatas. También se han realizado sondeos que, por su capacidad de atravesar cualquier tipo de material, así como de extraer testigos y efectuar ensayos en su interior, van a permitir testificar y caracterizar el terreno.

Del mismo modo, se recogieron muestras de material granular de machaqueo del que se pretende colocar en todas las composiciones de cuñas que se van a realizar, así como de material granular para núcleo de terraplén como relleno todo uno.

Previamente a la ejecución de las cuñas se ha efectuado el Control de Calidad de los materiales granulares que se emplearían en la construcción de las cuñas. Se comprueba si los materiales son aptos para la colocación en las diferentes capas de los terraplenes, para lo que se han realizado los siguientes ensayos:

- Determinación de la humedad.
- Ensayos granulométricos.
- Límites de Atterberg.
- Proctor Modificado.
- Ensayo C.B.R.
- Contenido en materia orgánica.
- Contenido en sales solubles.
- Contenido en sulfatos.

- Desgaste de Los Ángeles.
- Ensayo Micro- Deval.



Figura 5.1.7 Imagen material granular de machaqueo (izquierda) y de terraplén (derecha). Fuente: ITC.

Sobre la grava – cemento empleada en la ejecución de las cuñas granulares se ha estudiado la fórmula de trabajo de la misma, determinando su tiempo de fraguado, su plazo de trabajabilidad y su resistencia a compresión mediante probetas de grava- cemento.

Durante la ejecución de las cuñas granulares se ha determinado la densidad y humedad “in situ” mediante equipos de isótopos radiactivos y ensayos de placa de carga de diámetro 600 mm para efectuar el control de la compactación.

De la misma forma que para los materiales se realiza el control de calidad a los prototipos que se fabricaron. Este control de calidad consistió en diversos ensayos tanto al hormigón fresco de fabricación de los prototipos como a los materiales que lo constituyen.

Así, a los áridos se les realizaron los ensayos de granulometría, contenido en finos, terrones de arcilla, partículas de bajo peso específico, densidad, porosidad, coeficiente de absorción y contenido de agua, resistencia al desgaste (Micro Deval) y a la fragmentación (Los Ángeles), coeficiente de forma e índice de lajas, partículas blandas, contenido de humus, equivalente de arena, azul de metileno, propiedades térmicas y de alteración de los áridos, coeficiente de friabilidad, ensayo de sulfato de magnesio, contenido total en azufre, sulfatos solubles en ácido, reactividad potencial de los áridos, cloruros solubles en agua, módulo de finura.

Sobre el cemento se determinó la resistencia mecánica, tiempo de fraguado, estabilidad de volumen y análisis químico.

De las aguas de amasado se comprobó su pH, sulfatos, cloruros, sustancias disueltas, aceites, grasas e hidratos de carbono.

Igualmente, de los aditivos para hormigones se ensayó su pH, contenido en halogenuros totales, densidad aparente y determinación del extracto seco convencional.

En cuanto al acero, se comprobó su sección equivalente, características del corrugado, ensayo de doblado - desdoblado y las características mecánicas referentes a límite elástico, tensión y alargamiento de rotura.

En varias jornadas y, en las diferentes plantas, se tomaron muestras del hormigón fresco con el que en esos momentos se estaban fabricando las piezas. En este control de fabricación se realizaron medidas de la consistencia en el momento de recoger 25 probetas cilíndricas para su posterior conservación, refrentado y rotura a compresión. Además, de estos ensayos se determinó también el contenido en aire, densidad, aire ocluido, profundidad de penetración de agua bajo presión, ensayo de tracción indirecta (ensayo brasileño) y de flexión de probetas prismáticas.

Sobre el producto terminado, losas y marcos, se realiza el reconocimiento esclerométrico para comprobar la homogeneidad de la fabricación en los prototipos finales y se compara con la extracción de testigos de hormigón endurecido mediante el ensayo de compresión tras corte, curado y refrentado del mismo. También se determina la densidad real, aparente, porosidad y absorción.

De las piezas prefabricadas finales se comprueban sus dimensiones, geometría y armado. Además, se les realizan ensayos a flexión para los que se sugiere, en el caso de las losas, someter a la placa a dos cargas iguales en los tercios de la longitud principal L, desde los extremos, de forma que el tramo central de la misma quede sometido a flexión pura, logrando así la sollicitación buscada.

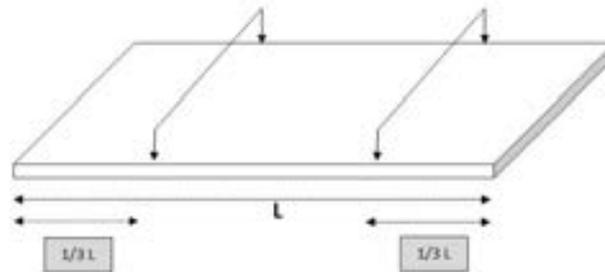


Figura 5.1.8 Esquema de ensayo para losa. Fuente: elaboración propia.



Figura 5.1.9 Imágenes del ensayo a flexión en la losa. Fuente: elaboración propia.

Según el momento de diseño ($M_d=109 \text{ KN}\cdot\text{m}$), cuando la carga aplicada esté en el entorno de las 3,5 - 4 toneladas totales debería empezar a figurarse. Es muy interesante medir la flecha durante el ensayo.

Para los marcos, el esquema de diseño sería muy similar. De la misma forma se aplicarían las cargas (dos cargas iguales) a un tercio, desde cada extremo, de su longitud principal. En este caso, se debe intentar que el marco apoye en toda su base sobre una superficie plana, para que se transmitan correctamente los esfuerzos. El esquema de ensayo se observa a continuación, con la carga a lo largo de todo el dintel:

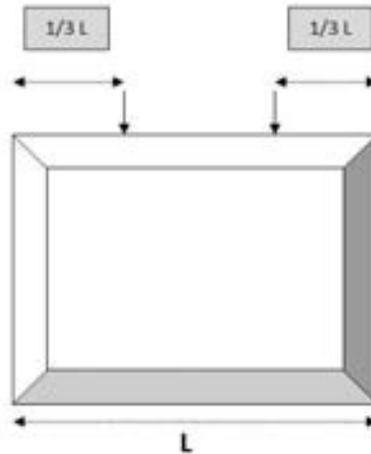


Figura 5.1.10 Esquema de ensayo para marco. Fuente: elaboración propia.

De la misma forma que para las placas, según el momento de diseño ($M_d=10 \text{ KN}\cdot\text{m}$), cuando la carga aplicada esté en el entorno de las 18 toneladas totales debería empezar a figurarse. Es muy interesante medir la flecha durante el ensayo.



Figura 5.1.11 Imágenes del ensayo a flexión para el marco. Fuente: elaboración propia.

5.1.3 Construcción del banco de pruebas

En la construcción del banco de pruebas, tras conocer el solar que lo albergaría, se realizó un levantamiento topográfico con la finalidad de encajar las diferentes secciones o transiciones que se debían construir. Como ya se ha adelantado, los diferentes perfiles se dispusieron de forma paralela donde cada uno de ellos representará una transición de rigidez de las cuatro que deben construirse.

Tras conocer la posición definitiva de las secciones a ejecutar, se desbrozó y excavó el terreno hasta la cota en la que se conseguía eliminar el suelo vegetal y todo aquel material inadecuado (no apto para recibir cargas) según los resultados obtenidos de los sondeos y calicatas y se preparó la superficie del solar regularizándola, de modo particular dependiendo de a qué transición correspondía, para recibir los prefabricados, así como para ejecutar las cuñas de transición granulares. Contemporáneamente se realizó la caracterización del terreno de la parcela.

Se consideró que, para el caso de las cuñas de estructura a rasante o estribo pudiera funcionar como transición de rigidez era necesario pilotarla simplemente para restringir el movimiento vertical. Estas columnas se han construido e incluso se ha planteado si, en el caso de que se registraran asientos verticales en las líneas de asiento del cimiento de la estructura, colocar células de presión en el contacto entre estas columnas y el fondo del terraplén para determinar qué presiones recibirían y, por tanto, su necesaria presencia en la estructura.

La colocación de la instrumentación interna para la auscultación posterior se ha debido sincronizar perfectamente con la construcción de las diferentes secciones ya que, es la manera de poder medir ciertos parámetros (asientos, presiones, etc.) y poder comparar el comportamiento de las cuñas granulares con las prefabricadas. Por tanto, una vez preparada la plataforma del banco de pruebas, se colocaron diferentes líneas de asientos para poder medir los desplazamientos verticales que se producen en cada una de las transiciones.

Estas líneas de asiento colocadas en el cimiento de la estructura o fondo de cada terraplén se toman como referencia suponiendo esta superficie como punto fijo, es decir, que no experimentará ningún asiento vertical ante el paso de las circulaciones. En la siguiente figura se puede observar la situación de estas líneas de asientos en uno de los terraplenes.



Figura 5.1.12 Detalle de la colocación de líneas de asiento en el cimientó del banco de pruebas. Fuente: elaboración propia.

De la misma forma, también se colocan en estos puntos diversas células de presión con el objetivo de registrar posibles presiones y/o tensiones que transmitirían tanto las cargas de materiales de la construcción de los terraplenes como los vehículos mediante sus circulaciones por las diferentes transiciones ejecutadas.

Conforme a los requerimientos de la obra, se iban suministrando prefabricados desde la planta de Yecla (losas) y de Almansa (marcos) para construir los diferentes terraplenes. El transporte se realizaba en camiones convencionales provistos de plataformas, sin necesidad de utilizar ningún transporte especial y sus consecuentes permisos lo que abarata, facilita todas las operaciones y acorta los plazos constructivos.

Estos camiones llegaban a la traza de la obra y, tras posicionarse lo más próximos posible, gracias a los accesos que se les habían habilitado para facilitar las maniobras, al terraplén correspondiente con los prefabricados que portaban, se iba descargando elemento por elemento mediante una grúa directamente desde la plataforma del camión hasta su ubicación definitiva en la cuña. Tanto para realizar los enganches de las eslingas de la grúa con cada prefabricado como para la colocación exacta y definitiva de cada pieza en cada transición se necesitaba ayuda manual. El rendimiento de colocación de los prefabricados era muy alto comparado con el de ejecución de las cuñas granulares.



Figura 5.1.13 Descarga de las losas prefabricadas en el banco de pruebas. Fuente: elaboración propia.

En cuanto se ha terminado de colocar todos los elementos prefabricados de las diferentes transiciones, de nuevo se vuelven a colocar líneas de asientos para medir los desplazamientos verticales que sufre la configuración ejecutada ante el paso de las circulaciones. De la misma forma, las células de presión colocadas registrarán las presiones y tensiones que reciben estos prefabricados y, en las mismas posiciones, al otro lado de la “obra de fábrica” las capas granulares.

La disposición final de una de las transiciones ejecutadas se puede observar en la siguiente figura.



Figura 5.1.14 Transición caso $0 \leq H \leq 0,5$ m. Fuente: elaboración propia.

Una vez ejecutadas las cuñas con elementos prefabricados y habiendo dejado colocada la instrumentación interna, se cubren con material granular y se prepara la transición con el resto de capas (capas de forma, etc.) para el paso de los diferentes vehículos.

Una vez ejecutada la capa de forma de las transiciones, quedaría pendiente, antes de terraplenar, colocar la instrumentación interna compuesta por extensómetros de varilla e inclinómetros, cuya función es registrar si los terraplenes sufren deformaciones horizontales en profundidad ante el paso de los vehículos en los ciclos de auscultación. También en estas zonas y de forma puntual se dejará colocada instrumentación para medir posibles asientos puntuales de la estructura.

Estos datos registrados son parámetros reales que serán de mucha importancia pues servirán para comparar los valores utilizados por los cálculos (previsiones de comportamiento) con parámetros y respuestas reales. De esta forma, se verificarán y contrastarán los valores obtenidos con los previstos y se podrá determinar el comportamiento real de los diferentes elementos de la infraestructura ante la aplicación sucesiva de las cargas y comparar así con los teóricos.

5.2 PARÁMETROS DE MEDIDA Y AUSCULTACIÓN

5.2.1 Introducción

El diseño del banco de pruebas se ha organizado mediante la disposición de las cuñas paralelamente, de forma que para una situación determinada de recubrimiento (existen 4 casos diferenciados en función del valor de este parámetro) se colocan las dos tipologías de cuñas prefabricadas, una junto a la otra, mientras que al otro lado de la obra de fábrica se dispone la cuña granular.

El terraplén se construye directamente sobre el terreno natural, con un acondicionamiento que consiste en destronque y desboque, preparando la superficie para recibir el banco de pruebas. Hay que destacar que las medidas en campo o en el banco de pruebas son, sin lugar a duda, la mejor manera de comprobar la validez de los modelos elaborados, así como de las hipótesis y simplificaciones realizadas. Sin embargo, resulta costoso y difícil lograr una caracterización completa del terreno y una buena precisión en las lecturas realizadas.

El modelo numérico realizado posee una división representativa del subsuelo en las distintas capas de suelo, objetos estructurales y diferentes etapas de construcción y carga. Por ello, la caracterización de cada uno de estos elementos es fundamental para poder utilizar y validar los modelos realizados, siendo de esta forma capaces de simular adecuadamente los fenómenos que ocurren y determinar el comportamiento de infraestructura y superestructura ante las solicitaciones debidas a las diferentes cargas y velocidades de circulación del material ferroviario.

