



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,  
Canales y Puertos

Diseño geotécnico de túnel ferroviario de conexión de la  
línea 1 del TRAM con la estación intermodal de Alicante

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

AUTOR/A: Provincial Gallardo, Olga

Tutor/a: Cuesta García, César

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ETS INGENIERÍA DE CAMINOS,  
CANALES Y PUERTOS

# TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

---

Diseño Geotécnico de túnel ferroviario de conexión de la línea 1 del TRAM con la estación intermodal de Alicante.

---

*Presentado por*

Provincial Gallardo, Olga

---

*Para la obtención del*

Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

*Curso: 2021/2022*

*Fecha: Septiembre de 2022*

*Tutor: Cuesta García, César*





# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>SITUACIÓN</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>ANTECEDENTES Y DOCUMENTACIÓN INICIAL</b>	<b>6</b>
<b>3.1</b>	<b>TRAMO 1. PRIMERA FASE DE LA RED TRANVIARIA DE ALICANTE, TRAMO LUCEROS – MERCADO.</b>	<b>6</b>
<b>3.2</b>	<b>TRAMO 0B. LÍNEA 1 DEL TRANVÍA DE ALICANTE Y DEL PARKING DE LA AVENIDA DE LA ESTACIÓN.</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>ESTUDIOS PREVIOS</b>	<b>8</b>
<b>4.1</b>	<b>GEOLOGÍA Y GEOTECNIA</b>	<b>8</b>
4.1.1	CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE LOS MATERIALES	8
4.1.2	IDONEIDAD DE LA CAMPAÑA GEOTÉCNICA	10
4.1.3	CAMPAÑAS GEOTÉCNICAS ANTERIORES	11
4.1.4	PERFIL GEOTÉCNICO	11
<b>4.2</b>	<b>TOPOGRAFÍA Y CARTOGRAFÍA</b>	<b>11</b>
4.2.1	SISTEMA DE REFERENCIA Y PROYECCIÓN UTILIZADA	11
4.2.2	RED DE BASES PRINCIPAL	11
<b>5</b>	<b>CONDICIONANTES TÉCNICOS Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS</b>	<b>12</b>
<b>5.1</b>	<b>CONDICIONANTES TÉCNICOS</b>	<b>12</b>
5.1.1	PROCESO CONSTRUCTIVO	12
5.1.2	AFECCIÓN AL TRÁFICO DE VEHÍCULOS EN SUPERFICIE	12
5.1.3	AFECCIÓN AL TRÁFICO FERROVIARIO SUBTERRÁNEO	12
<b>5.2</b>	<b>ESTUDIO DE ALTERNATIVAS</b>	<b>12</b>
5.2.1	DEFINICIÓN DE LAS ALTERNATIVAS	12
5.2.2	ANÁLISIS MULTICRITERIO	13
<b>6</b>	<b>DISEÑO GEOTÉCNICO DEL TÚNEL</b>	<b>16</b>
<b>6.1</b>	<b>EXCAVACIÓN Y SOSTENIMIENTO DEL TÚNEL</b>	<b>16</b>
<b>6.2</b>	<b>CÁLCULO DE TENSIONES Y DEFORMACIONES</b>	<b>17</b>
6.2.1	GEOMETRÍA DEL MODELO	17
6.2.2	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO	17
6.2.3	RESULTADOS	18
6.2.4	CONCLUSIONES DEL DISEÑO GEOTÉCNICO	20
<b>7</b>	<b>VALORACIÓN ECONÓMICA DE LA SOLUCIÓN</b>	<b>21</b>
<b>8</b>	<b>OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE</b>	<b>21</b>
<b>9</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>22</b>

## BIBLIOGRAFÍA

23

# ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. PARÁMETROS GEOTÉCNICOS UNIDAD 0: RELLENOS. (FUENTE: INFORME GEOTÉCNICO)	9
TABLA 2. PARÁMETROS GEOTÉCNICOS UNIDAD 1 Y UNIDAD 2B: COLUVIAL E INTERCALACIONES LIMOARCILLOSAS DE LA CALIZA LACUSTRE. (FUENTE: INFORME GEOTÉCNICO)	9
TABLA 3. PARÁMETROS GEOTÉCNICOS UNIDAD 2A: CALIZAS LACUSTRES Y CONGLOMERADOS. (FUENTE: INFORME GEOTÉCNICO)	9
TABLA 4. PARÁMETROS GEOTÉCNICOS UNIDAD 3: MARGAS. (FUENTE: INFORME GEOTÉCNICO)	10
TABLA 5. OBSERVACIONES DE LA PROFUNDIDAD DEL NF EN LOS SONDEOS. (FUENTE: INFORME GEOTÉCNICO)	10
TABLA 6. BASES TOPOGRÁFICAS. (FUENTE: TOPOGRAFÍA Y CARTOGRAFÍA)	11
TABLA 7. PESOS ASIGNADOS A LOS OBJETIVOS. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	13
TABLA 8. PESOS ASIGNADOS A LOS INDICADORES. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	13
TABLA 9. VALORACIÓN TIEMPOS DE EJECUCIÓN. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	14
TABLA 10. VALORACIÓN PLAN DE AUSCULTACIÓN. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	14
TABLA 11. VALORACIÓN CALIDAD ATMOSFÉRICA Y CAMBIO CLIMÁTICO. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	14
TABLA 12. VALORACIÓN RUIDO. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	14
TABLA 13. VALORACIÓN GEOMORFOLOGÍA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	14
TABLA 14. VALORACIÓN AFECCIÓN AL TRÁFICO SUPERFICIAL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	14
TABLA 15. VALORACIÓN AFECCIÓN AL TRÁFICO FERROVIARIO SUBTERRÁNEO. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	14
TABLA 16. EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS SEGÚN LOS INDICADORES. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	15
TABLA 17. EVALUACIÓN FINAL DE LAS ALTERNATIVAS SEGÚN LOS OBJETIVOS. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	15
TABLA 18. CLASIFICACIÓN MODIFICADA DE BIENIAWSKI EN SUBCLASES Y COMPARACIÓN CON LA ORIGINAL (FUENTE: ROMANA 2000)	16
TABLA 19. PARÁMETROS GEOTÉCNICOS SEGÚN EL MODELO DE COMPORTAMIENTO DE MOHR COULOMB. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	17
TABLA 20. PARÁMETROS GEOTÉCNICOS SEGÚN EL MODELO DE COMPORTAMIENTO DE HOEK-BROWN. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	17
TABLA 21. ESFUERZOS MÁXIMOS Y MÍNIMOS EN LA SECCIÓN. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	20
TABLA 22. RESUMEN DEL PRESUPUESTO TOTAL POR CAPÍTULOS. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	21
TABLA 23. RELACIÓN DEL TFM CON LOS ODS (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	21

# ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. LOCALIZACIÓN ÁMBITO DE LA ACTUACIÓN. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	5
FIGURA 2. PLANO TRAM DE ALICANTE, ZONA A. (FUENTE: TRAMALICANTE.INFO)	6
FIGURA 3. PERFIL LONGITUDINAL TRAMO 1: LUCEROS – MERCADO. (FUENTE: PROYECTO TRAMO 1)	6
FIGURA 4. SECCIÓN TRANSVERSAL TRAMO 0B: AVENIDA DE LA ESTACIÓN. (FUENTE: PROYECTO TRAMO 0B)	7
FIGURA 5. PLANTA TRAMO 0B. (FUENTE: PROYECTO TRAMO 0B)	7
FIGURA 6. SONDEO PIP 1. (FUENTE: INFORME GEOTÉCNICO)	9
FIGURA 7. LOCALIZACIÓN DE LAS PROSPECCIONES GEOTÉCNICAS DE CAMPAÑAS ANTERIORES. (FUENTE: INFORME GEOTÉCNICO)	11
FIGURA 8. SECCIÓN TRANSVERSAL – ALTERNATIVA 1. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	12
FIGURA 9. SECCIÓN TRANSVERSAL – ALTERNATIVA 2. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	13
FIGURA 10. ESQUEMA DE EJECUCIÓN DE TÚNEL MEDIANTE EL MÉTODO BELGA. (FUENTE: VICTORYEPES.BLOGS)	15
FIGURA 11. PERFIL LONGITUDINAL DEL TRAMO DE TÚNEL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	16
FIGURA 12. ESQUEMA DEL MODELO DE CÁLCULO DEL TÚNEL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	17
FIGURA 13. MODELO DE CÁLCULO DEL TÚNEL. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	17
FIGURA 14. PUNTOS DE PLASTIFICACIÓN Y ROTURA DEL TERRENO EN FASE 1. EXCAVACIÓN DE LA BÓVEDA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	18
FIGURA 15. CONVERGENCIA DE LA SECCIÓN. EXCAVACIÓN DESTROZA COMPLETA (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	18
FIGURA 16. CONVERGENCIA DE LA SECCIÓN. EXCAVACIÓN DESTROZA POR FASES. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	18
FIGURA 17. ESFUERZOS AXILES EN LA SECCIÓN. EXCAVACIÓN DESTROZA COMPLETA (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	19
FIGURA 18. ESFUERZOS AXILES EN LA SECCIÓN. EXCAVACIÓN DESTROZA POR FASES. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	19
FIGURA 19. MOMENTO FLECTORES EN LA SECCIÓN. EXCAVACIÓN DESTROZA COMPLETA. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	20
FIGURA 20. MOMENTO FLECTORES EN LA SECCIÓN. EXCAVACIÓN DESTROZA POR FASES. (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)	20





# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En actuaciones de gran envergadura como son las obras de ingeniería civil, siempre es necesario realizar un estudio preciso del terreno sobre el que se construirá, más aún si la estructura que se diseña es subterránea.

La ingeniería de túneles puede ser de las más antiguas hoy en día y aunque se ha avanzado mucho en el desarrollo tecnológico de maquinaria y métodos de construcción, siguen existiendo factores ambientales que no es posible controlar completamente.

Durante el desarrollo de este trabajo se tratará de dar solución a un caso real planteado para un túnel urbano, mediante la realización de un estudio de alternativas y posteriormente su diseño geotécnico.

Los objetivos principales son los siguientes:

- Estudio de toda la información previa disponible a la obra que se diseña.
- Estudio e identificación del terreno existente en la zona de acción mediante los resultados de una campaña geotécnica.
- Estudio de alternativas.
  - Definición y valoración de varios parámetros.
  - Comparación de alternativas y selección de la más adecuada.
- Cálculo y diseño geotécnico de la solución adoptada. Mediante MEF.
  - Modelado de un terreno a partir de un informe geotécnico. Ensayos in situ y en laboratorio.
  - Elaboración de un modelo de cálculo.
  - Análisis de los resultados.

# 2 SITUACIÓN

El presente estudio de alternativas para el diseño geotécnico de túnel ferroviario se llevará a cabo en el ámbito geográfico de la ciudad de Alicante, concretamente en el entorno de la estación de ADIF, en el cruce de la Avenida Salamanca con la Avenida de la Estación.



Figura 1. Localización ámbito de la actuación. (Fuente: elaboración propia)



### 3 ANTECEDENTES Y DOCUMENTACIÓN INICIAL

En la actualidad, la línea 1 del TRAM presta servicio hasta la Estación de Luceros situada en la Avenida de la Estación, aunque el túnel ferroviario continúa por esta misma vía hasta el cruce con la Avenida Salamanca. Esa prolongación se usa como topera y para maniobras de cambio de vía de los vehículos ferroviarios.

En la figura siguiente, se observa que hasta la Estación de Luceros no solo llega la línea 1, sino que también funciona como fin de trayecto para las líneas L2, L3 y L4.



Figura 2. Plano TRAM de Alicante, Zona A. (Fuente: tramalicante.info)

El estudio de diseño del tramo ferroviario que se desarrolla en este documento se englobaría dentro del conjunto de proyectos que FGV presentó con la intención de unir la red de Metro de Alicante (TRAM) con la red de ferrocarril de larga distancia de ADIF.

Como documentación inicial, la cual se utilizará como base para la definición de las diferentes alternativas que se planteen durante el desarrollo de este trabajo, se me han proporcionado la topografía y cartografía del lugar, el informe geotécnico generado a partir de la campaña realizada en las inmediaciones del emplazamiento y los planos de planta y perfil del emplazamiento del túnel objeto de estudio. Estos planos se adjuntan en el ANEXO 1: Antecedentes y documentación inicial.

Además, se dispone de los estudios y proyectos previos al análisis de este tramo final y que pueden servir como punto de partida para el estudio de alternativas:

- Tramo 1. Primera fase de la Red Tranviaria de Alicante, tramo Luceros – Mercado.
- Tramo 0B. Línea 1 del Tranvía de Alicante y del parking de la Avenida de la Estación.

En ellos se describen los proyectos de diseño y construcción del tramo situado entre las estaciones Luceros y Mercado (Tramo 1) y la prolongación desde esta última estación hacia la Avenida Salamanca (Tramo 0B).

Los planos de información de estos dos proyectos se presentan en el ANEXO 1: Antecedentes y documentación inicial.

### 3.1 Tramo 1. Primera fase de la Red Tranviaria de Alicante, tramo Luceros – Mercado.

Este primer tramo se encuentra bajo la Avenida de Alfonso X El Sabio y une las estaciones de Luceros y Mercado.

El túnel se caracteriza por su construcción mediante la técnica del Nuevo Método Austriaco. La elección de esta técnica se basó en un análisis multicriterio y uno de los condicionantes principales fue la existencia previa de un aparcamiento subterráneo de 2 plantas en la misma avenida de Alfonso X El Sabio, para el cual debía evitarse cualquier afeción durante la ejecución de las obras.

Tiene una longitud de 506.70 metros lineales y una sección en bóveda con una semicircunferencia superior de 3.95 metros de radio, hastiales de 2.95 metros de altura y una contrabóveda inferior.

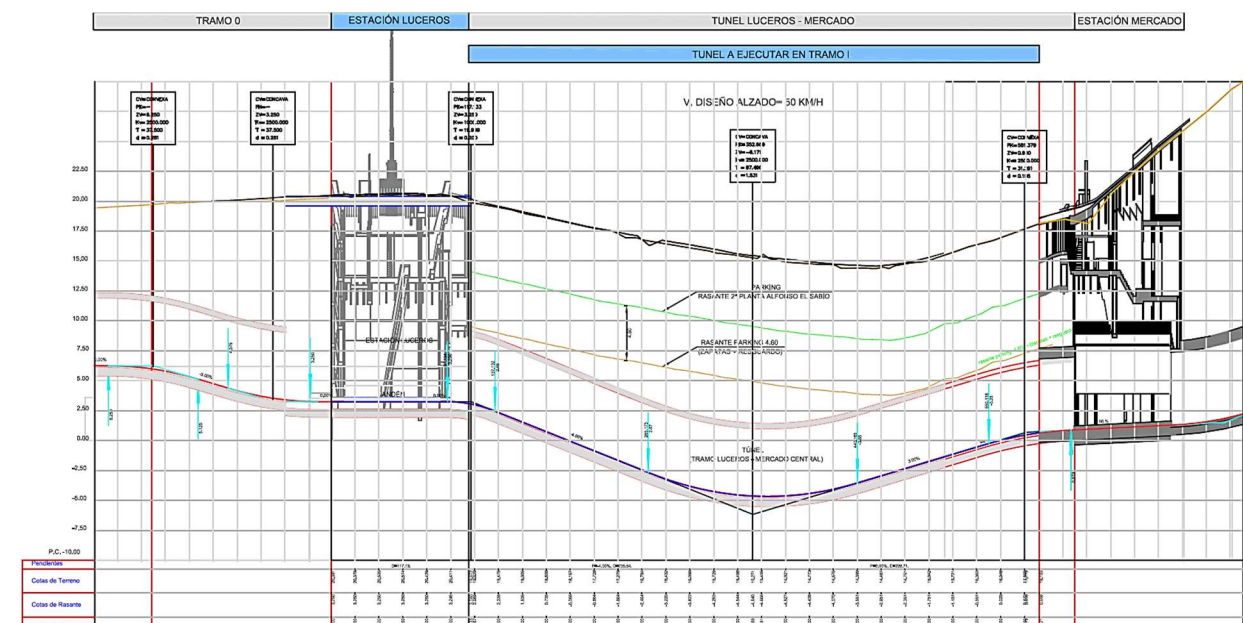


Figura 3. Perfil longitudinal Tramo 1: Luceros – Mercado. (Fuente: Proyecto Tramo 1)

Junto al tramo de túnel se proyectó la Estación de Luceros situada bajo la plaza que lleva el mismo nombre. La estación está constituida por dos niveles principales y niveles intermedios que sirven para albergar cuartos técnicos. El primer nivel principal está ocupado por el vestíbulo y se encuentra a una profundidad de 7 metros bajo la superficie. Por otra parte, el segundo nivel principal, que se encuentra a mayor profundidad (aproximadamente 17 metros bajo la superficie) es el que contiene las vías de tránsito de trenes y el andén central que facilita el acceso y salida de pasajeros en ambos sentidos.

