ANEJO 4.- SECCIÓN FUNCIONAL DE LOS TÚNELES

ÍNDICE

1. INTRODUCIÓN ... 1

2. REQUISITOS NORMATIVOS ... 1

2.1. GÁLIBO VERTICAL ... 1
2.2. ACERAS ... 1
2.3. ANCHURA DE LA CALZADA Y ARCENES ... 1
2.4. APARTADEROS ... 2
2.5. ELEMENTOS DE SEGURIDAD ... 2

3. DESCRIPCIÓN DE LAS SECCIONES FUNCIONALES CONSIDERADAS ... 3

3.1. SECCION DEL ESTUDIO DE ALTERNATIVAS ... 3
3.1.1. Sección del Estudio de Alternativas aplicable a terrenos normales ... 3
3.1.2. Sección del Estudio de Alternativas aplicable en tramos con fluencia del terreno ... 3
3.1.3. Sección del Estudio de Alternativas para los apartaderos ... 4
3.2. OPTIMIZACIÓN DE LA SECCIÓN DEL ESTUDIO DE ALTERNATIVAS ... 4
3.2.1. Sección PR1.1 ... 4
3.2.2. Sección PR1.2 ... 5
3.2.3. Sección PR1.3 ... 5
3.2.4. Sección PR1.4 ... 6
3.3. SECCION DE DOS CARRILES Y ARCENES DE 1,0 Y 3,0 M ... 6
3.3.1. Sección PR2.1 ... 7
3.3.2. Sección PR2.2 ... 7

4. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LAS SECCIONES FUNCIONALES ... 8

4.1. COMPORTAMIENTO ANTE LA FLUENCIA DE LAS PIZARRAS NEGRAS ... 8
4.1.1. Método de análisis ... 8
4.1.2. Sección prevista en el estudio de alternativas ... 10
4.1.3. Sección propuesta como optimización ... 10
4.1.4. Sección optimizada con apartadero ... 11
4.1.5. Sección de dos carriles con arcenes de 1,0 y 3,0 M ... 12
4.1.6. Comentarios sobre el comportamiento tenso-deformacional de las secciones propuestas ... 13
4.2. SOBRECOSTE PARA CONSTRUIR LOS TÚNELES CON UN ARCÉN DERECHO DE 3M ... 13
4.3. NIVEL DE SEGURIDAD DE LOS TÚNELES CON EL ARCÉN DERECHO DE 3 M ... 17
4.4. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS COMPARATIVO DE SECCIONES ... 18

5. SECCIONES FUNCIONALES PROPUESTAS PARA LOS TÚNELES DE BELATE Y ALMANDOZ 18

5.1. SECCIÓN FUNCIONAL SIN CONTRABÓVEDA ... 18
5.2. SECCIÓN FUNCIONAL CON CONTRABÓVEDA ... 19

1. INTRODUCIÓN

En el presente Anejo se definen las secciones funciones para los Túneles de Belate y Almandoz correspondientes al Proyecto de Trazado de la duplicación de los Túneles de Belate y Almandoz en la carretera N-121-A (Pamplona-Behobia).

Se ha analizado la normativa existente y se ha realizado un análisis comparativo de varias alternativas de secciones funcionales para los túneles, con el objeto de optimizar las soluciones previstas en el Estudio de Alternativas; resultado de ese análisis se han definido las secciones funcionales de los túneles que se proponen en este documento.

2. REQUISITOS NORMATIVOS

Entre los documentos normativos vigentes en la Comunidad Foral de Navarra consultados para la realización de este documento se encuentran los siguientes:

- Norma 3.1-IC de la Instrucción de Carreteras.
- Directiva 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de abril de 2004, sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras.

Además de estos dos documentos, se ha tenido en cuenta también el siguiente documento:

- Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carretera del Estado consolidado agosto 2009.

A continuación se hace un análisis de la normativa en relación al gálibo, las aceras, la anchura de la calzada y los arcenes, los apartaderos y los elementos de seguridad de los túneles.

2.1. GÁLIBO VERTICAL

El gálibo vertical es la altura libre mínima que queda por encima de la calzada y que debe ser al menos igual a la altura de diseño de los vehículos pesados autorizados a circular por la carretera, aumentada en el espacio que permita los movimientos del vehículo debidos a irregularidades de la calzada o del propio vehículo.

De acuerdo con el Apartado **“7.3.7 Altura Libre”** de la Instrucción de Carreteras. Norma 3.1-IC el gálibo mínimo de un túnel será de 5 metros en cualquier punto de la plataforma y de 2 metros en las aceras.