Así pues, uno de los objetivos marcados para esta tesis se centra en la auscultación, el seguimiento y control del banco de pruebas diseñado determinando los parámetros significativos de comportamiento en estas secciones instrumentadas. Para ello, es necesaria la instalación de una serie de dispositivos de medida, capaces de obtener datos de diferentes parámetros que se desea medir, y que se describen en este documento. Dichos instrumentos permiten contrastar directamente valores utilizados por los cálculos y previsiones de comportamiento con parámetros y respuestas reales. Dada la modularidad de las soluciones planteadas (debido a que las transiciones están formadas por el conjunto de piezas de distintas dimensiones y colocación) los resultados obtenidos deben permitir estudiar con detalle las configuraciones empleadas, pudiendo definir las modificaciones oportunas a fin de conseguir la transición deseada, jugando con la disposición de los elementos fabricados.

De esta forma, verificando y comparando los valores obtenidos con los previstos se puede determinar el comportamiento real de diferentes elementos de la infraestructura y compararlos con los teóricos. Para ello, se ha desarrollado un plan de auscultación, su puesta en obra, el control de la instrumentación durante la ejecución de la obra y la monitorización de los resultados. Así pues, se determinan los parámetros y características que permitan analizar la interacción entre suelo y las estructuras prefabricadas instaladas en el cuerpo de los terraplenes, para poder someter a examen la reacción del terreno frente a los esfuerzos previstos.

5.2.2 Sistemas de auscultación y monitorización

El Sistema de auscultación asociado al estudio del comportamiento de las distintas obras de tierra está formado por una serie de dispositivos de adquisición

de datos, instalados en las distintas secciones instrumentadas de plataforma susceptibles de control y que permiten contrastar los valores teóricos y medidos.

Se definen, dentro del sistema en su conjunto, tres subsistemas claramente diferenciados y que pueden clasificarse de la siguiente forma:

- **“Instrumentación”**, estando constituido por los propios dispositivos de control y recogida de datos (formados por sensores y equipos de medida, con su aparataje asociado y cableado de los mismos), cuya misión es captar la información primaria y transmitirla al siguiente nivel.
- **“Estaciones de Adquisición”** con autonomía propia de gestión de la información, con sus medios de telecomunicación y con su red de elementos de campo y sistemas de alimentación.
- **“Centro de Control”** donde se centraliza toda la información del Sistema, recopilando los datos enviados por todas las Estaciones de Adquisición.

5.2.3 Parámetros y magnitudes del banco de pruebas

Con el fin de comparar los diversos parámetros medidos en el banco con los modelos numéricos y determinar el comportamiento de los distintos materiales empleados se pretende obtener valores de los siguientes aspectos:

- Presiones en cimiento, mediante células de presión total.
- Desplazamientos verticales en coronación, mediante línea continua de asientos.

Es importante considerar que la auscultación se realiza tanto en las transiciones formadas por los elementos prefabricados como en la granulares, pudiendo comparar ambas soluciones. El primero de los aspectos (tensiones verticales) está relacionado con el estado tenso-deformacional en el que se encuentran las distintas capas de la infraestructura ferroviaria. Las tensiones registradas en cada una de las capas (terraplén y capa de forma) proporcionan información acerca de la difusión de las tensiones y de la distribución de las mismas.

Del estudio geotécnico se han obtenido los siguientes valores:

- Tensión Admisible de Trabajo: 2,9 kg/cm²
- Asientos totales admisibles: 5,0 cm.

Mediante los distintos sistemas contemplados es posible comparar, por un lado, el estado tensional del terraplén y de las capas superiores en la cuña con el prototipo prefabricado y la cuña granular, con el fin de observar las diferencias de comportamiento entre transición convencional formada por materiales sueltos y aquella compuesta por elementos prefabricados de hormigón armado (placas o marcos), mientras que por otro lado, es posible comparar la difusión de las tensiones aplicadas por el paso de un vehículo en el banco con la obtenida en los modelos numéricos, permitiendo la posibilidad de calibrar estos últimos y que sean capaces de simular la respuesta real del material estudiado.

En cuanto a las líneas de asiento, hay que destacar que esta técnica de auscultación evita los laboriosos procedimientos y técnicas topográficas tradicionales, sirviendo de instrumento de seguimiento geométrico de los mismos y permitiendo la representación gráfica del terraplén original y de su deformada. Las líneas continuas de asiento proporcionan una metodología para la lectura continua de asientos, en este caso, aplicada a los terraplenes del banco de pruebas. Con este tipo de técnica es posible, además, calcular los volúmenes de tierra necesarios para compensar el hundimiento de los terraplenes de forma exacta, dado que se obtiene el descenso producido a lo largo del terraplén y, por tanto, la necesidad de material en la coronación del mismo para obtener la cota deseada.

Una de las principales ventajas de este sistema con respecto a otros sistemas de medida in situ estriba en que se obtienen perfiles continuos de las deformaciones en lugar de datos puntuales, por lo que se obtiene a lo largo de todo el terraplén el perfil de deformaciones de forma precisa.

5.2.4 Montaje, auscultación y medida de parámetros de control

5.2.4.1 Células de presión

Estos dispositivos permiten controlar las presiones directas transmitidas al cimiento durante las sucesivas fases de ejecución de los terraplenes y las transiciones, así como la carga transmitida por el paso de los vehículos durante las pruebas previstas.



Figura 5.2.1 Célula de presión

Las células de presión obtienen la tensión que se produce entre las dos capas en las que se queda instalada. La presión ejercida entre las dos placas hace que se excite la cuerda vibrante conectada directamente a un diafragma. Como resultado se obtiene una frecuencia que es registrada y mostrada por la unidad de lectura. Las células que se han empleado son capaces de medir la presión, para un instante determinado, hasta 1000 bares con una resolución de 0,25 bares y una precisión de 0,1%.

La instalación de células de presión se ha realizado a dos niveles distintos y a dos distancias diferentes de la obra de fábrica instalada, a ambos lados de la misma. La primera de las cotas donde se ha dispuesto las células de presión corresponde al fondo del terraplén, mientras que, por otro lado, se han instalado sobre los prefabricados, es decir, en la cota superior de los prototipos de hormigón armado, tanto en la parte del prototipo como en la transición granular, para comparar el comportamiento de ambas (véase figura siguiente).

➤ **Sección longitudinal**

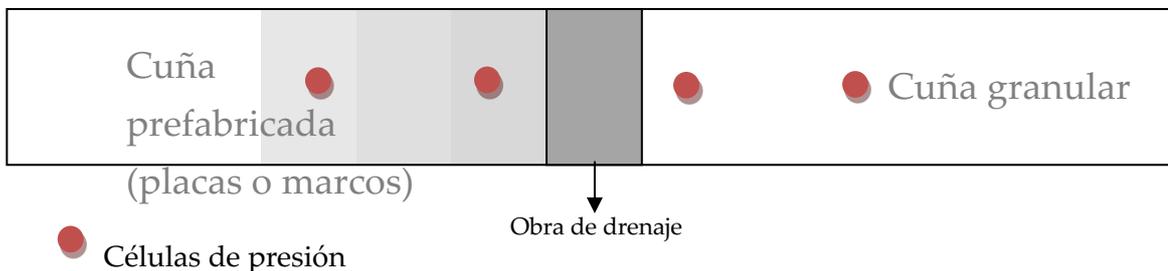


Figura 5.2.2 Ubicación de las células de presión en el banco de pruebas. Fuente: elaboración propia. Fuente: Elaboración propia

Las células de presión de la base de terraplén permiten obtener la tensión a la que está sometido el terreno. Es importante conocer dicho valor, pues en función del tipo terreno sobre el que discurre la infraestructura puede soportar más o menos nivel de tensión. Por otro lado, es importante conocer el efecto en cuanto a sollicitación vertical del terreno, dado que se pretende no aumentar el nivel tensional del terreno debido a la disposición de las placas y los marcos prefabricados, por lo que la comparativa de los valores obtenidos en la cuña granular y la formada por elementos prefabricados proporciona una información muy valiosa en este sentido.

La instalación de las dos células de presión, tanto en el fondo como en la parte superior permiten obtener la diferencia de tensión que se produce entre la zona más "rígida", cercana a la obra de fábrica y donde los elementos prefabricados tienen unas mayores dimensiones y el final de la transición, donde interesa que la rigidez sea similar a la del terraplén de acceso. Estos valores de tensiones, además de comprobar el efecto de los prefabricados sobre el suelo, permiten obtener información acerca del estado tensional de la infraestructura ferroviaria en las inmediaciones de la obra de fábrica, dado que es bien conocido que el aumento de la rigidez de la infraestructura provoca un mayor nivel de esfuerzos en el balasto, con los consiguientes problemas de deterioro que esto ocasiona.

5.2.4.2 Líneas de asiento

Uno de los parámetros o factores más importantes en el estudio del banco de pruebas es el conocimiento de los asientos del terraplén. Para este fin se han dispuesto unos dispositivos, llamados líneas de asiento, que permiten registrar las deformaciones del mismo a lo largo de la sección. Estas líneas de asiento están especialmente diseñadas para el control de movimientos verticales a lo largo de un eje horizontal. Al igual que en el caso de las células de presión, las líneas de asiento se han colocado a la altura de la cota superior de los prefabricados. El objetivo de la instalación de estos dispositivos es la de obtener el perfil de deformaciones del mismo, pudiendo observar las deformaciones del terraplén.

Las líneas continuas de asiento consisten, fundamentalmente, en la colocación en sentido transversal al eje del terraplén de una manguera flexible, destinada a quedar embebida en el terreno. Esta manguera se coloca en una zanja excavada a propósito para su instalación. Posteriormente, el terraplén se construye sobre la zanja, de forma que los asientos del terraplén deformarán la manguera, registrándose dicha deformación en el aparato de registro oportuno.

El sistema de medida se basa en la diferencia de presión existente entre dos puntos de medida debido a la diferencia de cota de los mismos en circuito relleno de fluido, tomándose como referencia fija uno de ellos (en una de las arquetas) y el otro el sensor de asientos que se posiciona en los diferentes puntos situados a lo largo del eje de medida.



Figura 5.2.3 Dispositivo de líneas de asiento

Para registrar esta información se ha empleado un dispositivo de alta precisión capaz de medir una deformación desde +1,5m a -3,5m..

Con las lecturas de los asientos producidos a lo largo de la manguera en el tiempo se puede representar, llevando a cabo las correcciones oportunas, la deformada del terraplén, siendo dicha deformada el valor de la deformación vertical para cada distancia horizontal x respecto de un origen de referencias.

La disposición de las líneas de asiento se ha realizado, para todas las cuñas, a 1, 10 y 20 metros de la obra de fábrica (para las cuñas prefabricadas) y 1,5, 6,5 y 15 metros (para las cuñas granulares), tanto para las cuñas prefabricadas como para aquellas granulares, tanto en el fondo del terraplén como en la parte superior de los prefabricados (véase esquema siguiente).

➤ Sección longitudinal

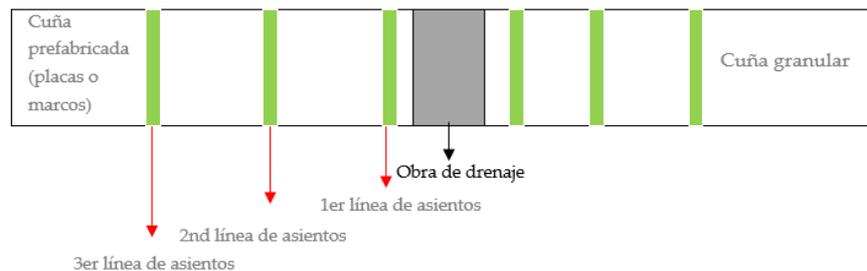


Figura 5.2.4 Ubicación de las líneas de asiento en el banco de pruebas. Fuente: elaboración propia

➤ **Sección transversal**

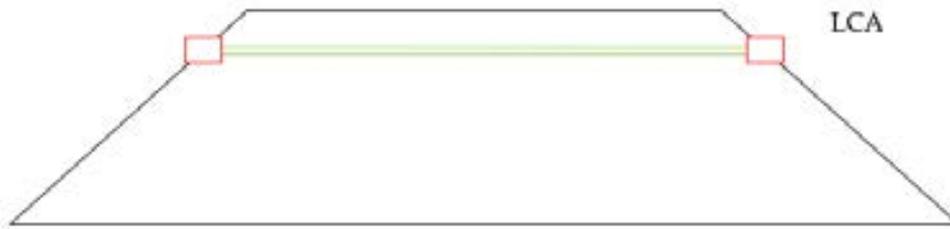


Figura 5.2.5 Ubicación de las líneas de asiento en el banco de pruebas a distintas cotas de profundidad. Fuente: elaboración propia

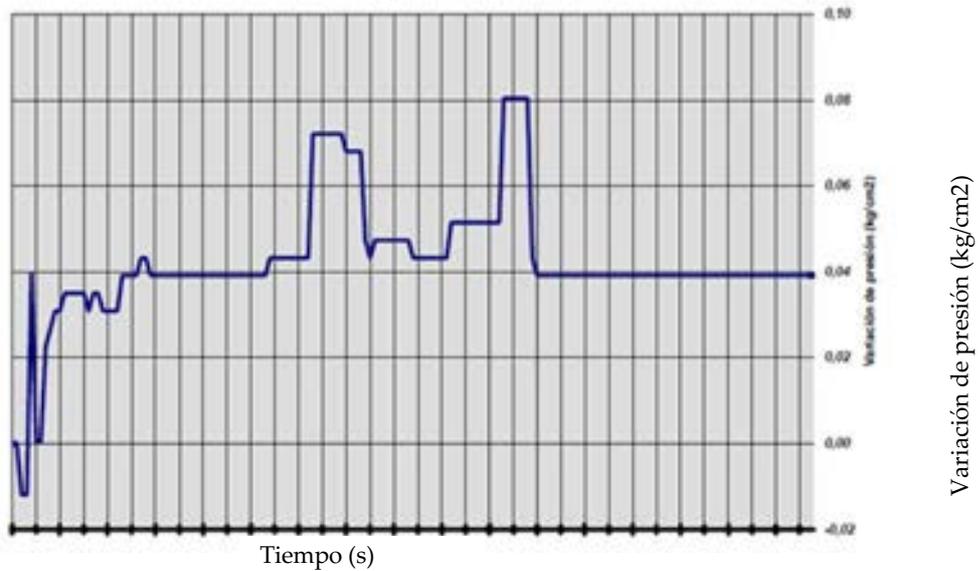
El perfil transversal del terraplén, para un cierto instante, puede obtenerse restando a cada punto de la superficie del terraplén la deformación o desplazamiento vertical medido. No obstante, hay que tener en consideración que esta metodología práctica no es del todo precisa, dado que se prescinde de los reajustes horizontales que se producen en el cuerpo del terraplén por deformación del mismo.