### 3.2 Tramo 0B. Línea 1 del Tranvía de Alicante y del parking de la Avenida de la Estación.

Este tramo 0B se encuentra bajo la misma Avenida de la Estación, entre la Estación de Luceros y el cruce con la Avenida Salamanca.

En este caso, el túnel se proyectó como un cajón ferroviario confinado entre pantallas de pilotes de hormigón, las cuales se aprovecharían también para construir un aparcamiento subterráneo de tres plantas.

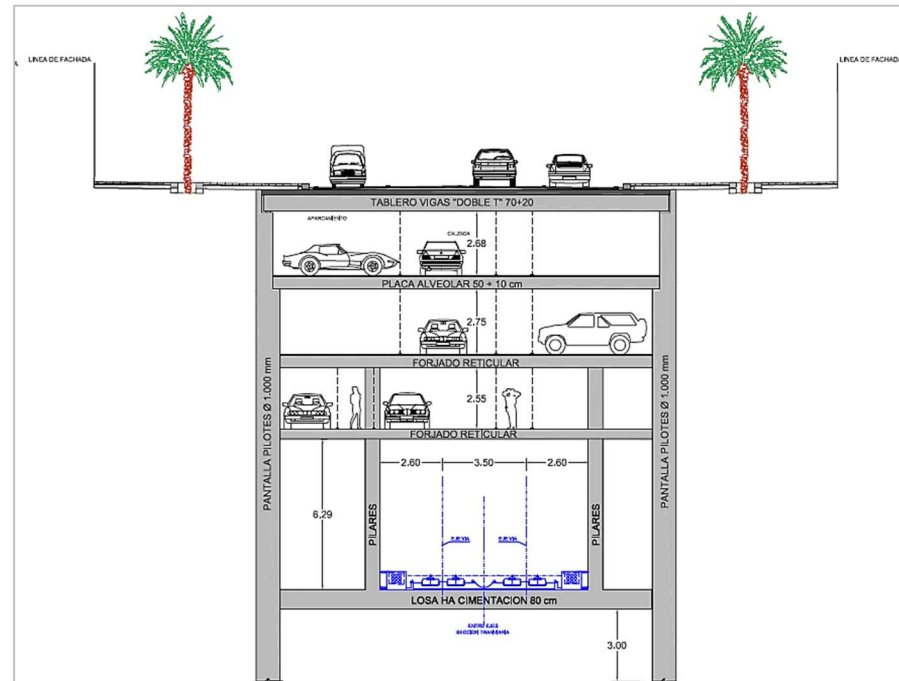


Figura 4. Sección transversal Tramo 0B: Avenida de la Estación. (Fuente: Proyecto Tramo 0B)

El eje longitudinal del tramo proyectado reproduce fielmente el eje y la rasante de la Avenida de la Estación, tiene una longitud total de 323.165 metros.

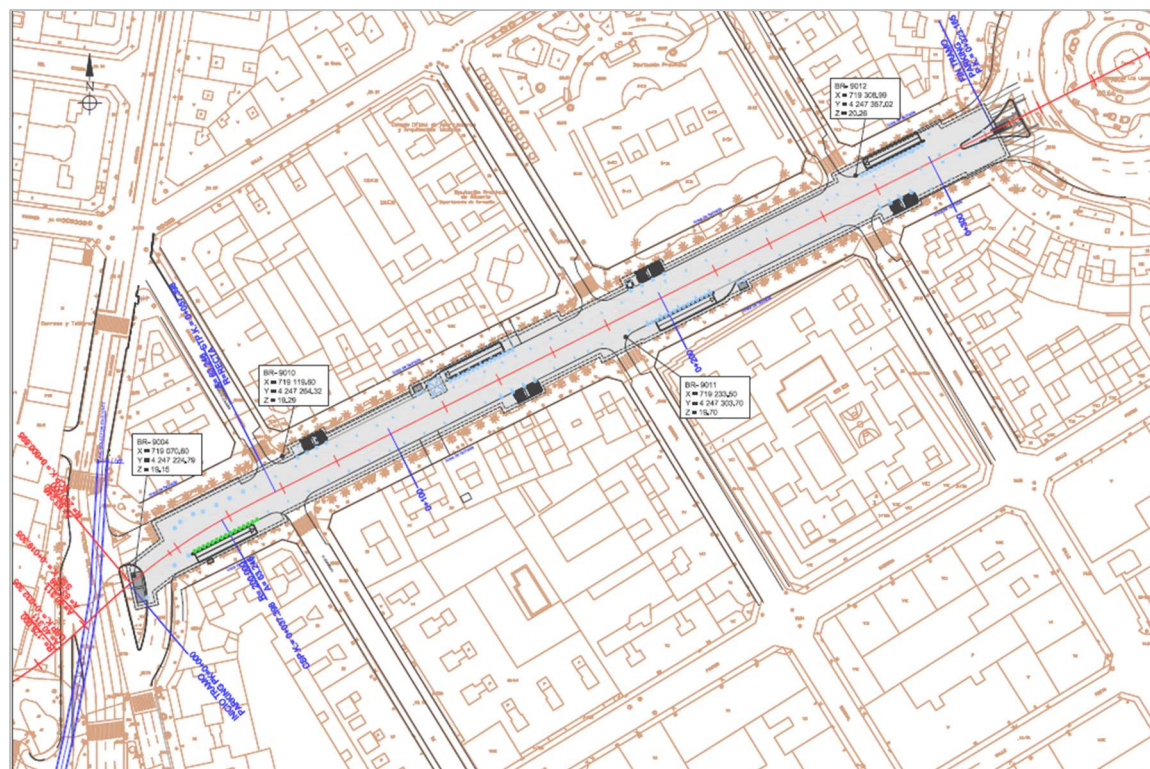


Figura 5. Planta Tramo 0B. (Fuente: Proyecto Tramo 0B)



# 4 ESTUDIOS PREVIOS

En este apartado se analizarán los estudios previos relacionados con las condiciones del terreno realizados en el entorno del túnel ferroviario que se pretende diseñar.

La principal finalidad será realizar un análisis de la información disponible y determinar si toda ella resulta suficiente o si deberían realizarse nuevas campañas para completar y verificar esa información.

## 4.1 Geología y geotecnia

Para analizar el encuadre geológico y geotécnico de la obra se dispone de varios estudios realizados en el mismo entorno del tramo que se pretende diseñar.

- Informe geotécnico para el Proyecto de Diseño del Tramo Avenida de Salamanca – Estación Intermodal de Alicante.
- Estudio geotécnico del Proyecto 1ª Fase de la Red Tranviaria de Alicante. 2005.
- Estudio geotécnico del Proyecto de desdoblamiento del colector general de Alicante. 1998.

El primero de ellos es el más actual y el que se ha realizado expresamente para diseñar el Tramo 0A de la línea 1 del TRAM de Alicante.

La exposición y análisis de esta información se recoge por completo en el ANEXO 1: Antecedentes y documentación inicial.

### 4.1.1 Caracterización geotécnica de los materiales

#### 4.1.1.1 Identificación y descripción

Considerando todos los ensayos de campo y de laboratorio y sus respectivos resultados, se han establecido 4 unidades con significado geotécnico. Se muestra a continuación una breve descripción de cada uno de ellos.

#### Unidad 0: Rellenos

Hay que considerar que la campaña de prospección se ha llevado a cabo en una zona fuertemente antropizada por la construcción de viales, parques, aparcamientos, etc.

Los espesores de los rellenos son importantes en todo los sondeos, desde 3.75 a 6.10 metros.

En general los materiales son de naturaleza limoarenosa con algunos cantos y fragmentos de roca y presencia de raíces y restos antrópicos.

#### Unidad 1: Coluvial: Limos y limos arenosos con gravas

Esta unidad no se detecta en todos los sondeos, y en aquellos en los que se encuentra, el espesor no supera los 2 metros.

Estos materiales quedarán por encima de la infraestructura proyectada, son fácilmente excavables y no supondrán ningún problema para atravesarlos con el uso de medios convencionales.

#### Unidad 2: Calizas y conglomerados

Este nivel se ha subdividido en dos subunidades porque en la formación rocosa se han encontrado intercalaciones limoarcillosas que pueden suponer una merma en la resistencia del conjunto. Estas se hacen más abundantes hacia el cruce de la Avenida Salamanca con la Avenida de la Estación.

La formación rocosa presenta distintas texturas a lo largo de la traza, desde calizas puramente lacustres, calizas conglomeráticas con cantos redondeados, hasta calizas arenosas (calcarenitas). Los tramos de roca, en general, presentan resistencias altas a compresión, entre 8.3 y 34.3 MPa, encontrándose en algunos tramos con valores superiores a los 70 MPa.

Estas resistencias supondrán un condicionante técnico en cuanto a la elección del método constructivo para el tramo de túnel que se pretende diseñar.

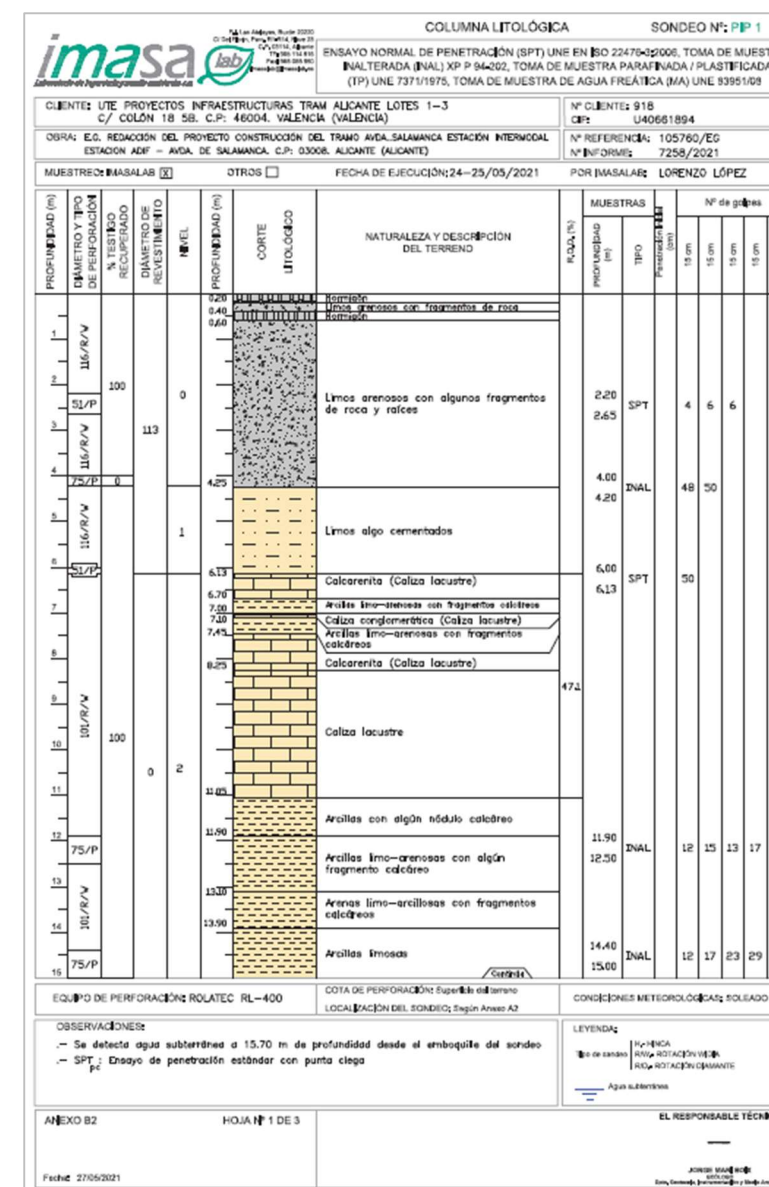
#### Unidad 3: Margas

Último nivel geotécnico encontrado en todas las prospecciones. Se extiende varios centenares de metros y su consistencia se incrementa con la profundidad.

En estas rocas predominan las fracciones limosas y arcillosas y su plasticidad determina que la clasificación ASCS sea ML-CL / CL.

Analizando los ensayos realizados sobre esta unidad, observamos mayoritariamente unos valores de SPT de rechazo y los que se han obtenido están entre 37 y 40 golpes. La consistencia de este nivel se considera “dura”, lo que corrobora los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a compresión simple que arrojan un valor medio de 725 kPa.

Se muestra a continuación la columna estratigráfica extraída a partir del sondeo PIP 1, para ilustrar las diferentes unidades descritas:



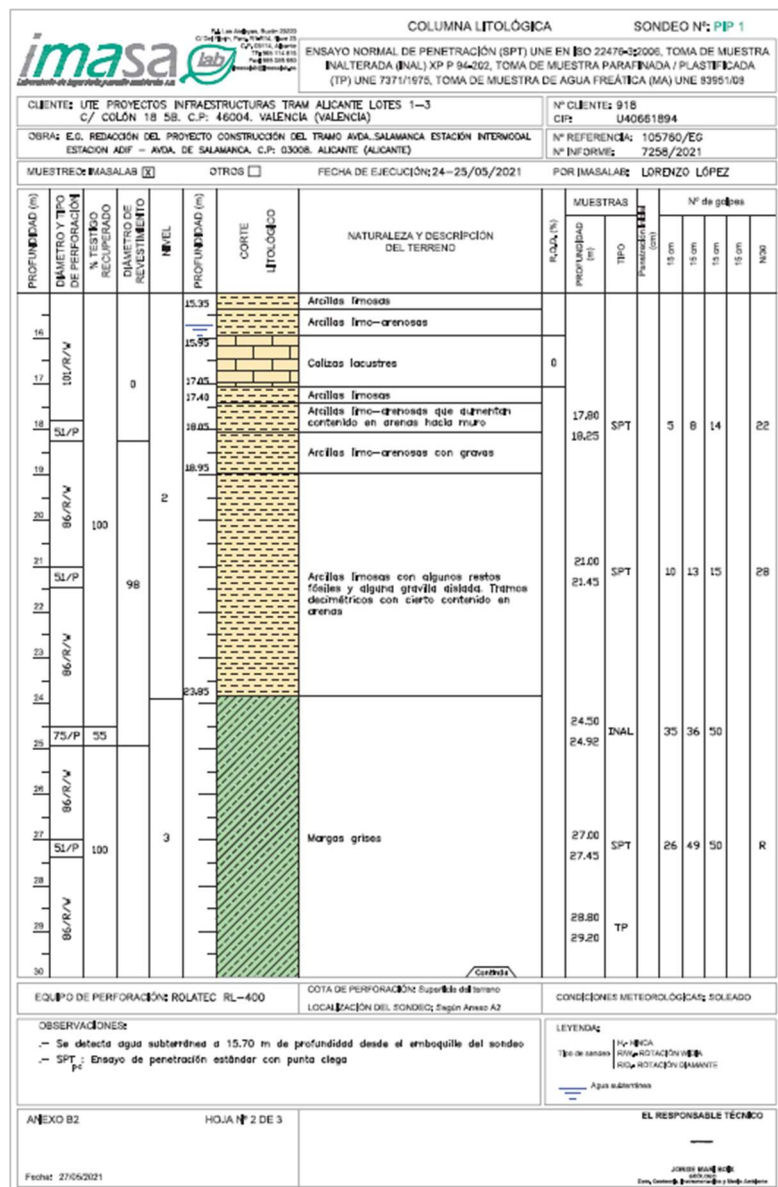


Figura 6. Sondeo PIP 1. (Fuente: Informe geotécnico)

4.1.1.2 Parámetros geotécnicos

Para cada una de las unidades geotécnicas se han determinado sus parámetros más representativos.