Por lo tanto, las líneas de asiento proporcionan una metodología sencilla para determinar la evolución de los asientos. Además, proporcionan datos de asiento que permiten el contraste de las hipótesis iniciales de deformación del terreno calculadas mediante métodos numéricos para determinados estados de carga con el comportamiento real del terreno, permitiendo avanzar en el conocimiento del comportamiento de los suelos. La determinación de la deformación a distintas separaciones de la obra de fábrica permite estimar el valor de la rigidez en cada punto, de forma que se obtiene la efectividad de los elementos prefabricados frente a las cuñas granulares.

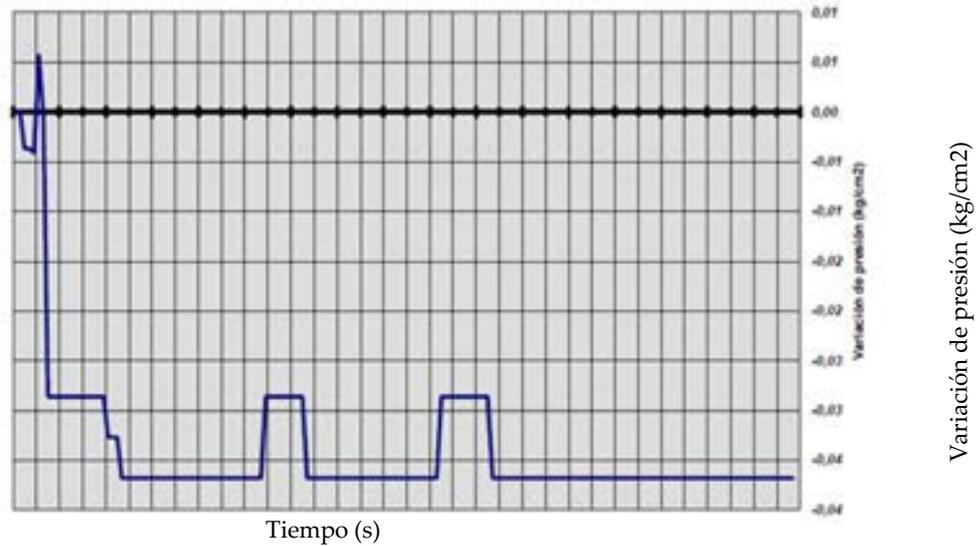
5.3 RESULTADOS OBTENIDOS

Una vez instalado el equipo instrumental, fueron llevados a cabo ensayos estáticos consistentes en la aplicación de 3 cargas (13, 16 y 20 t por eje) en diferentes secciones de las cuñas para analizar su deformación. Fueron llevados a cabo una adquisición de datos de desplazamientos verticales en la parte superior de la vía a diferentes distancias del punto de transición durante los ensayos de carga estática en ambas cuñas, granular y prefabricada.

En una primera observación se obtuvo la lectura de que la cuña formada por losas experimentaba unas variaciones de presión de menor magnitud. En la siguiente figura se muestra la variación de presión a lo largo del tiempo en células colocadas en la base del marco central de la cuña formada por marcos y en la base de la losa central de la cuña formada por losas.

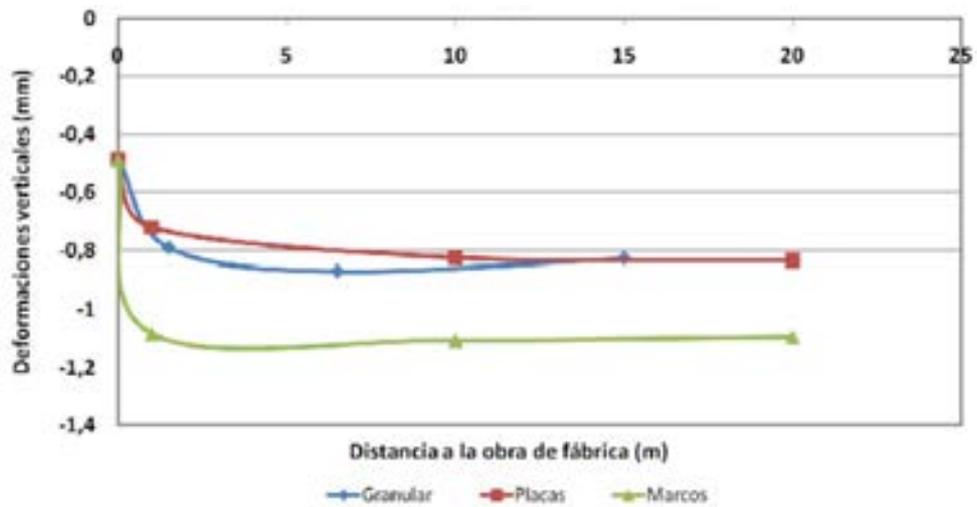


Gráfica 5.3.1 Variación de la presión a lo largo del tiempo en las cuñas formadas por marcos. Fuente: elaboración propia



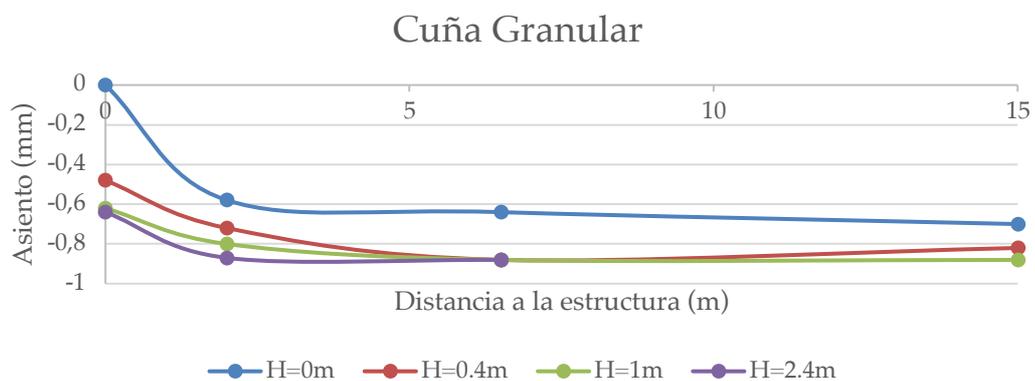
Gráfica 5.3.2 Variación de la presión a lo largo del tiempo en las cuñas formadas por losas. Fuente: elaboración propia

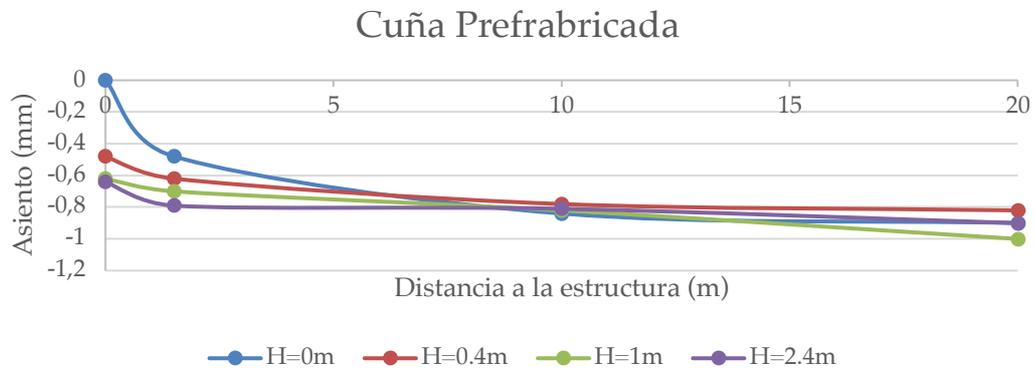
Por otro lado, de los resultados obtenidos respecto a los asientos se detectó que en los marcos no se reproducía el efecto cuña esperado para graduar el acceso del tren a la obra de paso, apareciendo un escalón pronunciado al comienzo de la zona de transición, y manteniéndose un perfil constante de asientos en todo el tramo. Estos resultados se deben evitar puesto que este fenómeno es perjudicial para la vida útil de la zona de transición pues es generador de acciones dinámicas graves para la infraestructura ferroviaria, por lo que el empleo de marcos se descarta como propuesta de diseño de cuña de transición.



Gráfica 5.3.3 Perfil de asientos en el caso 2 H=0.4m para cada cuña ensayada. Fuente: elaboración propia.

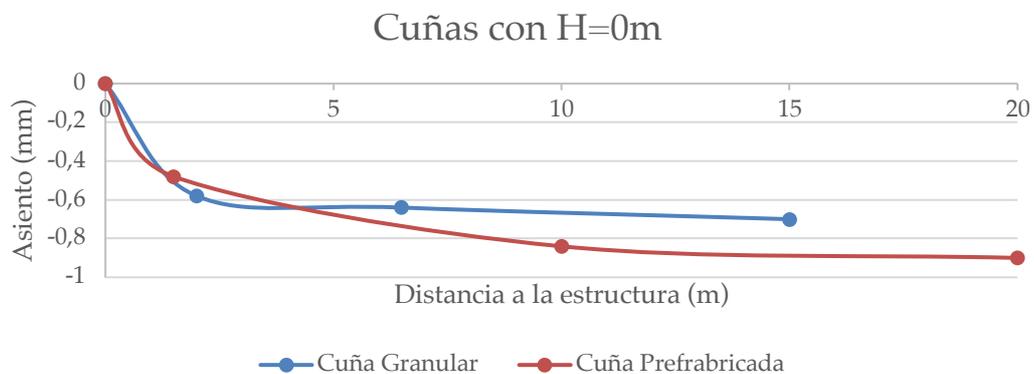
Por tanto, los resultados entre cuñas prefabricadas con losas y granular fueron comparados para comprobar el correcto comportamiento estructural de las nuevas cuñas estudiadas, como se muestran en la figura siguiente. El eje x indica la distancia desde la estructura, mientras que el eje y muestra el desplazamiento vertical de la parte superior de la vía.



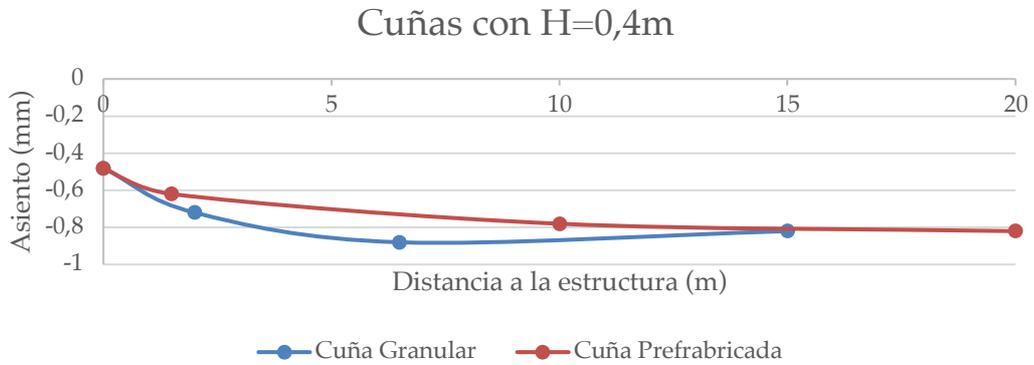


Gráfica 5.3.4 Asientos verticales registrados en los ensayos. Fuente: elaboración propia.