Tabla 1. Parámetros geotécnicos Unidad 0: Rellenos. (Fuente: Informe geotécnico)

Unidad 0: Rellenos			
Parámetro	Resultado	Parámetro	Resultado
Peso específico partículas sólidas	2.68	Grado de saturación (%)	39.7-50.4
Densidad seca (kN/m3)	16-17.5	Valor medio N <sub>30</sub> SPT	3-12
Densidad aparente (kN/m3)	17.6-19.3	Consistencia	Muy floja - Floja
Densidad saturada (kN/m3)	20-21	Ángulo roz. Interno efectivas	21

Porosidad (%)	40.3-34.7	Ángulo roz. Interno totales	28
Índice de poros	0.675-0.531	Cohesión (kPa)	Nula
Humedad (%)	10	Módulo deformación (Mpa)	6.5-14
Permeabilidad (cm/s)	10 <sup>-5</sup> a 10 <sup>-8</sup>	Coef. balasto (kN/m3)	(1.2 – 4.8) · 10 <sup>4</sup>

Tabla 2. Parámetros geotécnicos Unidad 1 y Unidad 2b: Coluvial e intercalaciones limoarcillosas de la caliza lacustre. (Fuente: Informe geotécnico)

Unidad 1 y Unidad 2b: Coluvial e intercalaciones limoarcillosas de la caliza lacustre			
Parámetro	Resultado	Parámetro	Resultado
Grava (2.0-60.0 mm) (% peso)	0-4.2	Porosidad (%)	35.1
Arena (0.06-2.0 mm) (% peso)	18-32.5	Índice de poros	0.54
Limo (0.002-0.06 mm) (% peso)	65.6-82	Humedad (%)	20.2
Arcilla (<0.002 mm) (% peso)		Grado de saturación (%)	Saturado
Límite líquido	22.4-30.2	Valor medio N <sub>30</sub> SPT	19
Índice de plasticidad	4.4-16.8	Consistencia	Media
Clasificación USCS	ML-CL / CL	Ángulo roz. Interno efectivas	34.2
clasificación AASTHO	A4 / A6	Ángulo roz. Interno totales	28.6
Peso específico partículas sólidas	2.68	Cohesión efectivas (kPa)	18
Densidad seca (kN/m3)	17.4	Cohesión totales (kPa)	52
Densidad aparente (kN/m3)	20.4	Módulo deformación (Mpa)	20-25
Densidad sumergida (kN/m3)	10.9	Coef. balasto (kN/m3)	8-10
Permeabilidad (cm/s)	10 <sup>-7</sup> a 10 <sup>-8</sup>	Presión de hinchamiento (kPa)	Nula

Tabla 3. Parámetros geotécnicos Unidad 2a: Calizas lacustres y conglomerados. (Fuente: Informe geotécnico)

Unidad 2a: Calizas lacustres y conglomerados			
Parámetro	Resultado	Parámetro	Resultado
Peso específico partículas sólidas	2.7	Módulo de deformación (MPa)	2000
Densidad seca (kN/m3)	25.3	Coef. balasto (kN/m3)	>800 · 10 <sup>4</sup>

Densidad aparente (kN/m <sup>3</sup> )	25.9	Factor $m_t$ de la matriz rocosa	8	
Densidad sumergida (kN/m <sup>3</sup> )	15.9	Clasificación RMR	Índice medio	72
Porosidad (%)	6.3		Clase	II
Índice de poros	0.067		Calidad	Buena
Resistencia a compresión (MPa)	8.3-34.3		Cohesión	3-4
Permeabilidad (cm/s)	$> 10^{-3}$		Ángulo roz. Interno	35-45

Tabla 4. Parámetros geotécnicos Unidad 3: Margas. (Fuente: Informe geotécnico)

Unidad 3: Margas			
Parámetro	Resultado	Parámetro	Resultado
Grava (2.0-60.0 mm) (% peso)	0	Porosidad (%)	30.9
Arena (0.06-2.0 mm) (% peso)	2.5-10	Índice de poros	0.448
Limo (0.002-0.06 mm) (% peso)	67-68	Humedad (%)	17
Arcilla (<0.002 mm) (% peso)	22-30	Grado de saturación (%)	Saturado
Límite líquido	24.4-36.1	Valor min $N_{30}$ SPT (media valores bajos)	49
Índice de plasticidad	5.6-18.6	Consistencia	Dura
Clasificación USCS	ML-CL / CL	Ángulo roz. Interno efectivas	22.3
Clasificación AASTHO	A4 / A6	Ángulo roz. Interno totales	24.5
Peso específico partículas sólidas	2.65	Cohesión efectivas (kPa)	141
Densidad seca (kN/m <sup>3</sup> )	18.4	Cohesión totales (kPa)	154
Densidad aparente (kN/m <sup>3</sup> )	21.4	Módulo deformación (Mpa)	48-100
Densidad sumergida (kN/m <sup>3</sup> )	21.4	Coef. balasto (kN/m <sup>3</sup> )	(21 a 44) · 10 <sup>4</sup>
Permeabilidad (cm/s)	$10^{-7}$ a $10^{-8}$	Coef. balasto horizontal pantallas. <sup>(1)</sup> (T/m <sup>3</sup> )	805.5/D
Contenido de sulfatos (mg/kg)	<2000	Coef. balasto horizontal pilotes. <sup>(2)</sup> (T/m <sup>3</sup> )	2416.6/b

(1) Para pantallas, siendo D, el empotramiento de la pantalla en m.

(2) Para pilotes, siendo b el ancho equivalente del pilote.

#### 4.1.1.3 Nivel freático

Se ha detectado presencia de agua subterránea en todas las perforaciones realizadas durante la campaña geotécnica.

Tabla 5. Observaciones de la profundidad del NF en los sondeos. (Fuente: Informe geotécnico)

SONDEO	FECHA	PROFUNDIDAD (m)	FECHA	PROFUNDIDAD (m)
PIP 1	25/05/2021	15.70	01/07/2021	15.65
PIP 2	17/05/2021	14.50	01/07/2021	14.46
PIP 4	18/05/2021	11.00	-	-
PIP 5	20/05/2021	8.60	-	-
PIP 7	21/05/2021	9.10	01/07/2021	8.06

Por los datos parece que puede existir cierto gradiente hacia el E, algo lógico ya que es la zona más cercana a antiguo barranco de San Blas, por donde existen corrientes de agua subterránea. Se observa que en la zona de la Avenida de Salamanca el agua se concentra en las intercalaciones limoarcillosas del nivel 2.

#### 4.1.2 Idoneidad de la campaña geotécnica

Como ya se ha comentado, de toda la campaña geotécnica realizada, los sondeos que proporcionan una información más significativa y fiable para el diseño del túnel son los sondeos PIP.1 y PIP.2.

Para determinar si la campaña geotécnica ha sido adecuada, se han consultados dos documentos. El primero es la Guía de cimentaciones de obras de carretera (GCOC) y el segundo de ellos es la Instrucción para el proyecto, construcción y explotación de obras subterráneas para el transporte terrestre (IOS 98), que se encuentra derogada, pero puede ser útil para la realización de este análisis de idoneidad. Las recomendaciones presentes en estos documentos se exponen en el ANEXO 1: Antecedentes y documentación inicial.

Conociendo estas recomendaciones y lo que se ha presentado sobre el informe geotécnico en las inmediaciones del túnel, podemos determinar que los sondeos y ensayos realizados son insuficientes, porque:

- Solo se han llevado a cabo 2 sondeos, uno a mitad del tramo (PIP.1) y otro al inicio (PIP.2). Es cierto que, en el tramo final, en la unión con el tramo 0B, se conoce la estratigrafía debido a la ejecución de la obra de ese mismo tramo.
- Los valores de los parámetros geotécnicos de las diferentes unidades se han determinado a través de uno o dos ensayos de laboratorio de cada tipo.

Por tanto, se propone la ampliación de la campaña geotécnica con:

- Un sondeo mecánico para la extracción de, al menos, una muestra inalterada de cada unidad geotécnica.
- Ensayos de laboratorio para contrastar y verificar la información sobre los valores de los parámetros.
  - Determinación de la humedad.
  - Determinación de la densidad seca y natural.
  - Resistencia a compresión simple.
  - Ángulo de rozamiento interno y cohesión efectivos y totales.



### 4.1.3 Campañas geotécnicas anteriores

Como ya se mencionó en la introducción del punto 4.1, además del informe geotécnico para el tramo en estudio, existían anteriormente dos campañas ejecutadas en la misma zona.

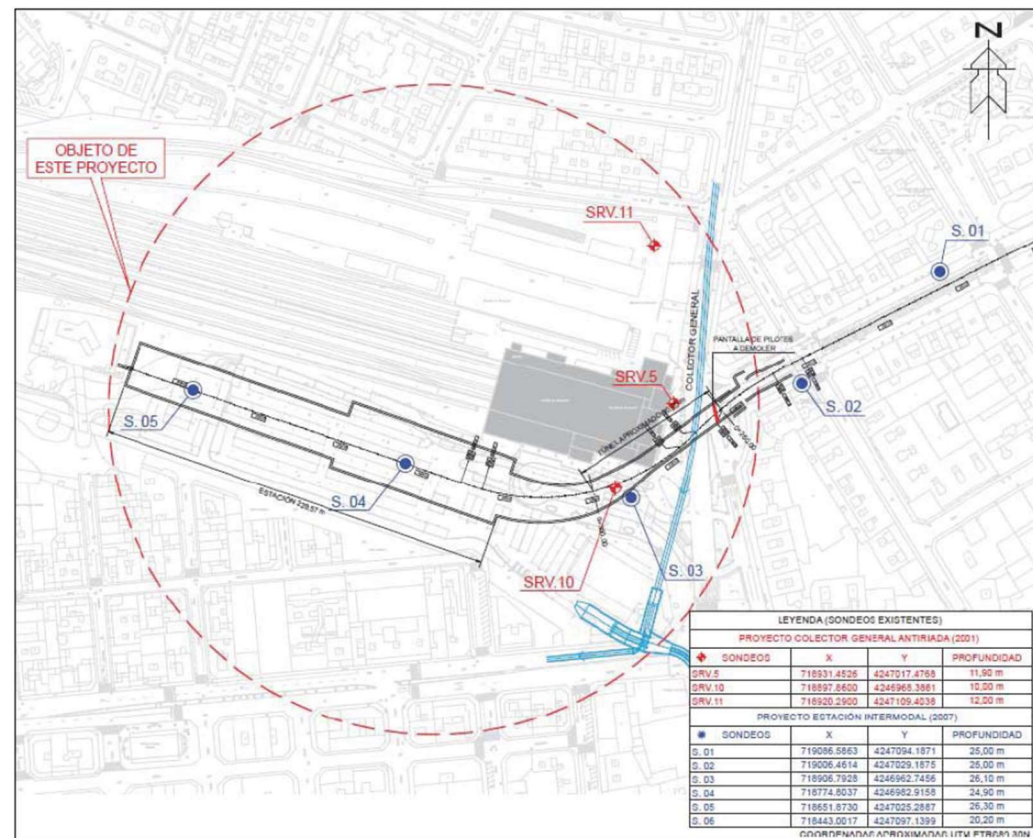


Figura 7. Localización de las prospecciones geotécnicas de campañas anteriores. (Fuente: Informe geotécnico)

De todas estas prospecciones, las realizadas en el entorno del nuevo tramo de túnel son:

- S.02
- S.03
- SRV.5
- SRV.10

Los resultados de estos sondeos se muestran en el ANEXO 1: Antecedentes y documentación inicial. Se comprueba que aparecen los mismos niveles geotécnicos que en los sondeos recientemente realizados.

### 4.1.4 Perfil geotécnico

A partir del análisis del terreno y de todos los datos recogidos del informe geotécnico, se determina un perfil geotécnico en la traza del túnel con las siguientes características:

- Se identifican cuatro unidades geotécnicas:
  - Unidad 0: Rellenos antrópicos
  - Unidad 1: Coluvial
  - Unidad 2a: Calizas lacustres y conglomerados
  - Unidad 3: Margas
- Dentro de la Unidad 2a, se han identificado intercalaciones limoarcillosas que se han calificado como Unidad 2b y para las cuales, los parámetros geotécnicos estimados son los mismos que los de la Unidad 1: Coluvial.
- Como simplificación se considera que el nivel freático es estático y se encuentra a 15 metros de profundidad.

El perfil geotécnico obtenido a partir de la interpolación de los sondeos PIP.1, PIP.2, SRV.10 y S.02 se muestra en el ANEXO 4: Planos.

## 4.2 Topografía y cartografía

### 4.2.1 Sistema de referencia y proyección utilizada

Según el Real Decreto 1071/2007 del 27 de julio de 2007, se adopta el Sistema de Referencia Geodésico ETRS89 para la referenciación geográfica y cartográfica de la Península Ibérica y Baleares.

Como Sistema de Proyección para la representación se emplea la proyección UTM (Universal Transversa de Mercator). La zona de trabajo está situada dentro del Huso 30 de esta proyección cilíndrica. [1]

### 4.2.2 Red de bases principal

Para la definición del proyecto se hace necesaria la implantación de una red de bases de replanteo.

Para la implantación de la RED BASE GPS, el procedimiento ha sido la observación de las bases por el método GPS estático con períodos de observación de 40 minutos. Se han implantado un total de 6 bases; 3 en el entorno de la Plaza de Luceros y otras 3 cerca del parking de la estación de ADIF. [1]

El listado de coordenadas de las bases de replanteo se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 6. Bases topográficas. (Fuente: Topografía y Cartografía)

ID. BASE	COORD. X	COORD. Y	ALTURA ORTOMÉTRICA	CQ 3D
ALAC	720135.9269	4246422.291	10.4532	-
ADIF 1	718840.2295	4246942.164	18.7365	0.0006
ADIF 2	718912.2005	4246942.461	18.5969	0.0006
ADIF 3	718959.7757	4247018.741	19.163	0.0008
B1	719316.6041	4247140.558	19.5944	0.0012
B2	719291.9697	4247199.606	21.0854	0.0023
B3	719259.5367	4247234.082	21.7571	0.0033



## 5 CONDICIONANTES TÉCNICOS Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS

Para realizar un adecuado estudio de alternativas, previamente deben conocerse los condicionantes técnicos que pueden afectar al diseño de la obra.

Posteriormente, el estudio de alternativas se realizará mediante un análisis multicriterio donde se definirán las alternativas que considerar y se fijarán unos objetivos y sus correspondientes indicadores, de manera que cada alternativa pueda ser evaluada y comparada con las demás. La finalidad de este apartado es seleccionar la solución más adecuada para el problema que se ha planteado.

Tanto la definición de los condicionantes técnicos como el estudio de alternativas se desarrollan con mayor detalle en el ANEXO 2: Condicionantes técnicos y estudio de alternativas.

### 5.1 Condicionantes técnicos

#### 5.1.1 Proceso constructivo

Este condicionante es necesario evaluarlo porque cada técnica de construcción de túneles tiene unos requerimientos específicos.

- Técnicas de excavación en mina: En este grupo se incluyen métodos como el Belga, el nuevo método Austríaco o el proceso de perforación mediante tuneladora.
- Técnica de túneles con muros pantalla, o técnica de falso túnel en la que se excava la totalidad o parte del hueco del túnel desde la superficie a cielo abierto. Requiere de la ejecución de un sistema de sostenimiento fuerte que soporte las cargas del material que cubrirá el túnel.

#### 5.1.2 Afección al tráfico de vehículos en superficie

Aquí debemos considerar la localización de la actuación: cruce entre la Avenida Salamanca y la Avenida de la Estación y, también, diferenciar entre los procesos constructivos descritos en el punto anterior.

Las técnicas de excavación en mina implican que todos los trabajos se realizarán bajo la superficie, por lo que su afección al tráfico superficial va a ser mínima.

Sin embargo, la técnica de excavación entre pantallas implica una serie de trabajos en superficie y la excavación a cielo abierto, por lo que sus afecciones puede que resulten ser mayores.

#### 5.1.3 Afección al tráfico ferroviario subterráneo

El tráfico ferroviario no va a verse afectado por las obras del nuevo tramo en estudio, ya que el TRAM presta servicio hasta la Estación de Luceros, la cual queda a cierta distancia del nuevo tramo proyectado.

### 5.2 Estudio de alternativas

#### 5.2.1 Definición de las alternativas

Se fijan en primer lugar unas características comunes a todas las alternativas que se proponen:

- Tramo de túnel con trazado en planta en línea recta.
- La longitud del tramo es de 100 metros.
- Pendiente del -2 % en dirección hacia la Avenida de la Estación. Conocemos que en el PK 0+000 del Tramo 0B, la plataforma ferroviaria se encuentra a 14 metros de profundidad, por lo que la sección transversal de unión del tramo con la estación intermodal estaría 12 metros bajo la superficie.

##### 5.2.1.1 Alternativa 0: La no ejecución del tramo de túnel

La no ejecución del tramo de túnel no se contempla ya que el objetivo fundamental de la actuación es la conexión de la Línea 1 del TRAM con la futura Estación Intermodal de Alicante.

##### 5.2.1.2 Alternativa 1: Construcción mediante técnicas de excavación en mina – Método Belga

Se propone la ejecución del tramo de túnel mediante el método Belga. Su geometría se plantea con bóveda semicircular de radio interior 4.63 metros, hastiales de 1.45 metros y una contrabóveda inferior. Una altura libre de 6.08 metros desde el plano de rodadura y una anchura total de 9.26 metros.

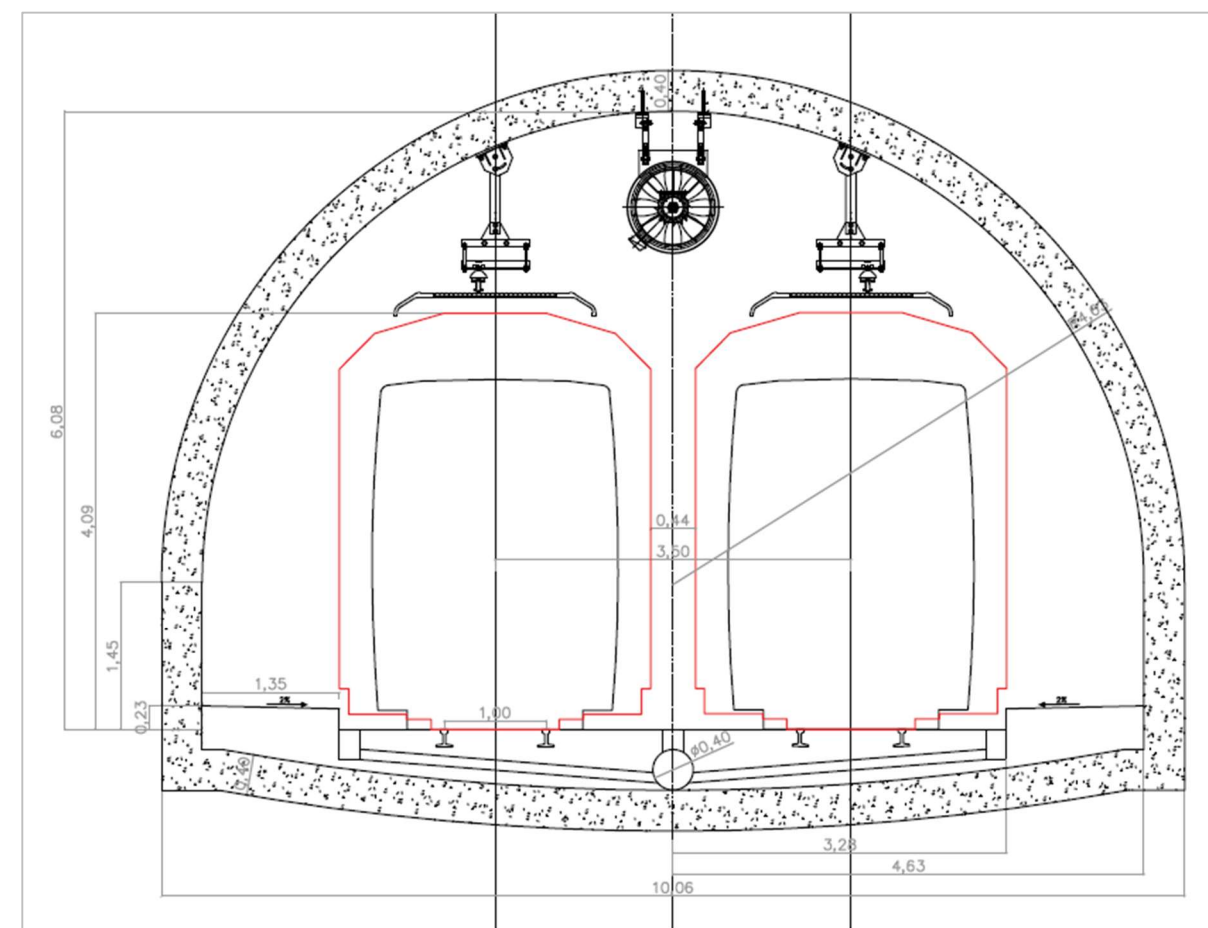


Figura 8. Sección transversal – Alternativa 1. (Fuente: Elaboración propia)

### 5.2.1.3 Alternativa 2: Construcción mediante técnica del falso túnel – Método “cut and cover”

Se propone como segunda alternativa la ejecución del tramo de túnel con el método “cut and cover” en su modalidad “top down”, ya que es uno de los métodos que se están comenzando a generalizar en las actuaciones urbanas para minimizar al máximo sus afecciones a los servicios en superficie.

La geometría propuesta es una sección tipo cajón con muros pantalla de 0.8 metros de espesor a ambos lados, una losa inferior y una losa superior de cierre. La altura libre desde el plano de rodadura es de 6 metros y la anchura de 9.26 metros.

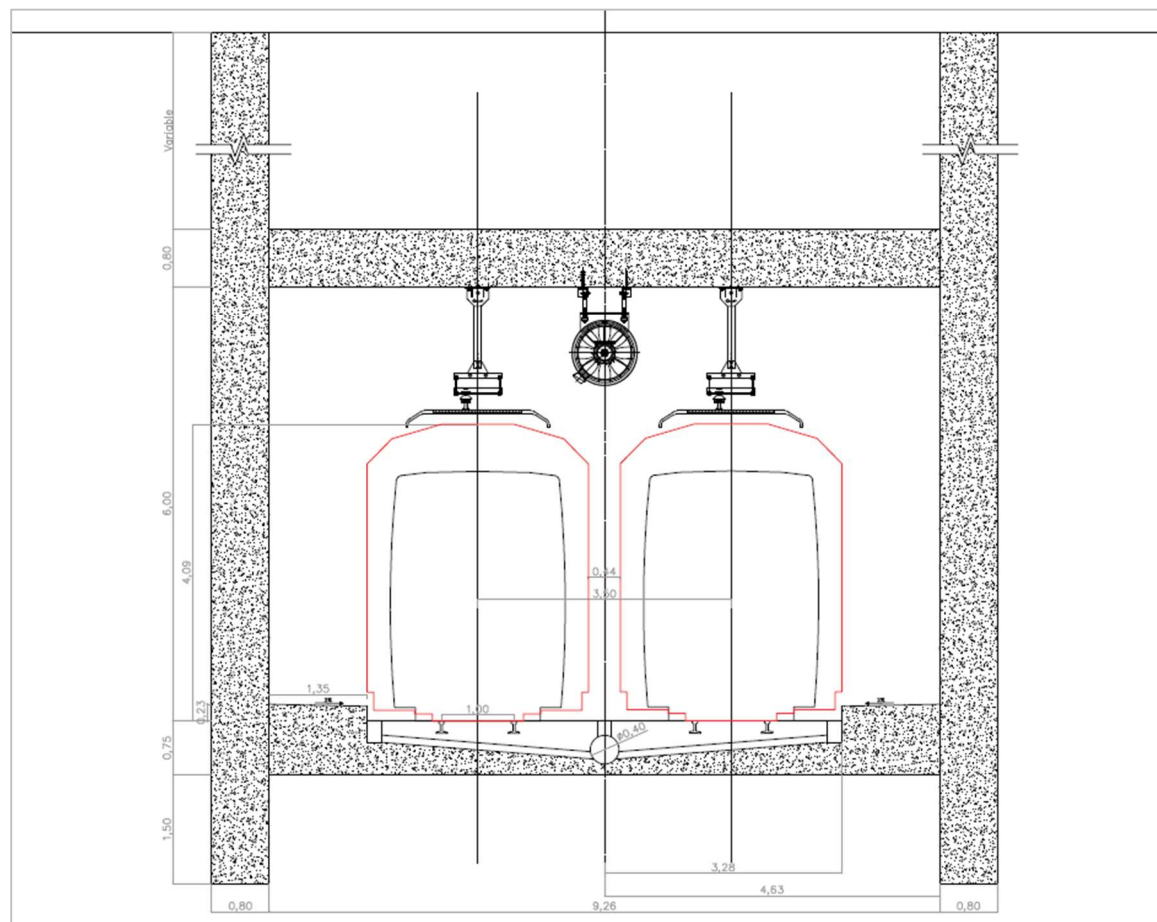


Figura 9. Sección transversal – Alternativa 2. (Fuente: Elaboración propia)

La geometría de ambas secciones se puede apreciar con mayor detalle en el ANEXO 4: Planos.

### 5.2.2 Análisis multicriterio

La metodología seguida se muestra a continuación:

- Definición de objetivos que se persiguen con la actuación y de los indicadores que afectan a cada uno de ellos.
- Definición de las alternativas que dan solución al problema planteado.
- Evaluación de cada indicador sobre las alternativas y asignación de los pesos correspondientes.
- Selección de la alternativa más adecuada en función de los resultados del análisis realizado.

Los objetivos e indicadores que se han definido para la realización del análisis son:

- Objetivo de ejecución:
  - Tiempo de ejecución.
  - Plan de auscultación.
- Objetivo ambiental:
  - Calidad atmosférica y cambio climático.
  - Ruido y vibraciones.
  - Movimiento de tierras.
- Objetivo de afecciones:
  - Afección al tráfico superficial.
  - Afección al tráfico ferroviario subterráneo.
- Objetivo económico:
  - Coste de ejecución.

Cada indicador se evaluará y se puntuará con una escala entre 0 y 10 según el grado de afección a la alternativa estudiada. A cada uno de los objetivos definidos se le asignan unos pesos en función del interés o expectativa social de cada uno.

Tabla 7. Pesos asignados a los objetivos. (Fuente: Elaboración propia)

ANÁLISIS COMPARATIVO	RANGO MÁX. (mín. – máx.)	PESO
Objetivo de ejecución	0-10	0.15
Objetivo ambiental	0-10	0.20
Objetivo de afecciones	0-10	0.35
Objetivo económico	0-10	0.30
<b>TOTAL</b>	<b>0-10</b>	<b>1.00</b>

Dentro de cada objetivo, los indicadores tendrán un peso determinado:

Tabla 8. Pesos asignados a los indicadores. (Fuente: Elaboración propia)

OBJETIVO	INDICADOR	RANGO MÁX. (MÍN-MÁX)	PESO
<b>Objetivo funcional</b>	Tiempo ejecución	0-10	0.50
	Plan de auscultación	0-10	0.50
	<b>TOTAL</b>		<b>1.00</b>
<b>Objetivo ambiental</b>	Calidad atmosférica y cambio climático	0-10	0.30
	Ruido y vibraciones	0-10	0.30
	Movimiento de tierras	0-10	0.40
	<b>TOTAL</b>		<b>1.00</b>
<b>Objetivo de afecciones</b>	Tráfico en superficie	0-10	0.5
	Tráfico ferroviario subterráneo	0-10	0.5
	<b>TOTAL</b>		<b>1.00</b>
<b>Objetivo económico</b>	Coste ejecución	0-10	1.00
	<b>TOTAL</b>		<b>1.00</b>

Con el estudio de cada indicador sobre las alternativas planteadas, se obtendrá una matriz final de valoración en la que cada alternativa tendrá un único valor indicativo de su idoneidad frente al problema planteado. La solución que mayor puntuación global obtenga será la que se proponga finalmente para el diseño geotécnico del túnel.

Cada uno de estos indicadores se ha evaluado de manera individual y con detalle para cada alternativa en el ANEXO 2: Condicionantes técnicos y estudio de alternativas.

## 5.2.2.1 Objetivo de ejecución

### 5.2.2.1.1 Tiempos de ejecución

En este punto se realizará una aproximación somera a esos tiempos de ejecución para cada alternativa. La duración de cada actividad se ha obtenido a partir de los rendimientos que aparecen en la Base de Datos de Construcción del IVE. [2]

El criterio de evaluación que se va a emplear para la evaluación de los tiempos de ejecución es:

- Valor 10: alternativas con duración inferior al 20% de la media.
- Valor 5: alternativas con presupuesto igual a la media.
- Valor 0: alternativas con presupuesto superior al 20% de la media.

Se obtiene:

Tabla 9. Valoración tiempos de ejecución. (Fuente: Elaboración propia)

Alternativa	Tiempo de ejecución	Puntuación
1	53 semanas	2.4
2	43 semanas	7.6

### 5.2.2.1.2 Plan de auscultación

Para definir los planes de auscultación de cada alternativa, se ha consultado la Guía técnica sobre Instrumentación y Auscultación en el proyecto y construcción de túneles urbanos de AETOS. [3]

Este indicador se va a evaluar en función del nivel de control que se debe realizar en cada caso. Estableciendo la siguiente escala de valores:

- Puntuación de 10 para la alternativa que necesite un nivel de control “Normal”
- Puntuación de 5 para la alternativa que necesite un nivel de control “Medio”
- Puntuación de 0 para la alternativa que necesite un nivel de control “Intenso”

Se obtienen las siguientes puntuaciones:

Tabla 10. Valoración plan de auscultación. (Fuente: Elaboración propia)

Alternativa	Nivel de control	Puntuación
1	Medio	5
2	Normal	10

## 5.2.2.2 Objetivo ambiental

Para evaluar cada indicador que se define dentro de este objetivo, se va a tener en cuenta si los impactos que se producen al entorno serán reversibles o no, asignándoles una puntuación en función del impacto que provoque cada alternativa.