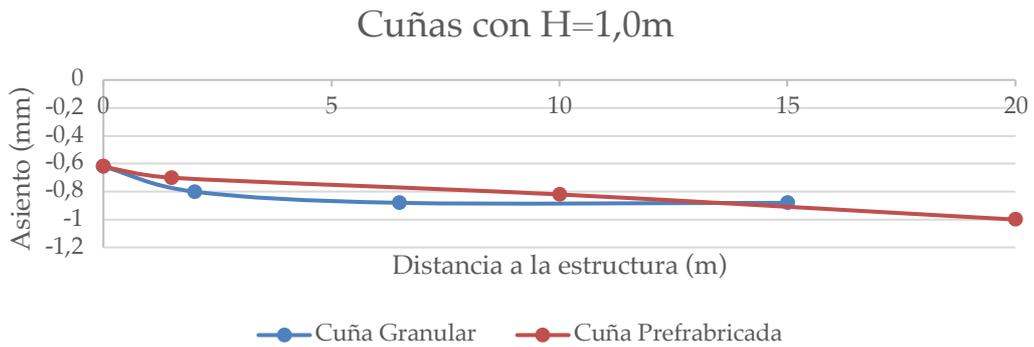
Como puede observarse, los perfiles de asientos son mostrados en comparación con el obtenido con la cuña granular en la figura anterior, donde el comportamiento mecánico más deseable fue obtenido en el caso 1, con profundidad $H=0$ metros. En el resto de casos con $H>0$ m, se deduce también una mejor transición de asientos con las cuñas prefabricadas que con las cuñas granulares, presentando las cuñas prefabricadas un decrecimiento más gradual y suavizado, y con asientos máximos a mayor distancia de la estructura que atraviesa el terraplén.



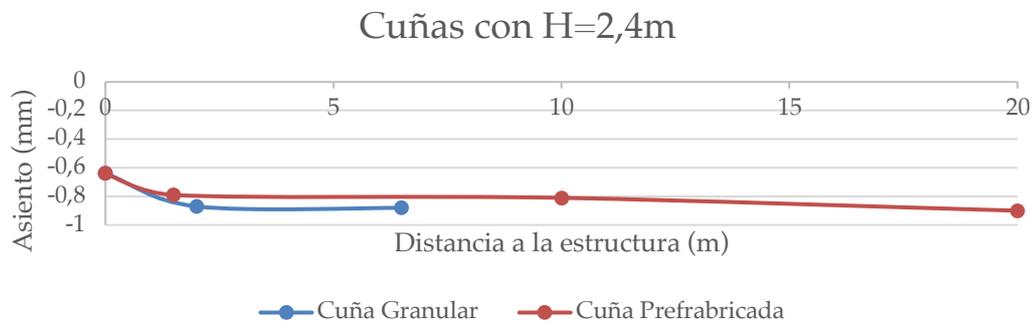
Gráfica 5.3.5 Comparación de asientos entre cuñas granular y prefabricada para el caso $H=0$ m. Fuente: elaboración propia.



Gráfica 5.3.6 Comparación de asientos entre cuñas granular y prefabricada para el caso H=0,4m. Fuente: elaboración propia.



Gráfica 5.3.7 Comparación de asientos entre cuñas granular y prefabricada para el caso H=1m. Fuente: elaboración propia.



Gráfica 5.3.8 Comparación de asientos entre cuñas granular y prefabricada para el caso H=2,4m. Fuente: elaboración propia.

6. CÁLCULO DINÁMICO: ANÁLISIS DE VIBRACIONES

CÁLCULO DINÁMICO: ANÁLISIS DE VIBRACIONES

En el presente apartado se va a evaluar la transmisibilidad vibratoria de la solución ganadora con el objetivo de estudiar la viabilidad de su uso en entornos urbanos.

Para ello, se realizará un cálculo dinámico de la solución óptima construida en un escenario real, y comparada con la cuña granular también ejecutada, ambas cuñas ubicadas en un tramo de vía que será habilitada al servicio de tráfico ferroviario.

Previo al cálculo se realizará el proceso de validación de la solución optimizada como apta estructuralmente para la transición de rigidez en las zonas de transición. Para ello, se llevará a cabo una campaña experimental similar a la realizada en el banco de pruebas para medir las deformaciones producidas por el uso de la cuña prefabricada. Asimismo, se llevará a cabo una caracterización mecánica del tramo de vía y del material móvil que recorrerá dicho tramo. Con la información experimental recopilada se realizará un modelo numérico de la cuña de transición ejecutada basado en el modelo desarrollado anteriormente y se calibrará con los datos registrados tanto de la caracterización mecánica como de las mediciones de los ensayos a cargas verticales.

Con el modelo numérico validado y calibrado se verificará, por un lado, la aptitud estructural para lograr una transición de rigidices efectiva en la zona de transición y, por otro lado, se procederá a la evaluación dinámica del tramo de vía para valorar si las vibraciones generadas por el tráfico pueden suponer un riesgo si el emplazamiento de la solución se encuentra en entornos urbanos.

6.1 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL TRAMO DE VÍA EN ESCENARIO REAL

El procedimiento de modelización del tramo de vía realizado anteriormente se aplicará para modelizar un escenario real, el cual necesita que estén definidas las características mecánicas de los diferentes elementos que forman el conjunto superestructura e infraestructura ferroviaria modelizados. Los valores de las propiedades de todos los materiales fueron obtenidos de los ensayos, que sirvió para calibrar el modelo numérico, y finalmente fue validado.

Los valores adoptados para la placa de asiento y la traviesa dividida en tres elementos se han modificado convenientemente, tal y como se describió anteriormente.

<i>Material</i>	<i>E (N/m²)</i>	<i>ν</i>	<i>c (N/m²)</i>	<i>φ(°)</i>	<i>ρ (N/m³)</i>
Acero carriles	2,1 x 10 ¹¹	0,3	-	-	7,5 x 10 ⁴
Placa elástica	2,952 x 10 ⁸	0,45	-	-	2 x 10 ⁴
Traviesa elemento 1	8,01 x 10 ¹⁰	0,25	-	-	2,4 x 10 ⁴
Traviesa elemento 2	5,02 x 10 ¹⁰	0,25	-	-	2,4 x 10 ⁴
Traviesa elemento 3	3,68 x 10 ¹⁰	0,25	-	-	2,4 x 10 ⁴
Balasto	1,3 x 10 ⁸	0,2	0	45	1,9 x 10 ⁴
Subbalasto	1,2 x 10 ⁸	0,3	0	35	1,9 x 10 ⁴
Capa de forma	8 x 10 ⁷	0,3	0	35	2 x 10 ⁴
Terraplén	2,5 x 10 ⁷	0,3	10000	20	2 x 10 ⁴
Material granular tratado	1,6 x 10 ⁸	0,25	-	-	2,3 x 10 ⁴
Material QS3	8 x 10 ⁷	0,3	0	35	2 x 10 ⁴

Hormigón	$2,8 \times 10^{10}$	0,25	-	-	$2,4 \times 10^4$
-----------------	----------------------	------	---	---	-------------------

Tabla 6.1.1 Parámetros mecánicos de los materiales utilizados en el modelo numéricos calibrado.

6.2 CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DEL MATERIAL MÓVIL

Para simular el comportamiento dinámico del vehículo ferroviario que circula sobre el tramo de pruebas, de igual forma que se explicó en el apartado 4.2.5.1 de la presente tesis, se ha optado por emplear una simplificación mediante un sistema de masas conectadas por mecanismos con propiedades dinámicas. La forma de simular los sistemas reales es, fundamentalmente, mediante un sistema por combinación de tres elementos: masa (m , kg), resorte (k , N/m) y amortiguador (c , N*s/m). La aproximación del modelo planteado resultará más real cuantos más grados de libertad (incógnitas) sean introducidos en la simulación numérica. Por ello, se seguirá el mismo esquema definido en la Figura 4.2.76, esto es un sistema compuesto por 3 masas, correspondientes a las masas no suspendidas (tren de rodadura), las masas semi-suspendidas (bogie) y las masas suspendidas (caja) del vehículo ferroviario. Cada una de las masas del modelo está vinculada al resto del modelo mediante un muelle y un amortiguador, cuyos valores de amortiguación y de rigidez se han tomado de los vehículos que circulan por la línea ferroviaria L9 Alicante-Denia, más concretamente, para el modelo TRAM serie 2300. En este sentido, la velocidad de circulación se ha considerado igual a 80 km/h.

6.3 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO EMPLEADO EN ESCENARIO REAL

Con la solución óptima definida, ambas cuñas granular y prefabricada fueron instaladas en un escenario real para 1) calibrar y validar el modelo de elementos finitos de las cuñas, 2) validar la cuña prefabricada como una solución óptima en zonas de transición basadas en el comportamiento estructural. En este caso, gracias a la colaboración con FGV (Ferrocarriles de la Generalitat Valenciana) surgió la oportunidad de llevar a cabo la instalación en un tramo de vía unido a un puente sobre una carretera secundaria cerca de la localidad de Teulada, en Alicante. Concretamente, la instalación de la solución tuvo lugar en el pilar oeste del puente

a través de la carretera CV-740, en la línea ferroviaria L9 Alicante-Denia, tal y como se muestra en la siguiente figura.



Figura 6.3.1 Instalación de las cuñas granular y prefabricada en línea ferroviaria L9 Alicante-Denia. Fuente: elaboración propia.

El MEF de ambas cuñas fue calibrado con datos reales registrados. Con este propósito, fue llevado a cabo la medición de las deflexiones verticales y vibraciones en diferentes secciones de la vía con instrumentación específica análoga a la presentada anteriormente. En el caso de los acelerómetros, se emplearon acelerómetros piezoeléctricos capaces de medir hasta 2000g con salida de carga con sensibilidad 98 pC/g. El ancho de banda es de 4,8kHz.

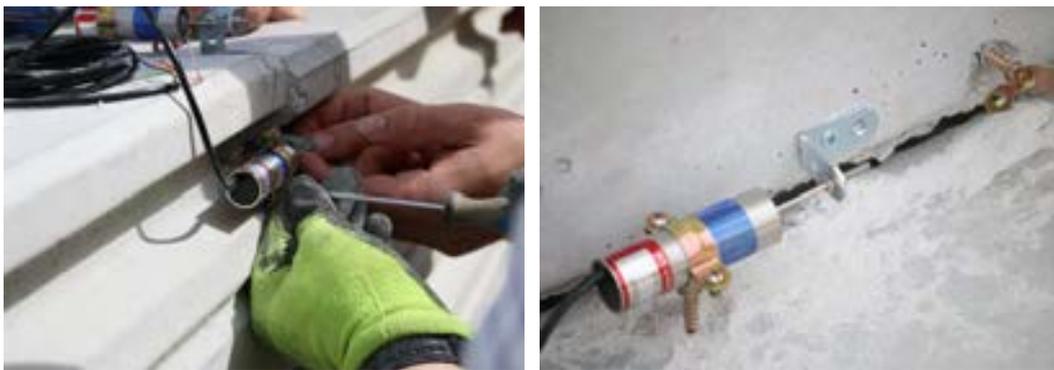


Figura 6.3.2 Instalación de los sensores extensiométricos. Fuente: Elaboración propia

Subsecuentemente, los datos reales obtenidos de los desplazamientos verticales y vibraciones fueron comparados con resultados extraídos del modelo numérico desarrollado para calibrarlo. Por tanto, una vez adecuados los ajustes, se

obtuvo una validación del modelo de elementos finitos, siendo capaz de ofrecer una respuesta muy similar a la realidad. El resultado del MEF se muestra en la siguiente figura.

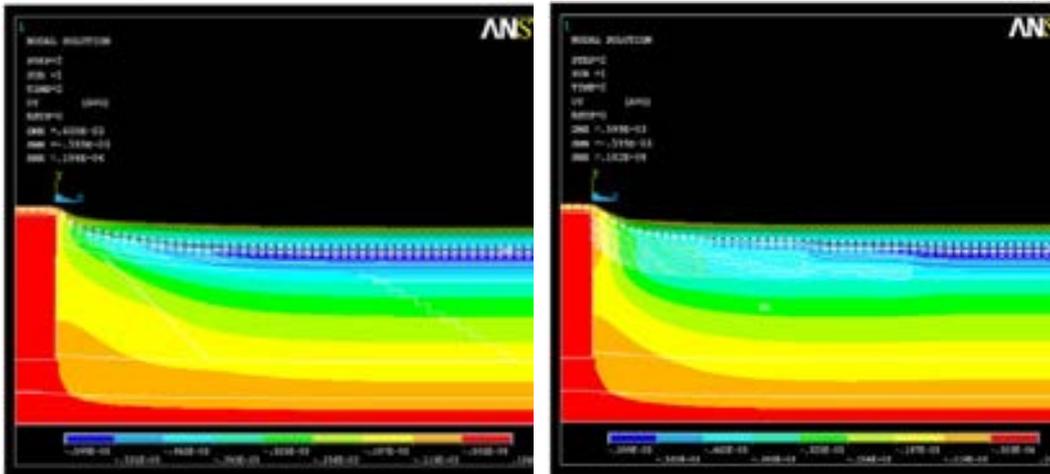
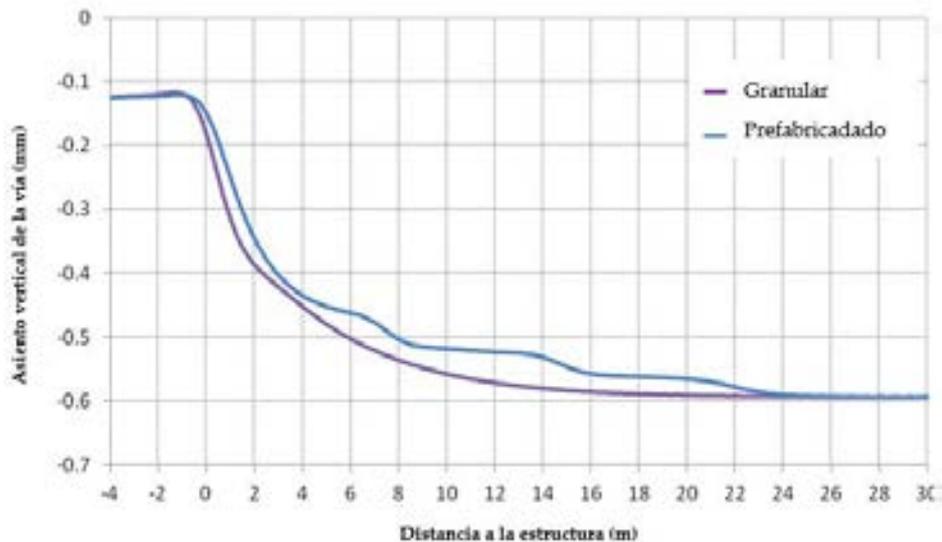


Figura 6.3.3 Modelo numérico desarrollado para la cuña granular (izquierda) y prefabricada (derecho). Fuente: elaboración propia.

Se puede notar que el comportamiento del modelo ilustrado en la Figura 6.3.3 es similar al obtenido en otras investigaciones. Por ejemplo, Paixão et al. en [2] observaron desplazamientos máximos entre 0,6 y 0,7 mm en zonas de transición, de la misma forma que lo hicieron Ribeiro et al. en [87].

Basado en el modelo MEF calibrado y validado, se llevó a cabo la simulación de dos escenarios, permitiendo la comparación entre las cuñas de transición granular y prefabricada en términos de desplazamiento vertical. Con esta consideración, la curva de deformación de ambas soluciones (cuñas granular y prefabricada) es mostrada en la gráfica siguiente, donde el eje x indica la distancia desde la estructura, mientras que el eje y muestra el desplazamiento vertical de la parte superior de la vía.



Gráfica 6.3.1 Modelo numérico desarrollado para la cuña granular (izquierda) y prefabricada (derecho). Fuente: elaboración propia

Como puede observarse, ambas soluciones (cuñas granular y prefabricada) mostraban un comportamiento similar ante la deformación, incluso la solución prefabricada presentó un mejor comportamiento porque la deformación máxima se alcanzó a gran distancia de la estructura.

Por tanto, se concluye que se ha obtenido una calibración y validación del MEF, siendo posible verificar el uso de cuñas prefabricadas como una solución óptima capaz de igualar e incluso mejorar el rendimiento de las cuñas granulares convencionales.

6.4 CÁLCULO DINÁMICO DEL TRAMO DE VÍA DEFINIDO CON LA SOLUCIÓN PROPUESTA

6.4.1 Condicionantes previos

Una vez la cuña prefabricada ha sido confirmada como una opción válida para ser instalada en zonas de transición, es necesario analizar información adicional para comprobar si la nueva solución se puede instalar en entornos urbanos.

En el caso de entornos urbanos, de acuerdo con G. Kouroussis et. Al [88], el ruido y la vibración son factores de externalidades ferroviarias negativas. Esto puede ser particularmente problemático en entornos urbanos donde la molestia vibratoria afecta no solo a los residentes sino también a las edificaciones.

Bajo esta consideración, es bien conocido la capacidad de las estructuras de hormigón de transmitir vibraciones. Por tanto, en el caso de las nuevas cuñas prefabricadas, las vibraciones podrían ser propagadas a áreas adyacentes, las cuales invalidarían el uso de éstas en el interior de las ciudades, siendo más conveniente la instalación de cuñas granulares.

Por lo tanto, se ha llevado a cabo un análisis comparativo sobre el comportamiento vibracional de las cuñas de transición, en ambas cuñas prefabricada y granular, para estudiar su uso en entornos urbanos. Para este propósito, el MEF previamente validado ha sido empleado para reproducir el tráfico urbano de vehículos ferroviarios.

6.4.2 Enfoque de los casos

Para evaluar las características técnicas de cada tipología de transición (cuñas prefabricada y granular) respecto a la vibración generada por cargas dinámicas, se han estudiado las aceleraciones en la estructura de la vía ferroviaria.

Para este propósito, se ha llevado a cabo la simulación del paso de vehículos ferroviarios a la velocidad constante de 80 km/h (velocidad representativa de vehículos ferroviarios en entornos urbanos) usando el modelo numérico calibrado.

A este respecto, se evaluaron tres puntos críticos: 1) en la vía, 2) en la capa de subbalasto, y 3) a una profundidad bajo el subbalasto igual a la mitad de la altura de la cuña prefabricada, es decir, a 0,9 metros de profundidad. Además, este tercer punto se fijó a 4 metros desde el eje de la vía ferroviaria para estudiar la propagación de las vibraciones a áreas adyacentes. Los puntos seleccionados para la evaluación se muestran en la siguiente figura.

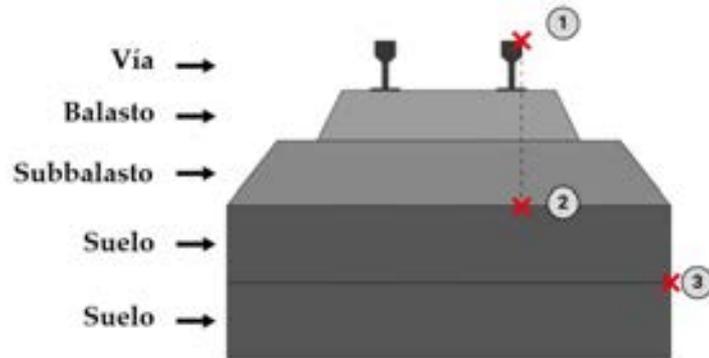


Figura 6.4.1 Puntos de medición de datos en la sección transversal de la vía. Fuente: elaboración propia.

Estos puntos han sido seleccionados para mostrar la atenuación de la vibración que sucede a diferentes profundidades de la estructura, siendo considerados puntos críticos porque representan una interfaz entre materiales (vía férrea-subbalasto-suelo).

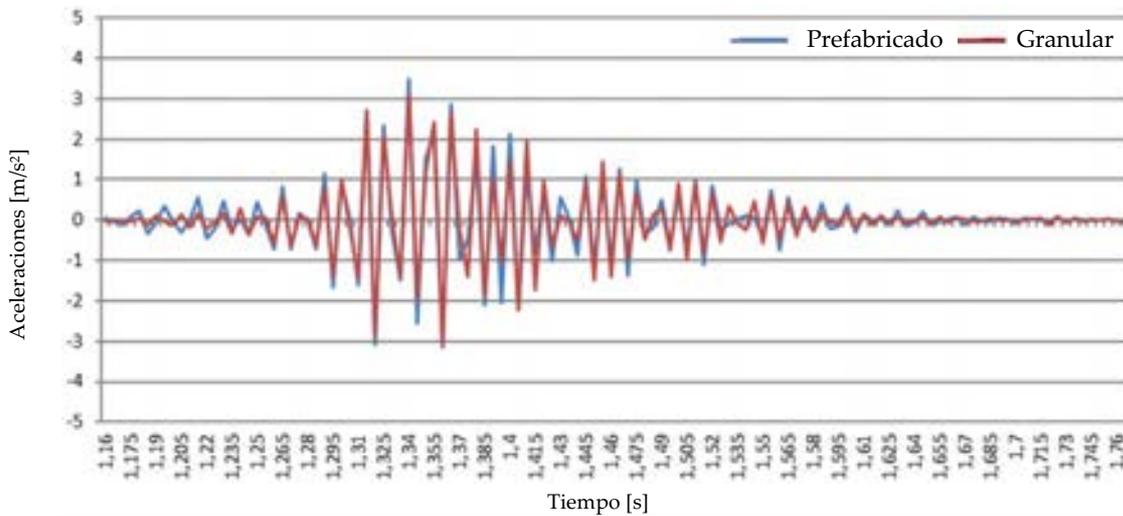
6.4.3 Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos de la simulación en diferentes casos exhibidos en secciones anteriores usando el MEF se muestran en el presente apartado como un estudio comparativo entre los dos tipos de cuñas.

Cabe destacar que, con el objetivo de simplificar la interpretación de las figuras, sólo se representa una muestra parcial de tiempo de la serie completa de aceleraciones en cada punto evaluado.

6.4.3.1 Vibraciones en la vía

El primer caso a ser evaluado se enfoca en el registro de vibraciones que se suceden en la vía ferroviaria para evaluar si la instalación de la nueva cuña influye en las características técnicas vibratorias de la superestructura ferroviaria. Los resultados extraídos del modelo numérico son mostrados en la Gráfica 6.4.1; en este caso, el eje y indica las aceleraciones (m/s^2), mientras que el eje x muestra el instante de tiempo (s) en el cual ocurren.

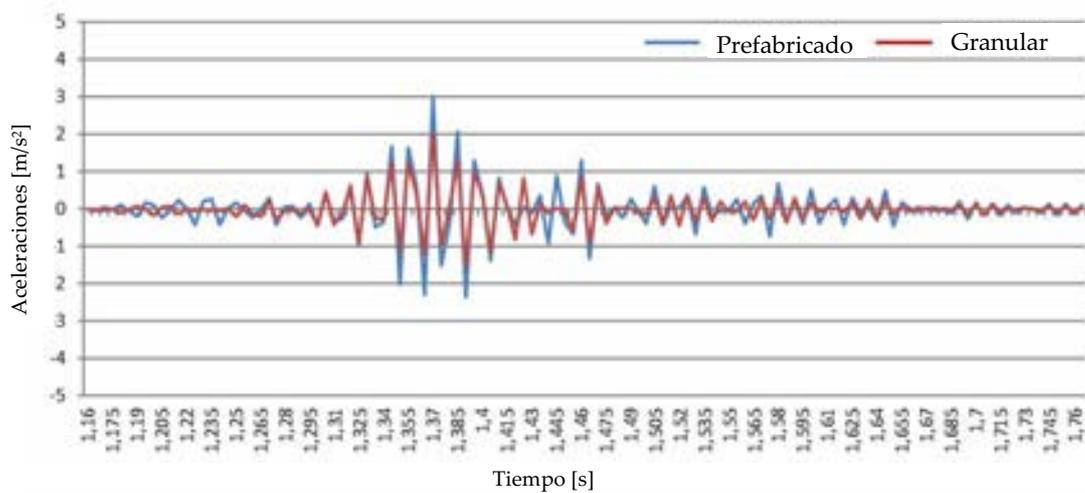


Gráfica 6.4.1 Aceleraciones en la vía inducidas por el paso de un tren a velocidad de 80 km/h. Fuente: elaboración propia.

Como puede observarse en la Gráfica 6.4.1, el comportamiento vibracional en la vía férrea es muy similar en ambas cuñas prefabricada y granular. Teniendo en cuenta que las frecuencias predominantes en las vibraciones inducidas por el paso de trenes suelen estar entre 50 y 80 Hz [89] [90], es de esperar que el aumento de la rigidez de los materiales cerca del riel provoque un aumento de estas Hz [91]. Este fenómeno indica que el uso más adecuado de esta solución puede tener lugar en entornos no urbanos donde no existen edificios cercanos que puedan verse afectados por estos niveles de vibración más elevados.

6.4.3.2 Vibraciones en la capa de subbalasto

En el segundo caso de estudio se consideraron las vibraciones producidas en la capa de subbalasto. Como en el caso previo, se estudia si la nueva cuña influye en las características técnicas vibracionales en la superestructura de la vía. Los resultados del modelo numérico se muestran en la Gráfica 6.4.2; como en el caso previo, el eje y, indica las aceleraciones (m/s²), mientras que el eje x muestra el instante de tiempo (s) en el cual ocurren.



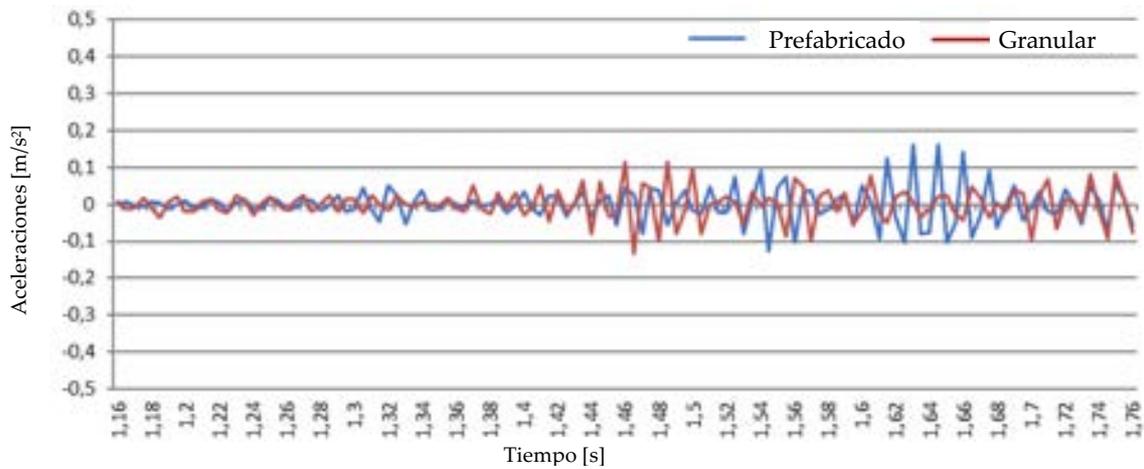
Gráfica 6.4.2 Aceleraciones en la capa de subbalasto inducidas por el paso de un tren a velocidad de 80 km/h. Fuente: elaboración propia.