Valor	Denominación
10	Impacto no significativo
9-7	Impacto compatible
6	Impacto moderado
5-4	
3-2	Impacto severo

### 5.2.2.2.1 Calidad atmosférica y cambio climático

Para calificar estos impactos, determinamos que las alternativas van a tener un impacto moderado sobre la calidad atmosférica y el cambio climático, por lo tanto, las puntuaciones de cada una van a estar entre 4 y 6 puntos.

Tabla 11. Valoración calidad atmosférica y cambio climático. (Fuente: Elaboración propia)

Alternativa	Factor $CO_2e$ ( $tn CO_2e$ )	Puntuación
1	530	6
2	1337	4

### 5.2.2.2.2 Ruido y vibraciones

En función del nivel de percepción de ruido por parte de los ciudadanos durante la ejecución de las obras:

- Nivel bajo: puntuación de 9.
- Nivel medio: puntuación de 8.
- Nivel alto: puntuación de 7.

Tabla 12. Valoración ruido. (Fuente: Elaboración propia)

Alternativa	Percepción del ruido	Puntuación
1	Nivel bajo	9
2	Nivel alto	7

### 5.2.2.2.3 Movimiento de tierras

Durante la ejecución de las obras se van a producir grandes excavaciones cuyas tierras deberán ser transportadas a vertedero o a zonas de acopio de material para volver a usarse posteriormente en la misma obra o en otras zonas.

Estos movimientos de tierras van a provocar un impacto calificado como compatible por parte de las alternativas, por lo tanto, la puntuación de estas va a variar entre 7 y 9.

Asignando las puntuaciones a cada alternativa:

Tabla 13. Valoración geomorfología. (Fuente: Elaboración propia)

Alternativa	Exc. neta (excavación - relleno)	Puntuación
1	6275	9
2	6991.3	7

## 5.2.2.3 Objetivo de afecciones

### 5.2.2.3.1 Afección al tráfico superficial

El estudio de este indicador puede realizarse en función del tiempo que se ocupa la vía pública y, por tanto, se interrumpe el tráfico en superficie.

- Valor 0: La duración de toda la obra. 100% de la duración.
- Valor 10: No se interrumpe el tráfico en ningún momento. 0% de la duración de la obra.
- Calificando este indicador:

Tabla 14. Valoración afección al tráfico superficial. (Fuente: Elaboración propia)

Alternativa	% afección en tiempo	Puntuación
1	21.60%	7.84
2	87.70%	1.23

### 5.2.2.3.2 Afección al tráfico ferroviario subterráneo

Asignando puntuaciones de 0 a 10 en función del tiempo de afección a este tipo de tráfico:

Tabla 15. Valoración afección al tráfico ferroviario subterráneo. (Fuente: Elaboración propia)

Alternativa	% afección en tiempo	Puntuación
1	0%	10
2	0%	10



Se muestran a continuación los resultados obtenidos del análisis multicriterio.

Tabla 16. Evaluación de las alternativas según los indicadores. (Fuente: Elaboración propia)

OBJETIVO	INDICADOR	PESO	Alternativa 1		Alternativa 2	
			Puntuación	Valor ponderado	Puntuación	Valor ponderado
Objetivo funcional	Tiempo ejecución	0.50	2.4	1.2	7.6	3.8
	Plan de auscultación	0.50	5	2.5	10	5
	<b>TOTAL</b>	<b>1.00</b>		<b>3.70</b>		<b>8.80</b>
Objetivo ambiental	Calidad atmosférica y cambio climático	0.30	6	1.8	4	1.2
	Ruido y vibraciones	0.30	9	2.7	7	2.1
	Geomorfología	0.40	9	3.6	7	2.8
	<b>TOTAL</b>	<b>1.00</b>		<b>8.100</b>		<b>6.10</b>
Objetivo de afecciones	Tráfico en superficie	0.5	7.84	3.92	1.23	0.615
	Tráfico ferroviario subterráneo	0.5	10	5	10	5
	<b>TOTAL</b>	<b>1.00</b>		<b>8.920</b>		<b>5.615</b>
Objetivo económico	Coste ejecución	1.00	7.95	7.95	2.05	2.05
	<b>TOTAL</b>	<b>1.00</b>		<b>7.95</b>		<b>2.05</b>

Tabla 17. Evaluación final de las alternativas según los objetivos. (Fuente: Elaboración propia)

ANÁLISIS COMPARATIVO	PESO	Alternativa 1		Alternativa 2	
		Puntuación	Valor ponderado	Puntuación	Valor ponderado
Objetivo funcional	0.15	3.70	0.56	8.80	1.32
Objetivo ambiental	0.20	8.10	1.62	6.10	1.22
Objetivo de afecciones	0.35	8.92	3.12	5.62	1.97
Objetivo económico	0.30	7.95	2.39	2.05	0.61
<b>TOTAL</b>	<b>1.00</b>		<b>7.68</b>		<b>5.12</b>

A la vista de la puntuación final del análisis desarrollado, la alternativa más adecuada para el diseño del tramo de túnel que une la línea 1 de TRAM con la futura estación intermodal de Alicante es la **Alternativa 1: Construcción mediante técnicas de excavación en mina – Método Belga.**

En el siguiente capítulo se procederá al diseño y cálculo geotécnico de esta solución.

Para comprobar el resultado que se ha obtenido y corroborar que la alternativa 1 es la mejor opción, se ha decidido realizar un análisis adicional mediante el método TOPSIS. A continuación, se muestran los pasos seguidos y los resultados obtenidos.

1. Construcción de la matriz de decisión.

Pesos	0.15	0.2	0.35	0.3
Criterios de decisión	Obj. Funcional	Obj. Ambiental	Obj. De afecciones	Obj. Económico
Alternativa 1	3.70	8.1	8.92	7.95
Alternativa 2	8.80	6.1	5.62	2.05

Los valores son las puntuaciones que ha obtenido cada alternativa sobre cada objetivo.

2. Normalización de la matriz de decisión.

Pesos	0.15	0.2	0.35	0.3
Criterios de decisión	Obj. Funcional	Obj. Ambiental	Obj. De afecciones	Obj. Económico
Alternativa 1	0.388	0.799	0.846	0.968
Alternativa 2	0.922	0.602	0.533	0.250

3. Matriz normalizada y ponderada por los pesos establecidos para cada criterio.

Pesos	0.15	0.2	0.35	0.3
Criterios de decisión	Obj. Funcional	Obj. Ambiental	Obj. De afecciones	Obj. Económico
Alternativa 1	0.058	0.160	0.296	0.290
Alternativa 2	0.138	0.120	0.187	0.075

4. Obtención de la solución ideal positiva y negativa para cada criterio.

Criterios de decisión	Obj. Funcional	Obj. Ambiental	Obj. De afecciones	Obj. Económico
A+	0.138	0.160	0.296	0.290
A-	0.058	0.120	0.187	0.075

5. Obtención de la distancia euclidiana y de la proximidad relativa a la solución ideal.

	d+	d-	R	Ranking
Alternativa 1	0.080	0.245	0.754	1
Alternativa 2	0.245	0.080	0.246	2

Podemos comprobar finalmente que, tal y como se había concluido, la alternativa que más se acerca a la solución óptima positiva es la **Alternativa 1: Construcción mediante técnicas de excavación en mina – Método Belga.**

Las fases de ejecución de este método se han explicado en el ANEXO 2: Condicionantes técnicos y estudio de alternativas. Se incluye a continuación una imagen ilustrativa de las diferentes fases que se deben desarrollar:

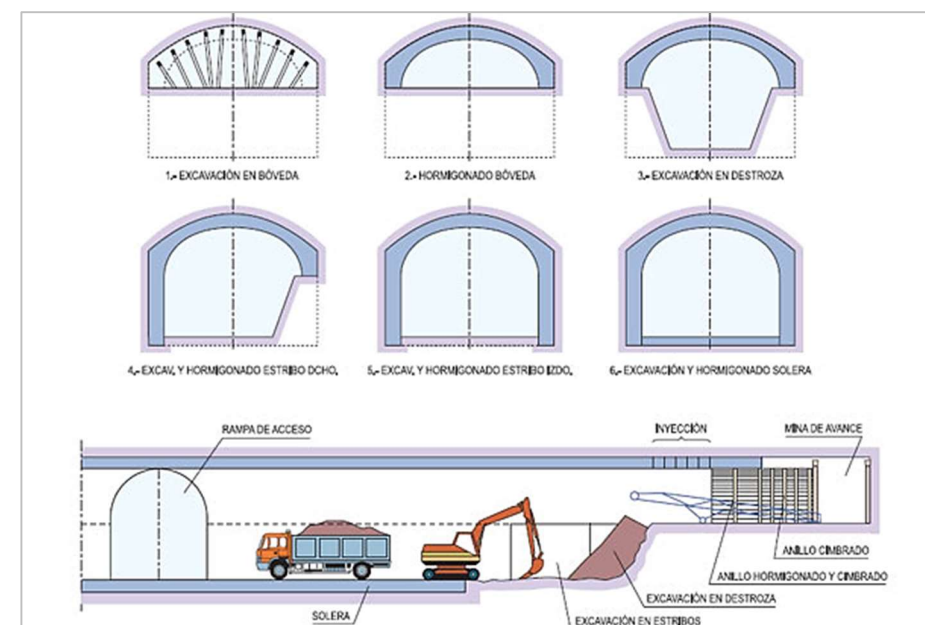


Figura 10. Esquema de ejecución de túnel mediante el Método Belga. (Fuente: victoryepes.blogs)



## 6 DISEÑO GEOTÉCNICO DEL TÚNEL

La solución seleccionada a partir del análisis multicriterio ha sido la de ejecución del tramo de túnel mediante técnicas de excavación en mina – Método Belga.

Para el diseño geotécnico del túnel se han empleado dos metodologías. La primera de ellas es un método empírico con el que se establecerán el método de excavación y los elementos de sostenimiento más adecuados.

Por otra parte, se empleará un método numérico para, finalmente, calcular las tensiones y deformaciones y comprobar que el sostenimiento predefinido mediante el método empírico es adecuado.

### 6.1 Excavación y sostenimiento del túnel

En este punto se han tomado como referencia las *RECOMENDACIONES DE SOSTENIMIENTO PARA TÚNELES* de M. Romana Ruiz [4].

En este artículo, se describen una serie de recomendaciones para la excavación de túneles en función de la clasificación geomecánica de los macizos rocosos. En España la clasificación geomecánica más utilizada es la de BIENIAWSKI (1976, 1979 y 1989), en función del índice RMR (“Rock mass rating”).

ROMANA propone la división de cada clase en 2 subclases, ya que defiende que, dentro de cada clase, el valor más alto y más bajo pueden identificar a macizos muy diferentes entre sí. Se presenta a continuación la tabla con la comparación entre ambas clasificaciones.

Tabla 18. Clasificación modificada de BIENIAWSKI en subclases y comparación con la original (Fuente: ROMANA 2000)

RMR	MODIFICADO		BIENIAWSKI ORIGINAL	
	CLASE	DENOMINACIÓN	DENOMINACIÓN	CLASE
100	la	EXCELENTE	MUY BUENA	I
90	lb	MUY BUENA		
80	II a	BUENA A MUY BUENA	BUENA	II
70	II b	BUENA A MEDIA		
60	III a	MEDIA A BUENA	MEDIA	III
50	III b	MEDIA A MALA		
40	IV a	MALA A MEDIA	MALA	IV
30	IV b	MALA A MUY MALA		
20	V a	MUY MALA	MUY MALA	V
10	V b	PÉSIMA		

Todas las recomendaciones de excavación y sostenimiento del método de M. Romana se desarrollan por completo en el ANEXO 3: Comprobaciones geotécnicas de la solución adoptada.

Para determinar el método de excavación y sostenimiento adecuado debemos tener en cuenta el perfil geotécnico del terreno donde se llevará a cabo la actuación, para poder determinar qué estratos son los afectados por la ejecución de la obra.

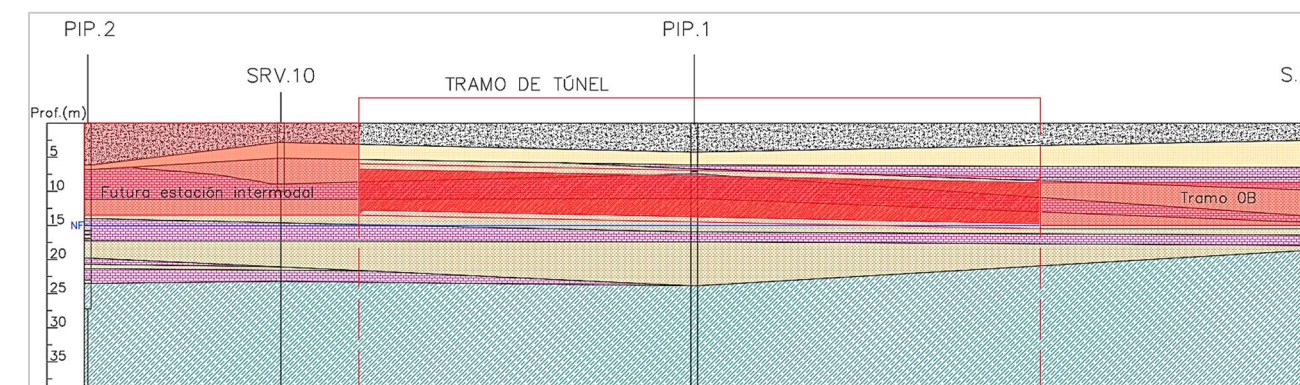


Figura 11. Perfil longitudinal del tramo de túnel. (Fuente: Elaboración propia)

Observando el perfil longitudinal, podemos determinar que la traza del túnel atravesará el nivel definido en el estudio geotécnico como “UNIDAD 2: Calizas y conglomerados” dividida en dos subunidades. La subunidad 2a compuesta por una formación rocosa de diferentes texturas de roca caliza y conglomerados que presentan altas resistencias a compresión. Al determinar los parámetros geotécnicos de esta unidad, se ha fijado que su índice RMR es 72 y, por lo tanto, el macizo se clasifica con Clase IIa y calidad “Buena a muy buena”.

Sin embargo, se define otra subunidad 2b compuesta por intercalaciones limoarcillosas de caliza lacustre. Esta subunidad supone una merca en la calidad y resistencia de la matriz rocosa. Los parámetros geotécnicos para las intercalaciones limoarcillosas se asemejan y se equiparan con los determinados para la Unidad 1: Coluvial de limos y limos arenosos con gravas, con unas propiedades muy inferiores a las detectadas en las subunidad 2a.

Debemos tener en cuenta las intercalaciones limoarcillosas que se encuentran en la matriz rocosa y que hacen que su resistencia disminuya. Para esto se va a considerar que el índice RMR decrece hasta situarse en los valores del grupo de Clase IIIa – Calidad “Media a buena”, es decir, se reduce en 2 grupos la calidad del macizo.

Considerando esta reducción de calidad debida a las intercalaciones limoarcillosas y conociendo las recomendaciones establecidas por Romana [4], podemos definir tanto el método de excavación como el sostenimiento definitivo para el tramo que se está diseñando.

El método de excavación se realizará mediante rozadora, con partición de la sección en bóveda y destroza, y una longitud de pase de 4 metros. Por otra parte, el método de sostenimiento que se propone es el hormigón proyectado con fibras con espesor de 4 cm más una capa de sellado, cerchas tipo TH-21/1.5 metros y bulonado con barras de acero corrugado B500S de  $\phi 25$  mm inyectado con mortero, con longitudes de bulón de 4 metros y espaciamientos en mallas de 1.5x1.5 metros entre ellos. El revestimiento final se ejecutará posteriormente mediante encofrado y hormigonado en masa.

Este diseño de excavación y sostenimiento podría modificar ligeramente el presupuesto y el plan de obra planteado de forma aproximada en el estudio de alternativas.



## 6.2 Cálculo de tensiones y deformaciones

Se recurre en este caso a un método numérico, concretamente el método de elementos finitos mediante la utilización del software PLAXIS 2D.

### 6.2.1 Geometría del modelo

Nos encontramos ante una obra longitudinal, por lo que a lo largo de la traza las secciones de terreno que se atraviesan pueden variar considerablemente, por este motivo, para realizar el cálculo de tensiones y deformaciones se va a estudiar una sección concreta y se va a suponer que es la representativa de toda la traza.

Como simplificaciones se toma:

- Los estratos son horizontales en el ancho de la sección.
- Para tener cierta certeza sobre los espesores de cada uno de los estratos se toma la columna litológica extraída del sondeo PIP.1 como la representativa de toda la traza.

El esquema queda de la siguiente manera:

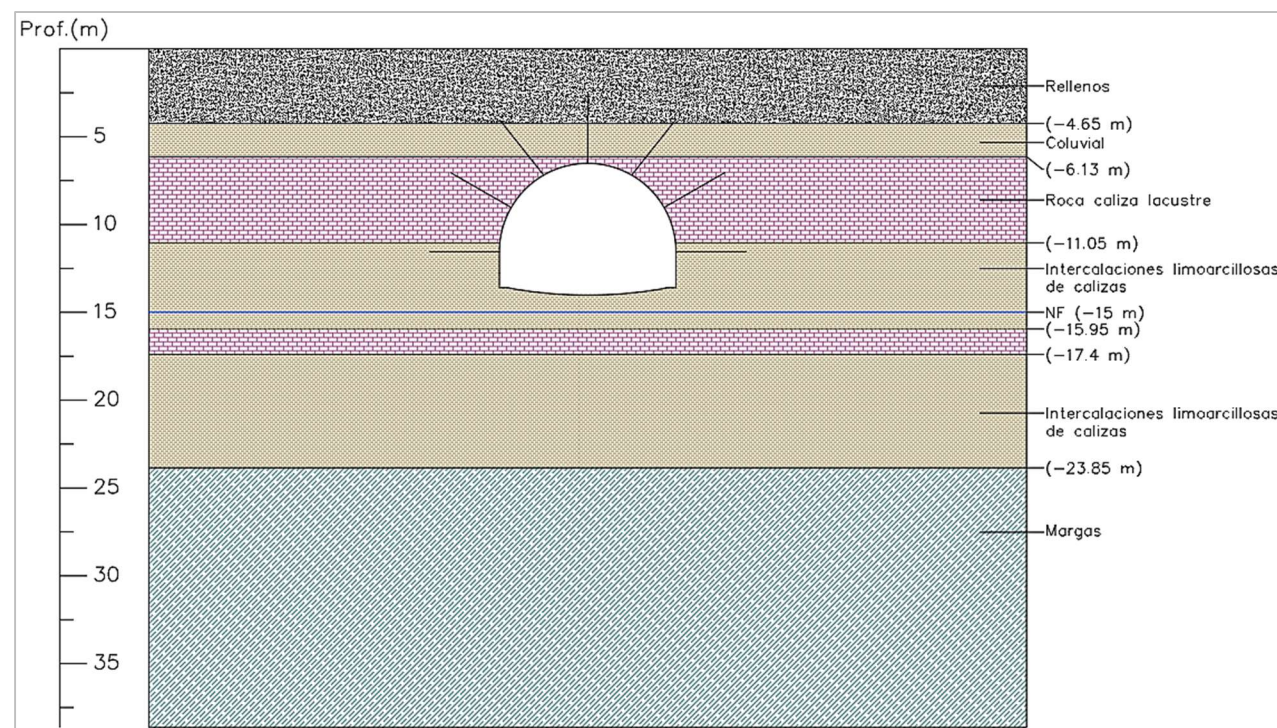


Figura 12. Esquema del modelo de cálculo del túnel. (Fuente: Elaboración propia)

### 6.2.2 Implementación del modelo numérico

Para ejecutar los cálculos numéricos y obtener los resultados deseados se debe incorporar tanto la geometría como las propiedades de cada uno de los estratos en el programa de elementos finitos con el que se vaya a calcular, en este caso PLAXIS 2D.

Para los materiales presentes en el terreno se deben especificar ciertos parámetros. Estos se han determinado a partir de los resultados de la campaña geotécnica y se presentan a continuación. A los materiales con características de suelos, se les ha asignado comportamiento elasto-plástico perfecto (Modelo de Mohr Coulomb) y a la unidad rocosa (unidad 2a) se le ha asignado comportamiento de rocas (Modelo Hoek-Brown). Los parámetros requeridos en ambas situaciones van a ser diferentes:

Tabla 19. Parámetros geotécnicos según el modelo de comportamiento de Mohr Coulomb. (Fuente: Elaboración propia)

	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$k_x = k_y$ (cm/s)	E (Mpa)	$\nu$	c' (MPa)	$\phi'$ (°)
<b>Rellenos</b>	18	20.5	1.00E-07	10	0.3	0	21
<b>Coluvial</b>	20.4	20.9	1.00E-08	22.5	0.4	18	34.2
<b>Intercalaciones limoarcillosas de roca caliza</b>	20.4	20.4	1.00E-08	22.5	0.4	18	34.2
<b>Margas</b>	21.4	21.4	1.00E-08	60	0.15	141	22.3

Tabla 20. Parámetros geotécnicos según el modelo de comportamiento de Hoek-Brown. (Fuente: Elaboración propia)

	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$E_{rm}$ (Mpa)	$ \sigma_{ci} $ (Mpa)	$\nu$	$\psi$ (°)	$m_i$	GSI	D
<b>Roca caliza lacustre</b>	25.9	25.9	43223.77	35	0.2	0	8	72	0

Además de los materiales presentes en el terreno con sus características, debe considerarse el entorno urbano en el que se construirá esta obra, por lo que hay que aplicar unas cargas de tráfico en superficie que pueden llegar a influir significativamente en el cálculo de tensiones y deformaciones.

Estas cargas se incluyen conforme a lo establecido en la Instrucción de Acciones sobre Puentes (IAP). Se considerará únicamente las cargas verticales por sobrecarga de uso debidas al tráfico de vehículos. Se contempla:

- Ancho total ocupado por el tráfico: 30 metros.
- Mediana de 1 metro en el centro.
- 4 carriles virtuales a cada lado de la mediana, de 3 metros de ancho. Un área remanente de 2 metros a cada lado.
- Carga uniforme vertical en los dos carriles centrales: 9 kN/m.
- Carga uniforme vertical en el resto de los carriles y el área remanente: 2.5 kN/m.
- Vehículo pesado en el primer carril situado a la derecha de la mediana. Ruedas separas 2 m. Carga puntual sobre cada rueda: 150 kN.

La geometría completa del modelo se muestra a continuación.

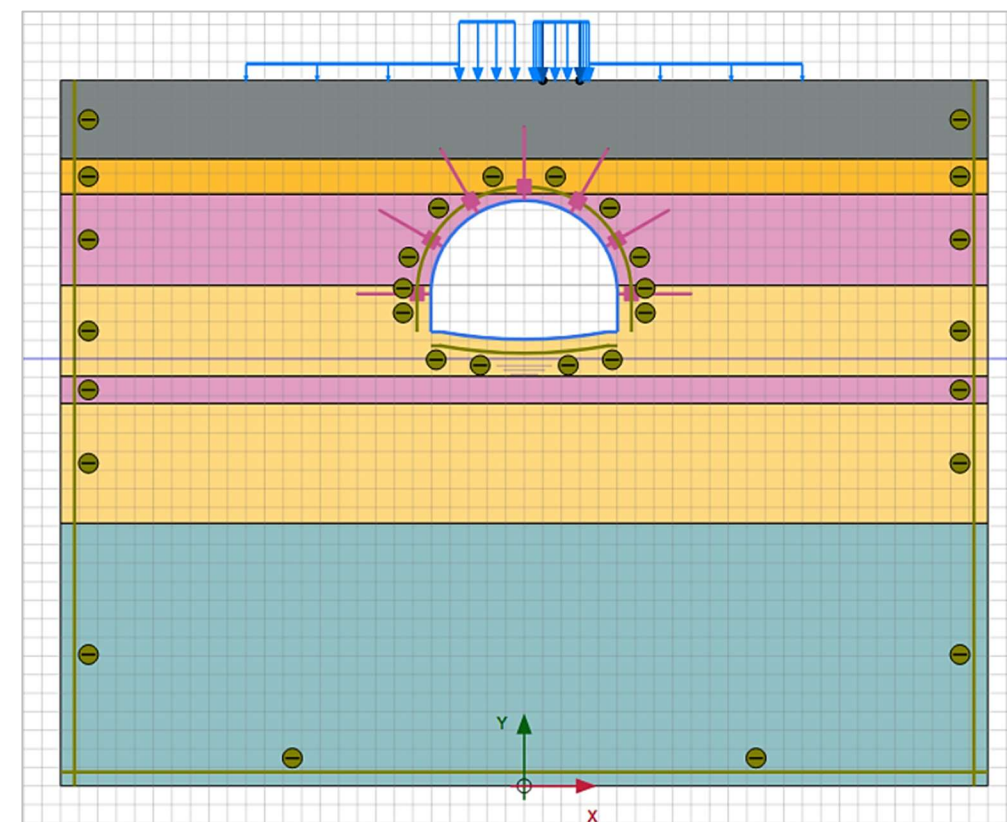


Figura 13. Modelo de cálculo del túnel. (Fuente: Elaboración propia)



Desde el punto de vista constructivo, hay que definir unas fases de diseño, para las cuales se han estudiado dos alternativas diferentes. En la primera de ellas se considera la excavación de la destroza como una única etapa y tiene las siguientes fases de ejecución:

- Fase 0. Fase inicial. Se considera el terreno en su estado natural.
- Fase 1. Excavación de la bóveda.
- Fase 2. Ejecución de la bóveda y su sostenimiento.
- Fase 3. Excavación de los hastiales y destroza.
- Fase 4. Ejecución de los hastiales y su sostenimiento.
- Fase 5. Hormigonado de la contrabóveda.

La segunda alternativa es plantear la excavación de la destroza en tres etapas: zona central, hastial izquierdo y hastial derecho:

- Fase 0. Fase inicial. Se considera el terreno en su estado natural.
- Fase 1. Excavación de la bóveda.
- Fase 2. Ejecución de la bóveda y su sostenimiento.
- Fase 3. Excavación zona central de la destroza.
- Fase 4. Excavación hastial izquierdo.
- Fase 5. Ejecución hastial izquierdo y su sostenimiento.
- Fase 6. Excavación hastial derecho.
- Fase 7. Ejecución hastial derecho y su sostenimiento.
- Fase 5. Hormigonado de la contrabóveda.

Esta se ajustaría en mayor medida al Método Belga, proceso de ejecución planteado en los capítulos anteriores.

### 6.2.3 Resultados

Al realizar el cálculo inicial considerando la geometría y las cargas introducidas, se comprueba con el software que el terreno no puede resistir las tensiones, alcanzando el colapso en la primera fase de cálculo.

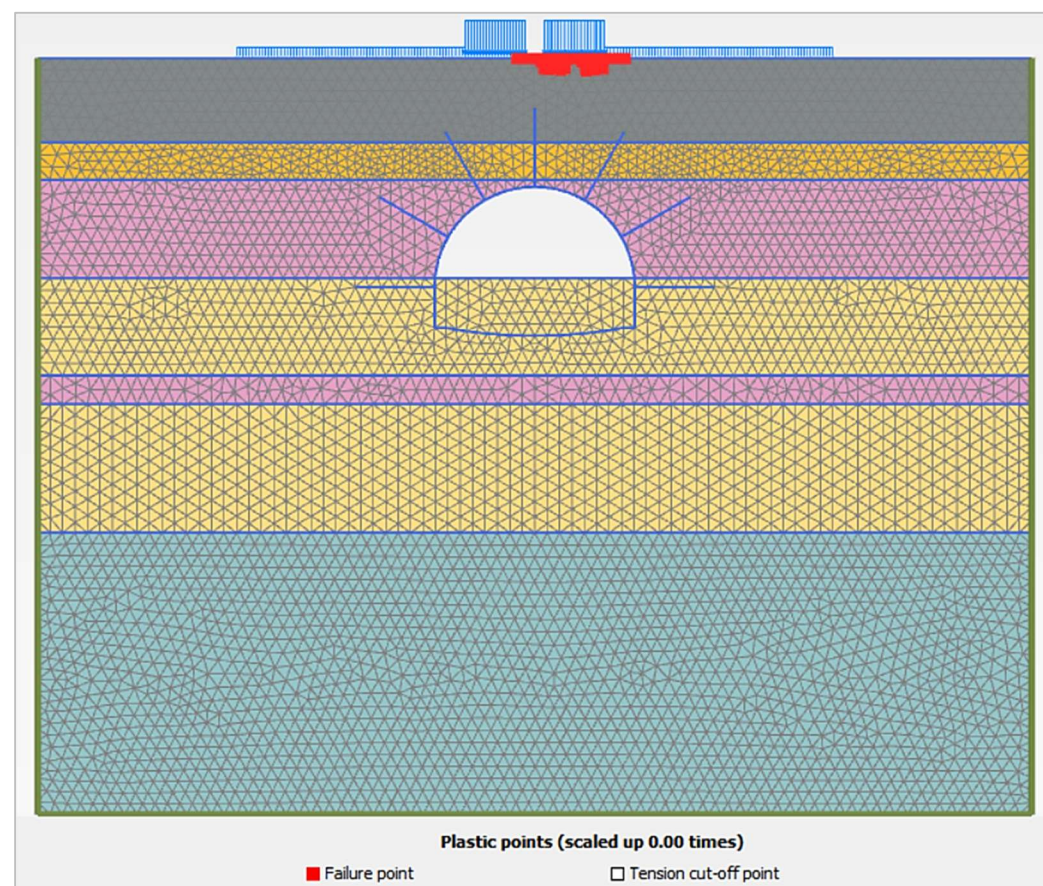


Figura 14. Puntos de plastificación y rotura del terreno en Fase 1. Excavación de la bóveda. (Fuente: Elaboración propia)

Por este motivo se han tomado algunas decisiones:

- Las cargas de tráfico descritas anteriormente se utilizan solo para el cálculo de la Fase 0. Fase inicial.
- Cortar el tráfico a los vehículos pesados durante el período de ejecución de la obra.
- Cortar el tráfico de los carriles centrales, uno a cada lado de la mediana. Estos soportaban una carga mayor de tráfico al ser considerados como los más desfavorables.