En primer lugar, como puede observarse en la Gráfica 6.4.2, puede observarse una mitigación de las vibraciones con respecto al caso previo. Esto está en línea con el comportamiento vibracional esperado por el alejamiento del núcleo vibratorio, obteniendo como respuesta una disminución de aceleraciones.

En segundo lugar, una vez este punto es alcanzado, se observa un comportamiento vibracional diferente entre los dos tipos de cuñas. A este respecto, las cuñas prefabricadas muestran unos picos de aceleración más altos, demostrando que las cuñas granulares reducen más las vibraciones que las cuñas prefabricadas en los puntos críticos. Concretamente, la cuña granular es capaz de reducir las vibraciones máximas un 33% más que las cuñas prefabricadas.

6.4.3.3 Vibraciones a profundidad de 0,9m desde la capa de subbalasto

En el tercer caso de estudio, se evaluó las vibraciones producidas en el suelo a la profundidad de 0,9 metros y a la distancia de 4 metros desde el eje de la vía. En este caso, se estudió la influencia de las cuñas en la propagación de vibraciones a áreas adyacentes. Los resultados obtenidos del modelo numérico se muestran en la Gráfica 6.4.3; como en los casos precedentes, el eje Y indica las aceleraciones (m/s²), mientras que el eje X muestra el instante de tiempo (s) en el cual ocurren.



Gráfica 6.4.3 Aceleraciones a 0,9m de profundidad de la capa de subbalasto inducidas por el paso de un tren a velocidad de 80 km/h. Fuente: elaboración propia.

En primer lugar, como puede observarse en la Gráfica 6.4.3, también se obtiene un comportamiento vibracional esperado siguiendo la línea de los anteriores casos, con una reducción de vibraciones registrados comparado con el caso previo, es decir, las aceleraciones registradas son menores como consecuencia de unas mediciones realizadas en un punto todavía más alejado de la vía férrea, origen de la acción dinámica.

En segundo lugar, puede observarse también que en este caso de estudio ambas cuñas presentan características técnicas vibratorias muy diferentes. Por tanto, poniendo especial atención en los picos de aceleraciones producidos, se detecta un comportamiento similar al caso anterior, en el que las cuñas granulares reducen las vibraciones más que las cuñas prefabricadas en los puntos críticos. Concretamente, la cuña granular es capaz de reducir las vibraciones máximas un 30% más que las cuñas prefabricadas.

6.4.4 Conclusiones del análisis dinámico

Como principal conclusión del análisis dinámico realizado, puede afirmarse que las características técnicas vibratorias de las cuñas prefabricadas presentan un incremento de aceleraciones pico respecto de las obtenidas en cuñas granulares ante acciones dinámicas generadas por el paso de vehículos ferroviarios,

traduciéndose en un peor comportamiento vibracional de la nueva solución, por lo que se desaconseja su aplicación en entornos urbanos, siendo más conveniente por tanto el empleo de cuñas granulares en dichas áreas.

**7. DISCUSIONES, CONCLUSIONES Y FUTURAS
LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

DISCUSIONES, CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Una vez se ha concluido la investigación que ha motivado el desarrollo de la presente tesis doctoral, se van a comentar las conclusiones que ha alcanzado la doctoranda en relación a los resultados de la misma. La investigación planteada partió de unos objetivos concretos – especificados al inicio del documento –, y de una metodología de trabajo diseñada para su obtención. Dado el volumen del trabajo realizado, se considera coherente basarse en dichos objetivos para la redacción de las conclusiones alcanzadas, verificando punto por punto que todos ellos se han cumplido de forma satisfactoria.

Debido al nexo permanente que ha existido durante todo el trabajo desarrollado entre los objetivos de la Tesis Doctoral y la metodología planteada, previo a comentar el grado de cumplimiento de los objetivos de partida se va a repasar sucintamente el planteamiento metodológico, apuntando algunas consideraciones acerca de su aplicación práctica.

Se debe recordar que la metodología planteada al inicio de la investigación se ha compuesto de tres hitos o fases de cumplimiento, donde se han ido superando paulatinamente diferentes etapas clave para lograr el objetivo general de la doctoranda. La metodología planteada, descrita en el presente documento en dos grandes bloques relativos a la modelización matemática y a las pruebas de campo, ha guiado el trabajo de la doctoranda a través de los hitos *Diseño y cálculo del elemento responsable de la transición de rigidez*, *Diseño de la solución constructiva* y *Análisis del comportamiento dinámico*.

Se puede comprobar como en todo momento la metodología diseñada al inicio de la Tesis ha permitido seguir una secuencia lógica y coherente de trabajo, donde de forma inicial se ha llevado a cabo una búsqueda de antecedentes la literatura científica existente en cuanto a cuñas de transición, y se ha realizado un Estado del Arte relativo a las soluciones que existen en la actualidad ante dicho problema, así como de las soluciones que recomienda ADIF en este ámbito. Posteriormente, se han planteado una serie de alternativas con distintas geometrías y configuraciones que se han modelado con un MEF a través de la herramienta ANSYS para evaluar el comportamiento estructural y seleccionar la óptima. Esta selección se ha realizado a través de un análisis multicriterio. Una vez

seleccionadas, se procedió a realizar un ensayo experimental a escala real, creando un banco de pruebas que simule una réplica de una zona de transición con una solución tradicional mediante cuña granular y con las nuevas soluciones, sometiendo a cargas estáticas verticales en diferentes secciones de la superficie de la cuña de transición. De los ensayos se concluyó que la solución formada por losas era el diseño óptimo, pues se obtuvo un perfil de asientos mejorado. Finalmente, se procedió a implementar la solución óptima en una línea de alta velocidad, en el que se registraron datos del comportamiento tanto de una cuña prefabricada como de una cuña granular en fase de explotación. Los resultados sirvieron para calibrar y validar el modelo numérico desarrollado anteriormente, pero adaptado al nuevo escenario real analizado, para finalmente confirmar la validación de la solución propuesta. Asimismo, con el modelo numérico calibrado y validado se realizó un cálculo dinámico en ambas cuñas prefabricada y granular, en el que se evaluaron las vibraciones en distintos puntos de la sección de la infraestructura ferroviaria para estudiar la viabilidad de utilizar la nueva solución en entornos urbanos.

7.1 DISCUSIONES

Realizada esta breve introducción, a continuación, se procede a comentar de forma particularizada el grado de cumplimiento de cada uno de los objetivos científicos establecidos, reflejando así su cumplimiento:

➤ Diseño y cálculo del elemento responsable de la transición de rigidez. En este apartado se avanzó hacia la búsqueda y el diseño de la cuña de transición.

La solución debe estar diseñada con el propósito fundamental de distribuir la rigidez en las zonas de transición de forma paulatina y gradual para reducir los daños generados por los asientos diferenciales generados por el transcurso de los vehículos ferroviarios. Asimismo, la solución debe reunir ciertas características que le doten de capacidad de adaptación al entorno, versatilidad y facilidad de colocación y montaje. De esta forma el hormigón armado se posiciona como el material que mejor cumple las características mencionadas, presentando una rigidez y resistencia adecuada a los objetivos de la nueva solución.

De este modo se plantearon diversas alternativas, en el que se contemplaron:

- Cuñas en forma de T
- Cuñas triangulares
 - macizas
 - por módulos huecos (marcos)
 - huecos formados por vigas en forma de T y cubierta por losas
- Cuñas por losas
 - macizas
 - alveolares

Todas las soluciones propuestas fueron evaluadas mediante un modelo numérico, incluyendo variantes de opciones de diseño para cada alternativa, como la solución en modo corto y modo largo, y sin cimentación o con cimentación para elevar el elemento de transición de rigidez hasta alinearla superiormente con la losa superior de la estructura que atraviesa el terraplén. Asimismo, la sección de terraplén está adaptada a las recomendaciones de ADIF, en el que se contemplan cuatro casos en función de la distancia de la losa superior de la estructura que atraviesa el terraplén con la cota inferior de la capa de subbalasto. Estos modelos

fueron comparados a su vez con una solución convencional mediante cuña granular. Por tanto, se analizaron un total de 96 modelos y se compararon los resultados de perfiles de asientos obtenidos de ensayos numéricos a cargas estáticas y dinámicas. Añadir que se elaboró una definición exhaustiva de la infraestructura, desde la vía, traviesas, placas de asiento y diferentes capas de apoyo de la superestructura, hasta el terraplén, incluyendo todas las propiedades de los materiales.

Junto con este estudio se realizó un análisis multicriterio, en el que se seleccionaron las soluciones finalistas para ensayarlas a escala real. Entre los criterios utilizados que se manejaron para dar respuesta a diferentes valoraciones para determinar el diseño óptimo del elemento fueron las siguientes:

- Facilidad productiva V.S. Facilidad de industrialización
- Manejabilidad de las piezas en fábrica
- Coste de fabricación
- Dificultad del transporte y descarga
- Coste del transporte
- Dificultad de puesta en obra
- Coste de puesta en obra
- Comportamiento estructural de transición de rigidez

Como soluciones finalistas fueron las cuñas formadas por losas macizas y las cuñas formadas por marcos. Ambas soluciones devolvieron unos resultados aceptables con respecto a una transición de rigidez eficaz. Además, son idóneas para configurar cuñas mediante la versatilidad y facilidad de colocación y montaje que proporciona la modularización de la solución por piezas, adaptando la rigidez mediante un escalonamiento de la configuración de la solución.

➤ Diseño de la solución constructiva. En esta fase se avanzó hacia un análisis experimental reproduciendo un escenario a escala real en condiciones controladas, por medio de un banco de pruebas emplazado en una cantera de Oliva, Valencia.

Dada la buena respuesta numérica obtenida de las soluciones finalistas, éstas fueron construidas para estudiar su comportamiento estructural en un escenario a escala real que reproduce una zona de transición. La campaña experimental consistió en la construcción de un banco de pruebas compuesto por 8 terraplenes,

en el que cada uno estaba dotado de diferentes cuñas de transición. Cada terraplén estaba atravesado por una estructura que representaba una obra de drenaje, y las cuñas colindantes a la estructura eran en un lado prefabricada y en el otro granular, de forma que los 8 terraplenes englobaban los 8 casos posibles a estudiar, 2 soluciones por 4 configuraciones de sección de terraplén.

Se llevó a cabo un estudio exhaustivo del terreno y el material para tener una caracterización mecánica y se ensayaron los elementos estructurales de las soluciones para verificar su resistencia.

Los elementos estructurales de las cuñas se dimensionaron para soportar las cargas permanentes y variables debidas al peso muerto por el terraplén, capas de infraestructura ferroviaria y superestructura, añadiendo las cargas por tráfico ferroviario. Las situaciones más desfavorables se alcanzaban en estados de carga que generaban elevados esfuerzos flectores. Con los marcos era evidente prever que las cargas permanentes y variables durante la fase de explotación producirían dichos esfuerzos de flexión por la propia configuración estructural de los marcos. Sin embargo, con las losas sucede que la situación más desfavorable se producía por cargas transitorias durante la fase de construcción, concretamente en el izado de las losas, induciendo esfuerzos de flexión por el peso propio de las mismas. Estos casos eran los que más solicitaban al material, por lo que el armado de las cuñas se dimensionó para resistir la flexotracción del hormigón, precisando de altos requerimientos resistentes por medio de mayores cuantías de armados que bajo otros estados de cargas por compresión.

Para la campaña experimental fue necesario un equipo de instrumentación para la medición real de las cargas estáticas aplicadas. Se configuraron tres bandas de carga a distinta distancia de la estructura, y fueron medidos sus asientos y deformaciones por medio de:

- Desplazamientos verticales del material granular mediante extensómetros de varilla.
- Deformada transversal del cimiento, mediante línea continua de asientos.
- Deformada longitudinal en coronación, mediante línea continua de asientos.
- Desplazamientos horizontales, mediante tuberías inclinométricas.
- Presiones en cimiento, mediante células de presión total.

Los resultados arrojaron la conclusión de que la solución formada por marcos era descartable dado el mal comportamiento estructural registrado, produciéndose un pronunciado escalón en la zona de inicio de la estructura, y manteniéndose constante el asiento a lo largo de la cuña de transición, mientras que la solución formada por losas produjo un perfil mejorado de asientos en comparación con las cuñas granulares, destacándose la cuña formada por losas como la solución óptima, en concreto el del caso $H=0$ m, es decir, aquella configuración sin distancia entre la losa superior de la estructura y la capa inferior de subbalasto, extendiendo el subbalasto directamente sobre la estructura y el escalón superior de la cuña prefabricada.

➤ Análisis del comportamiento dinámico de la nueva solución constructiva. La solución óptima definida se emplazó en un entorno real, en concreto en la línea ferroviaria L9 Alicante-Denia, donde se evaluó su comportamiento dinámico y su idoneidad de uso en entornos urbanos.