Se ejecutan de nuevo las fases de cálculo y los principales resultados que se obtienen son:

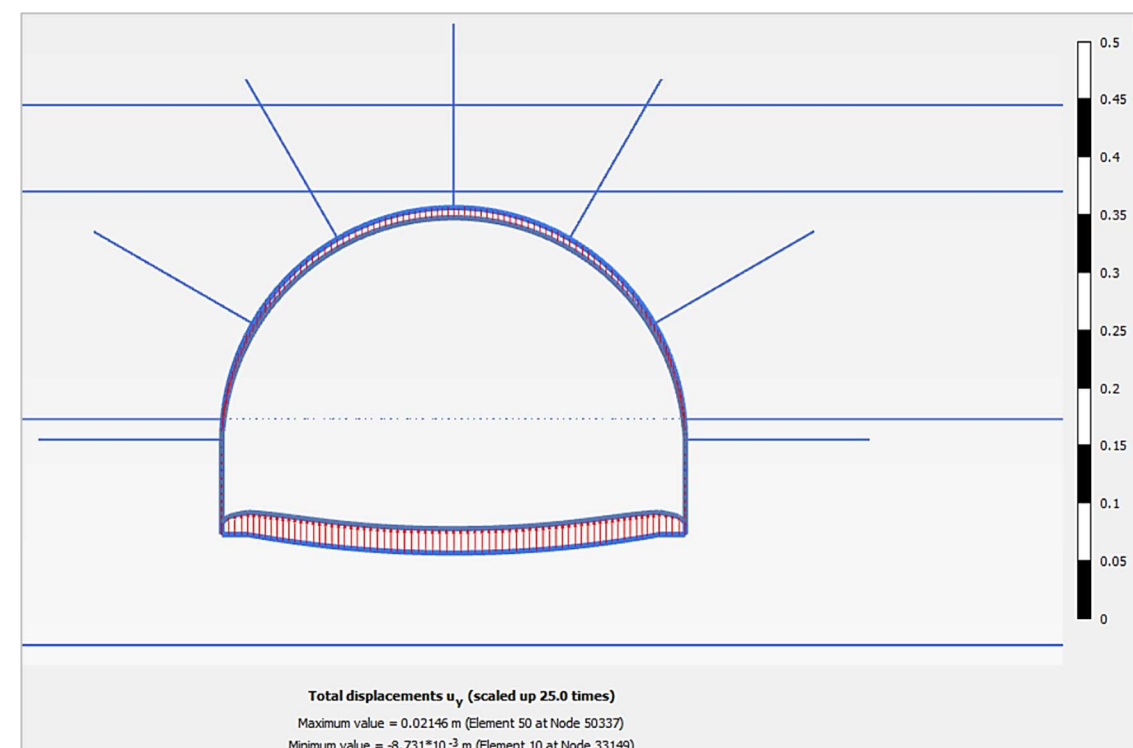


Figura 15. Convergencia de la sección. Excavación destroza completa (Fuente: Elaboración propia)

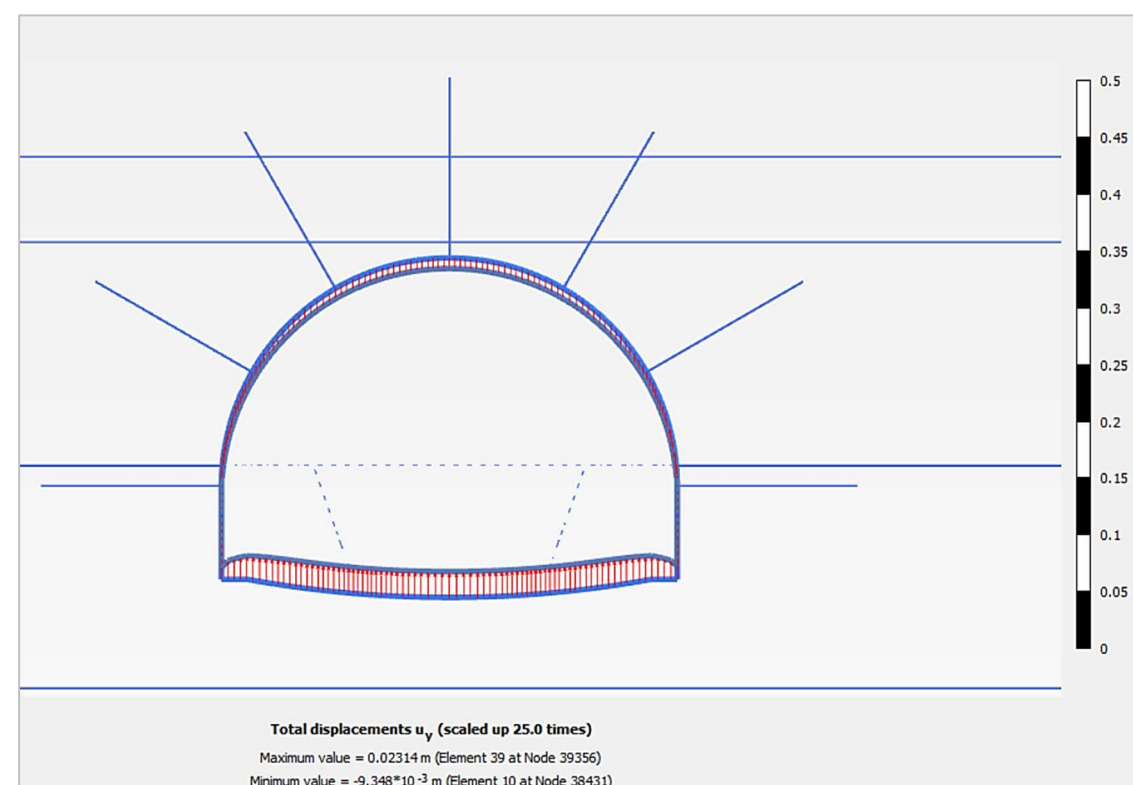


Figura 16. Convergencia de la sección. Excavación destroza por fases. (Fuente: Elaboración propia)

La convergencia total en el eje central de la sección sumando los desplazamientos de la clave y la contrabóveda es:

- Excavación destroza completa:  $convergencia = 29.7 \text{ mm}$
- Excavación destroza por fases:  $convergencia = 32.3 \text{ mm}$

En ambos casos el valor de la convergencia es similar.

Los valores de desplazamientos máximos se dan en la contrabóveda y estos son positivos, es decir, el terreno asciende. El levantamiento del fondo de la excavación se debe a la retirada de material que provoca la desaparición de parte de las tensiones geostáticas, lo que a su vez genera ese hinchamiento del terreno.

- Excavación destroza completa:  $u_{y,máx} = 0.02279 \text{ m} = 2.279 \text{ cm}$
- Excavación destroza por fases:  $u_{y,máx} = 0.02312 \text{ m} = 2.312 \text{ cm}$

Analizando los asentamientos en superficie, se observa cómo el mayor asiento se produce sobre la clave de la bóveda y para cada caso estudiado, se obtiene:

- Excavación destroza completa:  $u_{y,superficie} = -7.888 \cdot 10^{-3} \text{ m} = -7.9 \text{ mm}$
- Excavación destroza por fases:  $u_{y,superficie} = -8.488 \cdot 10^{-3} \text{ m} = -8.5 \text{ mm}$

Igualmente, el valor es parecido en las dos situaciones planteadas.

Estudiamos ahora las tensiones que van a producirse en el sostenimiento que se ha diseñado, se observan los siguientes valores:

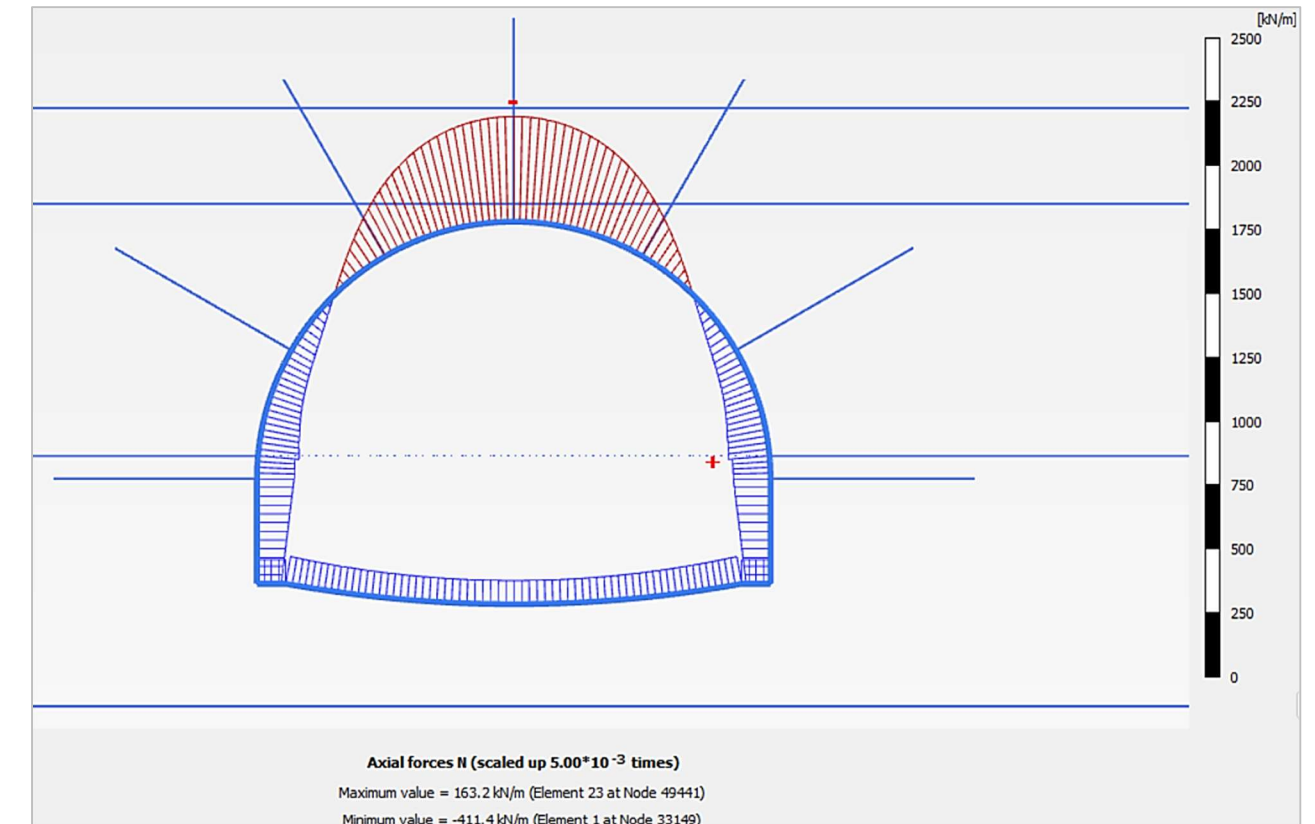


Figura 17. Esfuerzos axiales en la sección. Excavación destroza completa (Fuente: Elaboración propia)

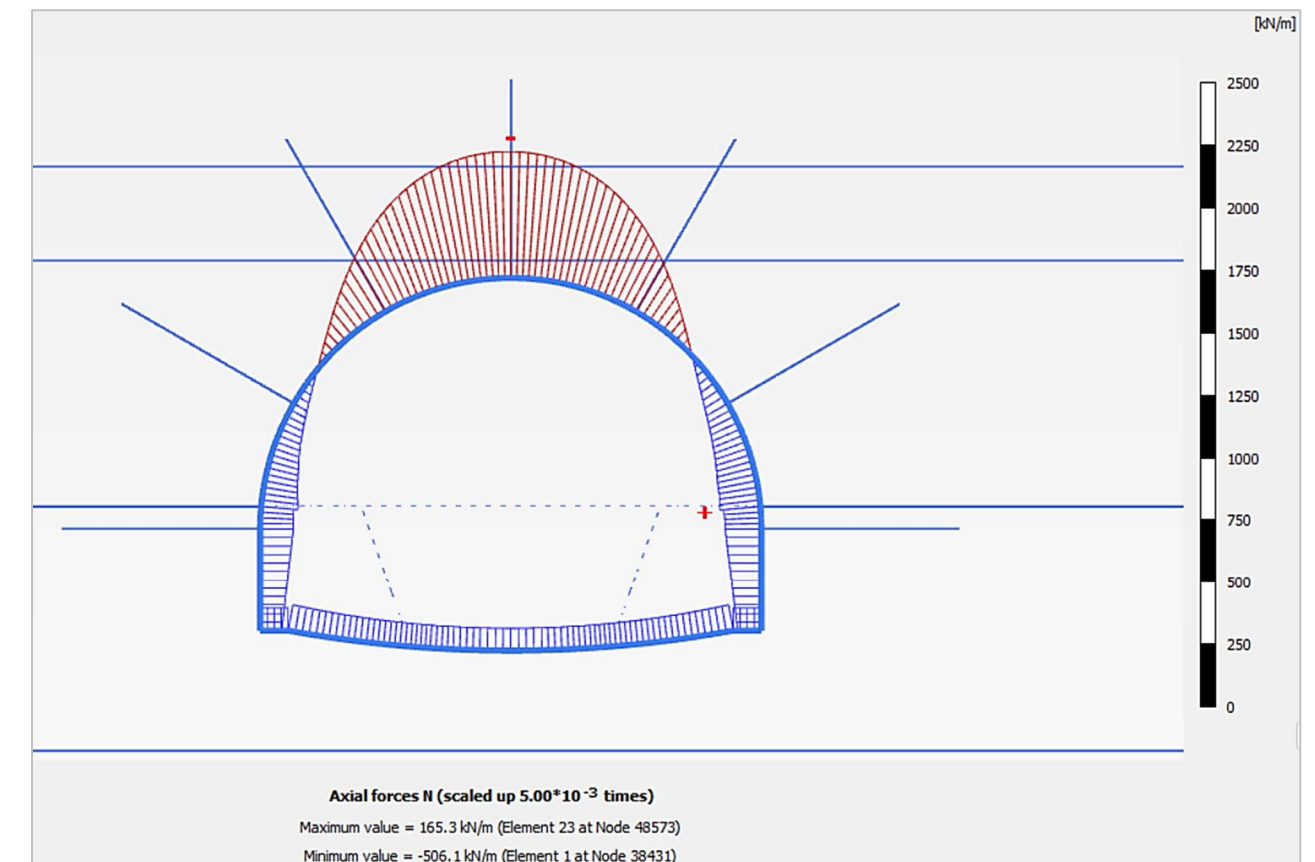


Figura 18. Esfuerzos axiales en la sección. Excavación destroza por fases. (Fuente: Elaboración propia)



Además, se pueden observar los momentos flectores que actuarán sobre el sostenimiento:

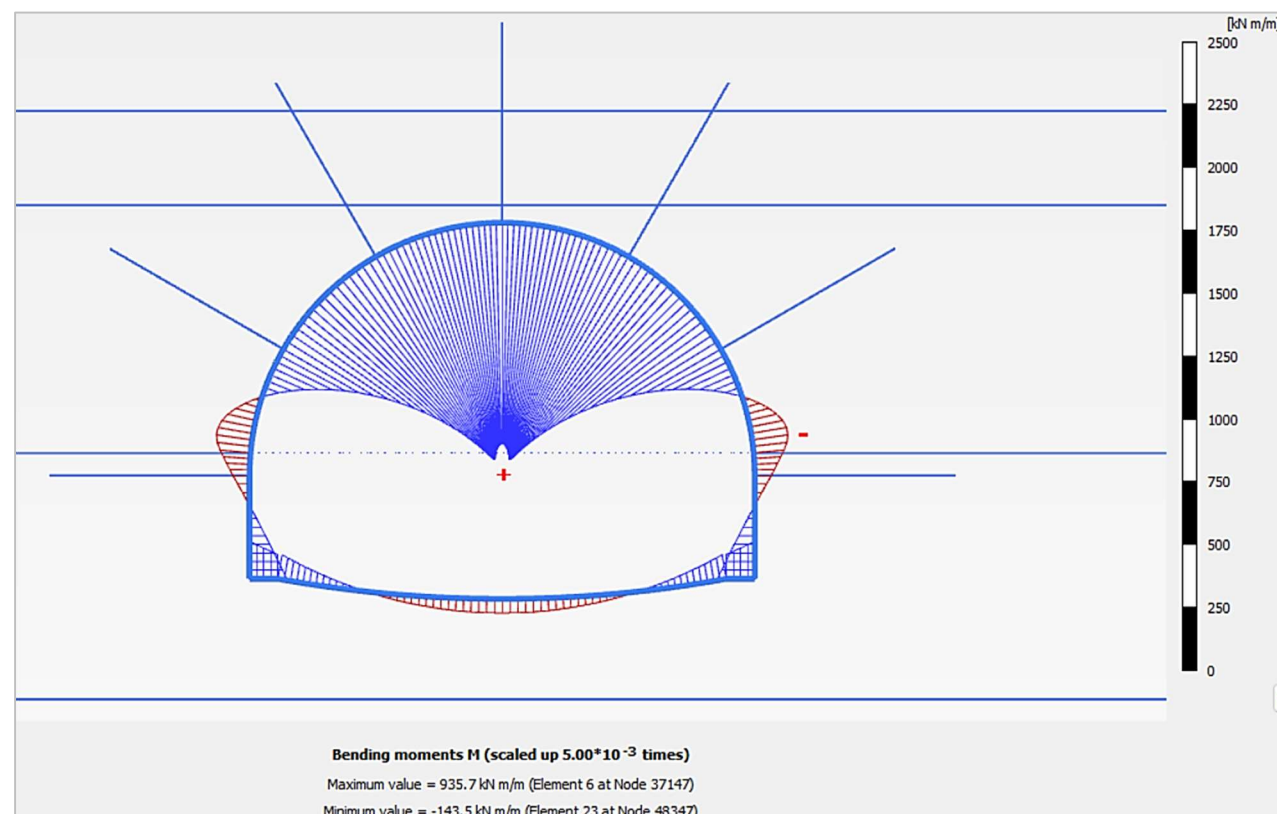


Figura 19. Momento flectores en la sección. Excavación destroza completa. (Fuente: Elaboración propia)

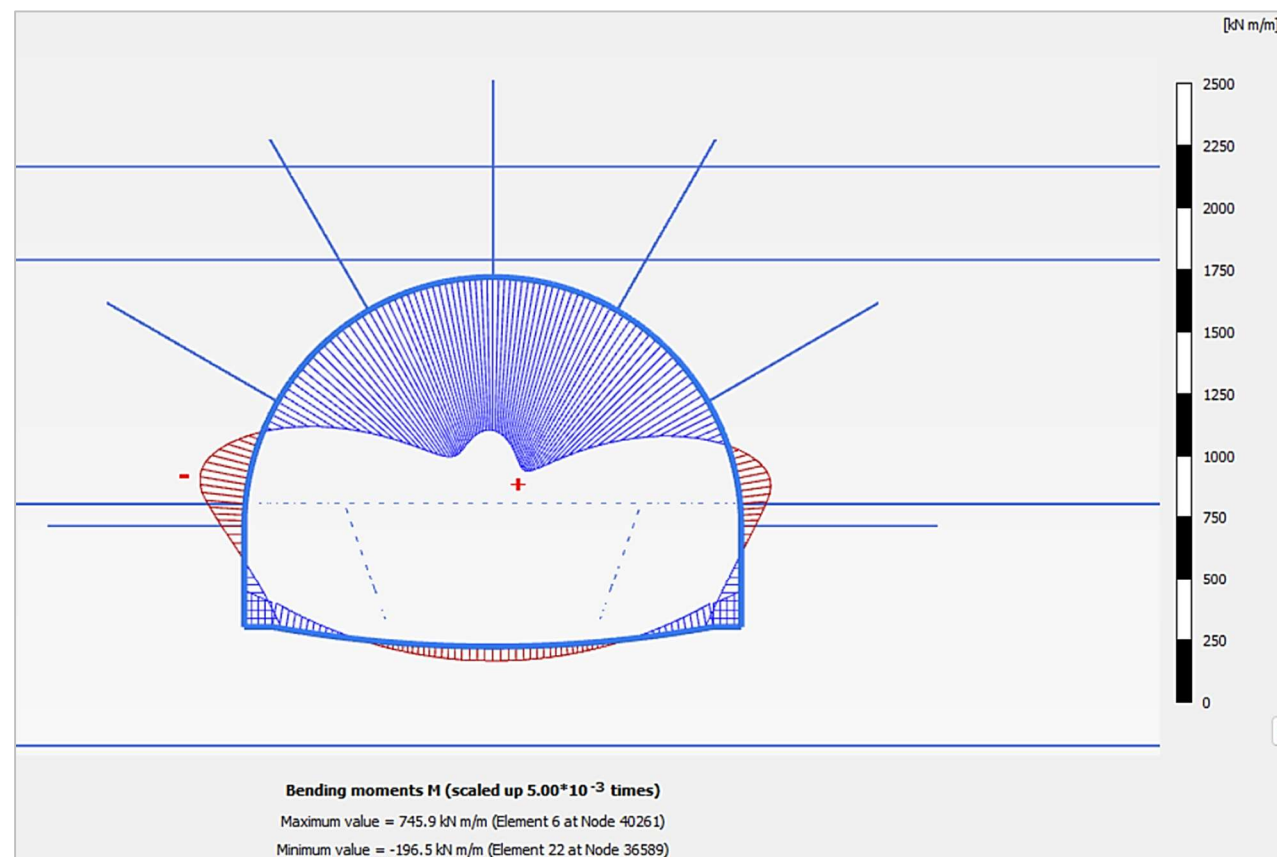


Figura 20. Momento flectores en la sección. Excavación destroza por fases. (Fuente: Elaboración propia)

Tabla 21. Esfuerzos máximos y mínimos en la sección. (Fuente: Elaboración propia)

Alternativa	$N_{m\acute{a}x}$ (kN)	$N_{m\acute{i}n}$ (kN)	$M_{m\acute{a}x}$ (kN · m)	$M_{m\acute{i}n}$ (kN · m)
Exc. Destroza completa	163.2	-411.4	935.7	-143.5
Exc. Destroza por fases	165.3	-506.1	745.9	-196.5

Todos los diagramas de convergencia y esfuerzos obtenidos a partir del análisis se presentan en el ANEXO 3: Comprobaciones geotécnicas de la solución adoptada.

### 6.2.4 Conclusiones del diseño geotécnico

Como conclusiones a estas comprobaciones geotécnicas:

- Los asentamientos en superficie serán mínimos. Esta es una cuestión importante ya que nos encontramos en un entorno urbano y cualquier asiento con valores alejados de lo adecuado puede afectar a las infraestructuras en superficie.
- La convergencia de la sección se encuentra en torno a los 3 cm y se debe fundamentalmente al asiento negativo que se produce en el fondo de la excavación, provocada por la eliminación de las presiones geostáticas. Para combatir este hinchamiento, si su valor fuese excesivo, se podrían disponer distintas soluciones como dar mayor curvatura la contrabóveda, colocar anclajes o el uso de apoyos deformables bajo la contrabóveda.
- Los esfuerzos que actúan son moderados, por lo que el sostenimiento diseñado con bulones es adecuado y garantiza la estabilidad de la estructura.

## 7 VALORACIÓN ECONÓMICA DE LA SOLUCIÓN

El resumen del presupuesto por capítulos se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 22. Resumen del presupuesto total por capítulos. (Fuente: Elaboración propia)

CAPÍTULO	Importe total (€)
Movimiento de tierras	245367.5
Obra civil	617325.898
Instalaciones de seguridad provisionales	2701.1
Servicios afectados	50000
Reurbanización	86572
Auscultación del túnel	3945.95
Seguridad y salud	63867
<b>TOTAL</b>	<b>1069779.448</b>

El desglose del presupuesto según las partidas de cada capítulo se muestra en el ANEXO 5: Valoración económica de la solución.

**Presupuesto total: 1 069 779.448 €**

## 8 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) se establecieron en 2015 con el propósito de poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. Como parte de la Agenda 2030 se aprobaron 17 Objetivos, de los cuales, 9 se califican como significativos para el sector de la construcción.

- ODS 3: Salud y bienestar.
- ODS 7: Energía asequible y no contaminante.
- ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico.
- ODS 9: Industria, innovación e infraestructura.
- ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles.
- ODS 12: Producción y consumo responsable.
- ODS 13: Acción por el clima.
- ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres.
- ODS 17: Alianzas para lograr los objetivos.

Para ilustrar la relación de los 17 Objetivos de desarrollo sostenible con el trabajo desarrollado en este TFM, se ha creado la siguiente tabla y, a continuación, se ha justificado esta relación.

Tabla 23. Relación del TFM con los ODS (Fuente: Elaboración propia)

Objetivos de desarrollo sostenible	Alto	Medio	Bajo	No procede
<b>ODS 1</b> Fin de la pobreza				X
<b>ODS 2</b> Hambre cero				X
<b>ODS 3</b> Salud y bienestar			X	
<b>ODS 4</b> Educación de calidad				X
<b>ODS 5</b> Igualdad de género				X
<b>ODS 6</b> Agua limpia y saneamiento				X
<b>ODS 7</b> Energía asequible y no contaminante			X	
<b>ODS 8</b> Trabajo decente y crecimiento económico		X		
<b>ODS 9</b> Industria, innovación e infraestructura	X			
<b>ODS 10</b> Reducción de las desigualdades				X
<b>ODS 11</b> Ciudades y comunidades sostenibles	X			
<b>ODS 12</b> Producción y consumo responsables		X		
<b>ODS 13</b> Acción por el clima			X	
<b>ODS 14</b> Vida submarina				X
<b>ODS 15</b> Vida de ecosistemas terrestres				X
<b>ODS 16</b> Paz, justicia e instituciones sólidas				X
<b>ODS 17</b> Alianzas para lograr los objetivos		X		

Se describe la alineación del TFM con los ODS con un grado de relación alta:

- ODS 9: Industria, innovación e infraestructura

Con su meta 9.1. “Desarrollar infraestructuras fiables, sostenibles, resilientes y de calidad, incluidas infraestructuras regionales y transfronterizas, para apoyar el desarrollo económico y el bienestar humano, haciendo especial hincapié en el acceso asequible y equitativo para todos”.

- ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles.

Relación fundamental con la meta 11.2 “De aquí a 2030, proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros, asequibles, accesibles y sostenibles para todos y mejorar la seguridad vial, en particular mediante la ampliación del transporte público, prestando especial atención a las necesidades de las personas en situación de vulnerabilidad, las mujeres, los niños, las personas con discapacidad y las personas de edad”, porque la nueva infraestructura pretende una ampliación de la oferta de transporte público en la ciudad de Alicante

## 9 CONCLUSIONES

A fin de resumir todo lo desarrollado durante el trabajo, se puntualizan las siguientes conclusiones:

- Se ha analizado toda la documentación disponible, desde los proyectos previos hasta los estudios geotécnicos aportados. En relación a esto, y para completar la información disponible, se propone:
  - Un sondeo mecánico para la extracción de, al menos, una muestra inalterada de cada unidad geotécnica.
  - Ensayos de laboratorio para contrastar y verificar la información sobre los valores de los parámetros.
    - Determinación de la humedad.
    - Determinación de la densidad seca y natural.
    - Resistencia a compresión simple.
    - Ángulo de rozamiento interno y cohesión efectivos y totales.
- Se ha realizado un estudio de alternativas con la comparación entre una solución de túnel entre pantallas frente a un túnel mediante excavación subterránea. Desde un punto de vista social, funcional, ambiental y económico se ha llegado a la conclusión de que la solución más adecuada era la ejecución del túnel subterráneo.
- Se propone entonces la ejecución mediante el método Belga, realizando las fases de excavación de la bóveda, hormigonado de la bóveda, excavación y entibación de hastiales por bataches, hormigonado de hastiales por bataches, excavación de la destroza y hormigonado de la contrabóveda.
- Se ha propuesto un procedimiento de excavación y sostenimiento para el tramo de túnel según las recomendaciones de M. Romana y el valor RMR del macizo rocoso:
  - El método de excavación se realizará mediante rozadora, con partición de la sección en bóveda y destroza, y una longitud de pase de 4 metros.
  - El método de sostenimiento que se propone es el hormigón proyectado con fibras con espesor de 4 cm más una capa de sellado, cerchas tipo TH-21/1.5 metros y bulonado con barras de acero corrugado B500S de  $\phi 25$  mm inyectado con mortero, con longitudes de bulón de 4 metros y espaciamientos en mallas de 1.5x1.5 metros entre ellos.
- Se ha realizado un análisis de tensiones y deformaciones del túnel mediante software Plaxis 2D, analizando dos alternativas en función de la secuencia de excavación:
  - Excavación de bóveda y destroza.
  - Excavación de bóveda, zona central de la destroza, hastial izquierdo y hastial derecho.

Durante el análisis, se toman decisiones como:

- Durante la excavación no debe permitirse el tránsito de vehículos pesados.
- Se interrumpe el tráfico a todos los vehículos en los dos carriles centrales de la zona de actuación.

Y se concluye que:

- Los asientos en superficie serán mínimos para las dos alternativas. Esta es una cuestión importante ya que nos encontramos en un entorno urbano y cualquier asiento con valores alejados de lo adecuado puede afectar a las infraestructuras en superficie.
- La convergencia de la sección se encuentra en torno a los 3 cm y se debe fundamentalmente al asiento negativo que se produce en el fondo de la excavación, provocada por la eliminación de las presiones geostáticas. Para combatir este hinchamiento, si su valor fuese excesivo, se podrían disponer distintas soluciones como dar mayor curvatura la contrabóveda, colocar anclajes o el uso de apoyos deformables bajo la contrabóveda.
- Los esfuerzos que actúan son moderados, por lo que el sostenimiento diseñado con bulones es adecuado y garantiza la estabilidad de la estructura.

- Respecto a los objetivos ODS aprobados para la Agenda 2030, las metas más significativas relacionadas con esta actuación son:
  - 9.1. “Desarrollar infraestructuras fiables, sostenibles, resilientes y de calidad, incluidas infraestructuras regionales y transfronterizas, para apoyar el desarrollo económico y el bienestar humano, haciendo especial hincapié en el acceso asequible y equitativo para todos”.
  - 11.2 “De aquí a 2030, proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros, asequibles, accesibles y sostenibles para todos y mejorar la seguridad vial, en particular mediante la ampliación del transporte público, prestando especial atención a las necesidades de las personas en situación de vulnerabilidad, las mujeres, los niños, las personas con discapacidad y las personas de edad”.
- Por todas las conclusiones anteriores, se determina que se han cumplido todos los objetivos presentados al inicio del trabajo, habiéndose obtenido una solución de actuación adecuada para problema que se planteaba.

Valencia, septiembre de 2022

Olga Provincial Gallardo

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] UTE PROYECTOS INFRAESTRUCTURAS TRAM LOTES 1 - 3, “Topografía y cartografía.”
- [2] “IVE \_ Instituto Valenciano de la Edificación.”
- [3] G. Técnica, I. Y. Auscultación, J. Tébar, M. Secretario, and J. O. Escobar, “GUIA TÉCNICA [INSTRUMENTACIÓN Y AUSCULTACIÓN EN EL PROYECTO Y CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES URBANOS [AETOS] | 2 DE TÚNELES URBANOS GRUPO DE TRABAJO 11-20 PROBLEMAS URBANOS. SOLUCIONES SUBTERRÁNEAS PRESIDENTE CARLOS OTEO MAZO.”
- [4] M. Romana Ruiz, “RECOMENDACIONES DE SOSTENIMIENTO PARA TÚNELES.” REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS, 2000.
- [5] ADIF, “NAP 2-3-1.0+M1 Túneles - ADIF”.
- [6] Diario Oficial de la Unión Europea, “REGLAMENTO (UE) N o 1303/2014 DE LA COMISIÓN.”
- [7] Ministerio de Fomento. Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria, *Instrucción Ferroviaria de Gálilos. Orden FOM 1630/2015, de 14 de julio.*
- [8] Ministerio de Fomento, “IAP-11 \_Instrucción sobre Acciones en Puentes”.
- [9] J. V. MARTÍ, F. GONZÁLEZ, and V. YEPES, *Temas de procedimientos de construcción. Métodos y equipos de excavación en túnel.* Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia. Ref. 2004.835. Valencia, 52 pp., 2004.
- [10] Ministerio de Fomento, *IOS98 \_Instrucción Obras Subterráneas.*
- [11] E. Dirección General de Carreteras, *Guía de Cimentaciones en Obras de Carretera.* 2009.