La solución requirió previamente de su validación como elemento constructivo apto para la correcta transición de rigidez en zonas de transición. Para ello se caracterizó el tramo de vía estudiado, se construyeron dos cuñas, una con la solución óptima prefabricada y la otra con cuña granular, y se organizó una nueva campaña experimental con el mismo equipamiento empleado en el banco de pruebas. Con los registros almacenados durante los ensayos se calibró un modelo numérico desarrollado adaptado al nuevo tramo, y se compararon los resultados, de cuyas observaciones se confirmaba la validación de la solución como elemento estructural de transición de rigidices, puesto que se corroboraron las mismas conclusiones obtenidas en el banco de pruebas, con un buen comportamiento estructural de la cuña prefabricada en términos de desplazamientos verticales y mejorando el perfil de asientos en comparación con los de la cuña granular.

Con el modelo calibrado, se analizó el comportamiento dinámico producido por las vibraciones generadas por el transcurso de vehículos ferroviarios, ya que, aunque la solución es estructuralmente apta, en entornos urbanos pueden verse afectadas edificaciones en las proximidades por la amplificación dinámica que el hormigón puede causar. Para ello se preparó un ensayo numérico mediante la caracterización de un material móvil que representa de forma simplificada un vehículo ferroviario, y se analizaron las aceleraciones generadas por el paso del tren en tres puntos diferentes de la infraestructura ferroviaria por ambas cuñas,

prefabricada y granular. Se midieron las aceleraciones en distintos puntos de la infraestructura ferroviaria en cada cuña, y se observó que la cuña prefabricada presentaba mayores amplitudes de aceleración. De este modo se concluye que la nueva cuña prefabricada es desaconsejable en entornos urbanos.

7.2 CONCLUSIONES

En base a las discusiones planteadas en el apartado anterior, se puede concluir que la presente Tesis Doctoral ha logrado cumplir con todos los objetivos científicos fijados en el Plan de Investigación inicial.

- Se ha diseñado una cuña de transición prefabricada partiendo de un estudio de alternativas, mediante un análisis numérico previo y análisis multicriterio, del que se establecieron unas soluciones finalistas que reunían los requerimientos técnicos y económicos exigidos de partida, con la condición principal de que fueran capaces de distribuir la rigidez en las zonas de transición.

- Se ha procedido a la realización de un ensayo experimental a cargas verticales mediante un banco de pruebas a escala real, en el que se construyeron las cuñas finalistas junto con cuñas granulares y se compararon los resultados obtenidos, del que se definió la solución óptima.

- Finalmente, se validó la solución emplazando un nuevo ensayo experimental en un escenario real, construyendo la cuña prefabricada óptima en una línea de alta velocidad, corroborándose las mismas conclusiones obtenidas en el banco de pruebas que confirmaban el buen comportamiento estructural de la cuña prefabricada. Asimismo, se analizó el comportamiento dinámico de la cuña prefabricada en comparación con la cuña granular usando el modelo numérico desarrollado anteriormente, pero adaptado a la zona de actuación, y calibrado con los registros experimentales del ensayo, concluyendo que, aunque es apto desde el punto de vista estructural, es desaconsejable su empleo en entornos urbanos por la amplificación dinámica que aporta el hormigón de las cuñas.

7.3 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La nueva solución de cuña prefabricada desarrollada en la presente tesis se ha concebido como una solución a un problema latente y actual que afecta a las

zonas de transición de vías ferroviarias. Esta técnica resulta competitiva contra la solución estándar recomendada por el Administrador De Infraestructuras Ferroviarias ADIF, saliendo económicamente rentable si se compara con ésta y otras alternativas, ya que los plazos de ejecución se recortan significativamente. La problemática se ha tratado de resolver a partir del empleo un elemento estructural versátil y fácil de transportar y colocar, con el que se puede configurar la cuña de transición mediante el montaje por módulos prefabricados de hormigón armado.

Así pues, y fruto de la presente Tesis Doctoral, surgen diferentes líneas futuras de investigación que la doctoranda entiende de interés, actuando en la nueva solución propuesta, enfocadas a mejorar las prestaciones de la infraestructura respecto a las vibraciones generadas.

La respuesta estructural que ofrece de la nueva solución de cuña prefabricada diseñada para lograr una transición de rigidez óptima en los tramos vulnerables de transición de infraestructuras ferroviarias diferentes ha sido validada, pero surge la necesidad de perfeccionar el comportamiento dinámico para mitigar las vibraciones generadas por el tráfico ferroviario, puesto que en entornos urbanos pueden suponer una pérdida de confort de los residentes cercanos, o incluso llegar a causar daños potenciales en edificaciones ubicadas en las proximidades [88].

La solución diseñada en la presente Tesis es de hormigón armado, y es bien conocido que este material tiene una gran capacidad de transmisión de vibraciones, por lo que se propone como futura línea de investigación indagar en materiales compuestos que, manteniendo sus propiedades de rigidez, puedan incorporar propiedades de amortiguamiento a las cuñas prefabricadas diseñadas. De acuerdo con [92], se ha observado la capacidad de amortiguamiento de materiales compuestos con matriz de cemento modificados por diversos aditivos. Por ejemplo, con la ayuda del desajuste de rigidez entre la interfaz de fase y la viscoelasticidad suministrada por la partícula de polímero apropiada o látex en los compuestos de matriz de cemento, la capacidad de amortiguación puede aumentarse con una ligera disminución de la rigidez y resistencia. Por otro lado, el hormigón reforzado con fibras presenta también mecanismos de amortiguamiento debido a la fricción a medida que las grietas en la matriz se deslizan sobre la fibra a un alto esfuerzo cortante. También los materiales compuestos de matriz de cemento modificados con polvos inorgánicos muestran cualidades amortiguadoras, aunque el efecto de relleno debe tenerse en cuenta con el tamaño de partícula y la fracción de volumen

del material compuesto. Asimismo, la incorporación de nanotubos en el material compuesto puede causar una mayor disipación de energía. Además, aunque todavía no se explotan ampliamente, tanto el grafito de red como los agregados de baja rigidez muestran el potencial de ser adaptados con el propósito de mejorar la amortiguación mediante la ingeniería interfacial.

De este modo, si se lograse demostrar una notable efectividad de la solución propuesta con un nuevo material compuesto con propiedades de amortiguamiento, el material aquí desarrollado no solo sería útil para llevar a cabo la transición de rigidez objetivo principal de la Tesis, sino que también tendría una contribución directa a mitigar el problema en cuanto a la propagación de vibraciones, con las molestias y externalidades que esto acarrea para los ciudadanos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. F. a. R. C. A. Paixão, Design and construction of backfills for railway track, Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit, 2015.
- [2] E. F. a. R. C. A. Paixão, Transition zones to railway bridges: Track measurements and numerical modelling, Eng. Struct., vol. 80, pp. 435–443, 2014.
- [3] J. C. Abad, Cruz Abad, J. Superestructura de vía. Seminario de FFCC de Alta Velocidad, Madrid, 2009.
- [4] I. C. e. al., Comportamiento dinámico de placas de asiento, Anuales de mecánica de la fractura Vol. 22., 2005.
- [5] P. F. Teixeira, "Elasticidad de la vía con y sin balasto." Vía con balasto versus vía en placa. Criterios técnicos- económicos para una decisión., 2007.
- [6] S. K. e. al, Nonlinear finite element modelling of railway prestressed, University of Wollongong, 2006.
- [7] R. Y. Alberto Bardesi, Curso de Mezclas Bituminosas. Dosificación, Barcelona: Curso Monográfico organizado por Intevía., marzo 2010.
- [8] A. R. Gómez, "Las líneas de alta velocidad frente a las líneas convencionales. Adaptación de las líneas convencionales a velocidad alta", 2007.
- [9] M. J. V. M. Melis Maynar, Inventario de puentes ferroviarios en España, 2005.
- [10] C. K. e. Al, Ingeniería de carreteras. Volumen II, Mc Graw-Hill.
- [11] J. Estrade Panades, La superestructura de vía sin balasto: perspectivas de su aplicación en las nuevas líneas de alta velocidad, ROP, Septiembre 1991.

- [12] INECO-TIFSA. Dirección de Vía y explotación, Asistencia Técnica a la construcción y homologación de tramos de ensayo.
- [13] J. F. G. A. G. F. M. H. Puebla Contreras, Para altas velocidades, ¿vía con o sin balasto? ROP, Septiembre 2000.
- [14] B. E. Coelho, J. Priest, P. Hölscher y et al., «Monitoring of Transition Zones in Railways,» *Report*, 2009.
- [15] J. Real, C. Zamorano, T. Real y et al., «New transition wedge design composed by prefabricated reinforced concrete slabs,» *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 13, nº 8, pp. 1431-1449, 2016.
- [16] R. Sañudo, L. Dell'Olio, I. A. Carrascal y et al., «Track transitions in railways: A review,» *Construction and Building Materials*, vol. 1, nº 112, pp. 140-157, 2016.
- [17] A. L. Pita, La rigidez vertical de la vía y el deterioro de las líneas de alta velocidad, Revista de Obras Públicas, Septiembre de 2001.
- [18] J. A. P. Huerga, Vía en placa: aplicación a entornos metropolitanos, 2006.
- [19] E. G. y. M. C. Romo, Infrastructure for new high-speed lines. Transitions structures. Optimisation of design and calculation., Germany: 5th World Congress of Railways, 2001.
- [20] Q. L. T. M. R. K. R. M. a. T. S. D. Robnett, «Development of a structural model and materials evaluation procedure,» *Ballast and Foundation Materials Research Program*, Vols. %1 de %2University of Illinois, report to FRA of US/DOT, Report No. DOT-FR- 30038, 1975.
- [21] A. López Pita, «El coeficiente de balasto y su aplicación al estudio de la mecánica de una vía férrea,» *Revista A.I.T.*, vol. Octubre 1976, nº 12, pp. 53-68, 1976.

- [22] Sauvage, «La trainée de roulement des véhicules de chemin de fer,» *Revue Generale des Chemins de Fer*, Vols. %1 de %2Juiellet-Août, pp. 383-390, 1982.
- [23] C. S. H. Desai, «Numerical models of track support structures,» *ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division*, vol. 108, pp. 461-480, 1982.
- [24] V. Profillidis, «The mechanical behaviour of sleeper-ballast interface,» *Computers & Structures*, vol. 24, nº 3, pp. 437-440, 1986.
- [25] J. Sahu, «Parametric study of resilient response of tracks with a sub-ballast layer,» *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 36, pp. 1137-1150, 1999.
- [26] G. R. Bhashyam, Ansys mechanical- A powerful Nonlinear Simulation Tool, Corporate fellow Development manager mechanics & simulation support group.
- [27] S. Moaveni, Finite Element Analysis (theory and application with Ansys). Prentice.
- [28] R. O. P. y. M. K. Mulungye, Finite element modelling of, Science Direct., 2006.
- [29] M. y. L. E. Vázquez, El método de los elementos finitos aplicado al análisis estructural, Madrid.
- [30] T. R. C. y. A. D. Belegundu., Introducción al estudio del elemento finito en Ingeniería, Segunda edición, Pearson.
- [31] O. y. T. R. Zienkiewicz, Método de los elementos finitos. Formulación, Mc-Graw Hill.
- [32] O. T. R. Zienkiewicz, El método de los elementos finitos. Mecánica de Sólidos, Ed. Mc-Graw Hill.

- [33] S. D. & T. M. R. Tayabji, «PROGRAM ILLI-TRACK: A FINITE ELEMENT ANALYSIS OF CONVENTIONAL RAILWAY SUPPORT SYSTEM. USER'S MANUAL AND PROGRAM LISTING,» *FRA-OR&D-76-257 Final Rpt.*, 1976.
- [34] D. Turcke, «Three-dimensional analysis of rail track structure,» *Transportation Research Record*, vol. 733, pp. 1-6, 1979.
- [35] D. P. Connolly, G. Kourossis, O. Laghrouche y et al., «Benchmarking railway vibrations - Track, vehicle, ground and building effects,» *Construction and Building Materials*, vol. 92, n° 1, pp. 64-81, 2015.
- [36] C. Gallage, B. Dareeju y S. Dhanasekar, «State-of-the-art: Track degradation at bridge transitions,» *Proceedings of the 4th International Conference on Structural Engineering and Construction Management*, pp. 40-52, 2013.
- [37] D. Li y D. Davis, «Transition of railroad bridge approaches,» *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 131, n° 11, pp. 1392-1398, 2005.
- [38] D. Li, D. Otter y G. Carr, «Railway bridge approaches under heavy axle load traffic: Problems, causes, and remedies,» *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 224, n° 5, pp. 383-390, 2010.
- [39] B. E. Coelho, Dynamics of railway transition zones in soft soils, Delft University of Technology, The Netherlands: PhD Thesis, 2011.
- [40] J. N. Varandas, P. Hölscher y M. Silva, «Dynamic behaviour of railway tracks on transitions zones,» *Computers and Structures*, vol. 89, n° 13-14, pp. 1468-1479, 2011.
- [41] X. Lei y B. Zhang, «Analysis of dynamic behaviour for slab track of high-speed railway based on vehicle,» *Journal of Transportation and Engineering*, vol. 137, n° 4, pp. 227-240, 2011.

- [42] A. De Miguel, Analysis of the problems associated with dynamic interaction between train, track and structure at transition zones, Universidad Politécnica de Madrid, Spain: PhD Thesis, 2015.
- [43] J. M. Galván, Estudio por elementos finitos de la transición de vía con balasto - Via en placa, Universitat Politècnica de Catalunya, Spain: Master's Thesis, 2011.
- [44] D. Mishra, Y. Qian, H. Huang y et al., «An integrated approach to dynamic analysis of railroad track transitions behaviour,» *Transportation Geotechnics*, vol. 1, nº 4, pp. 188-200, 2014.
- [45] I. L. P. A. Gallego, Numerical simulation of embankment–structure transition design., 2008.
- [46] P. F. Teixeira, Contribución a la reducción de costes de mantenimiento de vías de alta velocidad mediante la optimización de su rigidez vertical., Barcelona: Tesis Doctoral, 2003.
- [47] B. S. M. B. N. T. C. A. G. & K. R. Indraratna, Improved performance of ballasted tracks at transition zones: A review of experimental and modelling approaches, *Transportation Geotechnics*, 21, 100260., 2019.
- [48] R. M. V., «Cuñas de Transición en Obras de Alta Velocidad,» *Construblog*, 2013.
- [49] Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF), Ficha U.I.C. 719-R. Obras de tierra y capas de asiento ferroviarias., 1983.
- [50] M. Melis Maynar, Terraplenes y balasto en alta velocidad ferroviaria. Segunda, ROP, Marzo 2006.
- [51] P. Fonseca Teixeira, Contribución a la reducción de los costes de mantenimiento de vías de alta velocidad mediante la optimización de su rigidez vertical., Barcelona: Tesis UPC, 2003.

- [52] J. L. Gutiérrez, ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS RELLENOS LOCALIZADOS DEL TRASDOS DE ESTRUCTURAS Y OBRAS DE FÁBRICA EN LAS CARRETERAS, Tesis, 2003.
- [53] M. Moravcik, Vertical Track Stiffness Effect on Dynamic Behaviour of Track Structure, Komunikacie, 2004.
- [54] H. Hunt, "Settlement of railway track near bridge abutments", Proc., 1997.
- [55] S. K. a. A. Remennikov, "Dynamic Properties of railway track and its components: a state of the art review", 2008.
- [56] D. W. A. R. R. ., B. Thompson, Design and construction of expanded polystyrene embankments., 1995.
- [57] A. Y. M. B. KERR, Track Transition problems and remedies, 1993.
- [58] D. Dupont, Movements and Settlements of Highway Bridge Approaches., Kentucky Transportation Center. University of Kentucky, 2002.
- [59] E. Hoppe, Guidelines for the Use, Design, and Construction of Bridge Approach Slabs, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. , 1999.
- [60] M. d. S. Sánchez, «Diseño y Puesta en Valor de Paneles Antivibración Fabricados con Material Secundario Procedente de Neumáticos Usados para su Aplicación en el Campo de las Infraestructuras Ferroviarias,» Laboratorio Ingeniería de la Construcción, Tecnología y Sostenibilidad, Granada, 2012.
- [61] Determinación de la dosificación de hormigones y morteros fraguados, fabricados con cemento, Norma NELC 5.01.a, 1947.
- [62] E. Hoppe y J. Gomez, Field study on integral Backwall bridge. Virginia Transportation Research Council., 1997.
- [63] E. Sedra, «www.edilonsedra.com,» [En línea].

- [64] I. A. Seara, Transition zones of railways. the importance of a geostrutural solution., 2008.
- [65] R. N. B. Woldringh, Embankment design for high speed trains on soft soils
Conception de remblais sur sols meubles pour les chemins de fer à grande vitesse., 1999.
- [66] T. Dahlberg, "Railway Track Stiffness Variations – Consequences and Countermeasures", 2010.
- [67] A. L. Pita, Infraestructuras ferroviarias, UPC, 2006.
- [68] M. Peña, Tramos de ensayo de vía en placa en la línea del Corredor Mediterráneo, Marzo 2003.
- [69] A. & R. Evans, "Rubber/Plastic Composite Rail Sleepers", 2006.
- [70] Isolgomma, «www.Isolgomma.com,» [En línea].
- [71] UIC, "Under Sleeper Pads", 2009.
- [72] G. Werstoffe, «www.getzner.com,» [En línea].
- [73] A. V. M. a. A. L. Pita, "Vibraciones en el Ferrocarril", 2009.
- [74] S. MLG, «www.sistemamlg.es,» [En línea].
- [75] R. S. Ortega, Optimización en el diseño de zonas de transición en vías de alta velocidad usando métodos numéricos, Universidad de Cantabria, 2013.
- [76] M. A. a. I. H. S. Lakuši, "Experimental investigation of railway track with under sleeper pad", Slovenski kongres o cestah in prometu, portoroz, 2010.
- [77] P. F. Teixeira, "Vía sobre subbalasto bituminoso como opción a tener en cuenta para futuras líneas de alta velocidad de España", Bilbao.: I Jornadas

- Internacionales. Nuevas tecnologías y técnicas constructivas en el sector ferroviario., 2007.
- [78] S. i. d. B. C. Chemicals, "Obras Tramo Jardín Ayora-Marítimo de la línea T4 de tranvía de Valencia", 2007.
- [79] R. Á. Lizana, Estudios de vibraciones en líneas de alta velocidad, Bilbao, 2011.
- [80] N. L. P. A. Admetlla, Transición vía en placa-Vía en balasto mediante traviesas cuadro. Tesina UPC., 2010.
- [81] Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF), Instrucciones Generales para los proyectos de Plataforma (IGP), 2006.
- [82] J. Alias y A. Valdés, La vía del ferrocarril, BELLISCO. Librería editorial., 1990.
- [83] I. M. J. R. A. S. S. Gallego, Vertical Track Stiffness as a New Parameter Involved in Designing High-Speed Railway Infrastructure., 2011.
- [84] Administrador de Infraestructuras Ferrviarias (ADIF), NAV 3-1-2.1. Traviesas Monobloque de Hormigón.
- [85] FORTE, «Prefabricados FORTE,» www.forte.es.
- [86] Y. S. E. & T. F. Momoya, «Deformation characteristics of railway roadbed and subgrade under moving-wheel load.,» *Soils and Foundations*, pp. 45(4), 99-118, 2005.
- [87] A. P. E. F. a. R. C. C. Alves Ribeiro, Under sleeper pads in transition zones at railway underpasses: numerical modelling and experimental validation, *Struct. Infrastruct. Eng.*, vol. 11, no. 11, pp. 1432–1449, 2015.
- [88] G. e. a. Kouroussis, «A numerical analysis of the influence of tram characteristics and rail profile on railway traffic ground-borne noise and

- vibration in the Brussels region,» *Science of the Total Environment* 482, pp. 452-460, 2014.
- [89] J. A. F. a. H. E. M. Hunt, A three-dimensional tunnel model for calculation of train induced ground vibration, *J. Sound Vib.*, vol. 294, no. 4-5, pp. 678-705, 2006.
- [90] R. G. a. C. Manning, Vibration isolation for railways, *Acoust. Bull.*, vol. 23, no. 3, 1998.
- [91] W. G. a. H. G. Stuit, Modelling of soil vibrations from railway tunnels, *J. Sound Vib.*, vol. 267, no. 3, pp. 605-619, 2003.
- [92] L. Chi, S. Lu y Y. Yao, «Damping additives used in cement-matrix composites: A review,» *Composites Part B: Engineering*, vol. 164, pp. 26-36, Mayo 2019.
- [93] A. López Pita, Infraestructuras ferroviarias., CENIT.
- [94] J. A. C. a. J. A. P. I. Carrascal, Comportamiento en fatiga de sujeciones de vía de ferrocarril, *Anuales de mecánica de la fractura*, 2001.
- [95] T. Telford, "Concrete Railway Sleepers", FIP Commission on Prefabrication, 1987.
- [96] A. Riessberger, "Ballast track for high speeds", 2006.
- [97] S. Witt, "The Influence of Under Sleeper Pads on Railway Track Dynamics", 2008.
- [98] A. Johansson, "Under Sleeper Pads - Influence on Dynamic Train-Track Interaction", Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden: Research report 2006:02, 2006.
- [99] A. K. Himebaugh, Finite Element Analysis of Insulated Virginia Polytechnic, 2006.

- [100] S. M. F. S. E. y. G. E. Angelone, Deformación, Universidad Nacional de Rosario., 2006.
- [101] M. Bergren, Bi-stable and Dynamic Current Modulation in Electrochemical Organic Transistors, 2002.
- [102] C. A. D. y. S. C. Berthelot, Method for performing accelerated characterization of viscoelastic constitutive behaviour of asphaltic concrete., Journal of Materials in Civil Engineering, 2003.
- [103] F. J. [a. Calvo Poyo, Diseño y características de la vía ferroviaria., Editorial Universitaria de Granada, 2005.
- [104] M. G. P. y. R. E. Cuadrado, Cálculo de plataformas ferroviarias mediante el empleo de modelos matemáticos avanzados., A Coruña, 1998.
- [105] V. De Nájera Valera, Modelos elasto-plásticos para el diseño de plataformas, Departamento de Infraestructura, Julio 2007.
- [106] J. J. Del Coz Díaz y et al., Introducción al Ansys. E.T.S. Ingenieros Industriales, Gijón..
- [107] M. D. M. Delgado Saborit, Evaluación estática de asientos de vía elásticos mediante métodos numéricos. Aplicación a dos tramos de vía experimentales, en el t.m. de Benicàssim (Castellón)., Valencia : Proyecto Final de Carrera..
- [108] I. U. o. R. H. S. Department, "Design of New Lines for Speeds of 300-350Km/h- State of the Art ", 2001.
- [109] R. Dueñas Naranjo, Elementos para la toma de decisiones sobre la utilización de vía sin balasto. Tesina Final de Carrera..
- [110] J. Eisenmann, "Influencia del tamaño de la traviesa, separación entretraviesas y espesor de balasto sobre la sollicitación del subsuelo", 1974.

- [111] e. a. G. Saussine, "Railway ballast flying phenomenon : from numerical computations toward risk assessment.", Berlin: EUROMECH 509: Vehicle Aerodynamics.
- [112] I. Gallego, Heterogeneidad resistente de las vías de alta velocidad: Transición terraplén-estructura. Tesis Doctoral, Universidad de Castilla la Mancha Ciudad Real, 2006.
- [113] P. P. C. Z. C. Gonzalez, Reducción de las variaciones de rigidez vertical de la Vía: establecimiento de criterios de diseño, recepción y Mantenimiento de las infraestructuras ferroviarias., 2006.
- [114] R. M.-L. Gutiérrez, "Investigación sobre el comportamiento de los distintos tipos de balasto ante la aplicación de los criterios de las diferentes normativas", Madrid: Tesis Doctoral UPM, 2008.
- [115] J. A. P. Huerga, "Vía en placa: aplicación a entornos metropolitanos", 2006.
- [116] e. a. I. Carrascal, "Comportamiento dinámico de placas de asiento de, Anuales de mecánica de la fractura Vol. 22..
- [117] D. International, "Ferrocarril. Ruido y vibraciones".
- [118] H. R. J., Railway track transmission line parameters from finite element.
- [119] H. S. L. X. Y. Y. H. & R. J. J. Lin, Long-Term Behavior and Performance of Ballastless Track Superstructure on China's Suining-Chongqing Railway Line. In 2010 Joint Rail Conference, American Society of Mechanical Engineers..
- [120] E. R. M. Cuadrado, Cálculo de plataformas ferroviarias mediante el empleo de modelos matemáticos avanzados, Coruña, 1998.
- [121] J. Mendoza, Diseño, Construcción y Mantenimiento de Vía en Placa., 2012.

- [122] P. [a. Mira, Aplicaciones del método de los elementos finitos a la ingeniería, Revista de Ingeniería Civil, 2000.
- [123] M. I. a. K. Nagai, "Degradation issues of polymer materials used in railway field" Polymer Degradation and Stability 93, 1723–1735., 2008.
- [124] J. Nasarre, Transiciones obra de paso-terraplén Los bloques técnicos en las vías ferroviarias. Proyecto y conservación., 2007.
- [125] A. L. P. P. Fonseca Teixeira, NUEVAS TENDENCIAS EN EL PROYECTO DE INFRAESTRUCTURAS FERROVIARIAS: LA UTILIZACIÓN DE MATERIALES BITUMINOSOS COMO SUBBALASTO, Valencia, 2006.
- [126] P. Remington, Wheel/rail rolling noise. What do we know What dont we know? Where do we go from here?", Sound Vib;120:203–26.
- [127] M. A. a. I. H. S. Lakuši, "Experimental investigation of railway, Slovenski kongres o cestah in prometu, 2010.
- [128] J. Sánchez, "Aparatos de vía y componentes", JEZ Sistemas Ferroviarios., 2004.
- [129] C. D. a. D. D. Sasaoka, Implementing track transition solutions for heavy axle load service. In AREMA., 2005.
- [130] I. A. Seara, Transition zones of railways. the importance of a geostructural solution., 2008.
- [131] P. Teixeira, "Contribución a la reducción de los costes de, Barcelona: Tesis Doctoral. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2003.
- [132] T. W. a. D. Thompson, "Influence of Random Sleeper Spacing and Ballast Stiffness on the Vibration Behaviour of Railway Track", Stuttgart: Acta Acustica, 2000.

-
- [133] I. G. P. R. J. V. A. B. M. Villalba, Análisis Numérico, mediante el Método de los Elementos Finitos, de una cuña de Transición., 2010.
- [134] A. V. Vostroukhov, Three-dimensional dynamics models of a railway track for high-speed trains, Universidad de Delft, 2002..
- [135] I. U. o. Railways, I. U. of Railways, Earthworks and Track-bed Layers for Railway Lines, 1994.