> *“En túneles, soterramientos y cubrimientos la altura libre en cualquier punto de la plataforma y en las zonas accesibles a los vehículos será mayor de cinco metros (≥ 5,00 metros). Sobre las aceras será suficiente una altura libre mayor o igual a dos metros (≥ 2,00 metros)”.*

Para el diseño de las secciones, se ha considerado un gálibo sobre la calzada de 5,5 m, debido a que por la carretera NA-121-A circulan numerosos camiones con cargas especiales.

2.2. ACERAS

Según se indica en el apartado **“7.4.1 Túneles, soterramientos y cubrimientos”** de la Instrucción de carreteras, Norma 3.1-IC” Los túneles dispondrán de aceras de setenta y cinco centímetros (75 cm) a ambos lados de la plataforma”.

> *“En los túneles nuevos sin carril de emergencia, se habilitarán aceras, preferentemente elevadas, para que los usuarios del túnel las empleen en caso de avería o accidente. Esto no será de aplicación cuando las características de la construcción del túnel no lo permitan o solo lo permitan con costes desproporcionados y cuando el túnel sea unidireccional y disponga de vigilancia permanente y de sistema de cierre de carriles”.*

De acuerdo a lo anterior, se van a considerar en las secciones funcionales se considera aceras a ambos lados de la calzada de 0,75 m.

2.3. ANCHURA DE LA CALZADA Y ARCENES

Según el Apartado **“7.4.1.2 Túneles, soterramientos y cubrimientos de longitud mayor o igual que doscientos metros (≥ 200 m)”**, de la Norma 3.1-IC de la Instrucción de Carreteras, las secciones que se adoptarán, para el caso de calzadas separadas, en cada una de las plataformas, en el caso de calzadas con dos carriles sin previsión de ampliación, serán las siguientes:

Según la normativa en el caso de una sección de dos carriles la calzada deberá estar constituida por:

> *“Arcén 1,00 m + 2 carriles de 3,50 m + Arcén 2,50 m = 10,50 m*
>
> *Para túneles en los que la velocidad está limitada o controlada mediante señalización variable, con tráfico poco intenso (saturación a más de 20 años) o en terrenos geológicamente desfavorables se podrá justificar la reducción a una sección más estricta no inferior a:*
>
> *Arcén 0,50 m + 2 carriles de 3,50 m + Arcén 1,00 m =8,50 m”*

Para los túneles de Belate y Almandoz, además de la solución presentada en el Estudio de Alternativas (que se denominará Sección EA), que cuenta con arcenes de 1,0 y 1,5 m, se analizan dos nuevas secciones con dos carriles cada una; la Sección Optimización de la Sección del EA (PR1), con arcenes de 1,0 y 1,5 m, y la Sección de arcenes 1,0 m y 3,0 m (PR2) con un arcén de 1,0 m en el lado izquierdo de la calzada y uno de 3 m en el lado derecho con el propósito de facilitar la atención de vehículos averiados en cualquier lugar de los túneles.

En el caso de la Sección EA y de la Sección PR1, la calzada tiene 9,5 m de ancho mientras que en el caso de la Sección PR2, la anchura de la calzada es de 11,0 m.

2.4. APARTADEROS

En cuanto a la necesidad de apartaderos en el interior de un túnel, la Directiva Europea 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del consejo de 29 de abril de 2004, en su **Apartado 2.5.3** dice que:

> *"Cuando las características de la construcción del túnel no lo permitan o solo lo permita con costes desproporcionados, no será necesario habilitar apartaderos si la anchura total del túnel accesible para vehículos, excluyendo las partes elevadas y los carriles normales de circulación, sea al menos igual a la anchura normal de un carril".*

Con lo cual, de las tres secciones que se van a analizar en este documento, solamente será necesario el diseño de apartaderos en las Secciones EA y PR1, ambas con arcenes de 1,0 y 1,5 m; ya que en estos casos el ancho de calzada, disponible para el acceso de vehículos, excluidos los carriles de circulación, será de 2,5 m, inferior a la anchura de un carril de circulación y por tanto insuficiente para evitar la necesidad de la ejecución de apartaderos.

En el caso de la Sección PR2 con arcenes de 1,0 y 3,0 m de anchura, el ancho de calzada excluidos los dos carriles de circulación sería de 4 metros; que es superior a la anchura de un carril de circulación de 3,5 m y por tanto no sería necesario la ejecución de estos apartaderos.

En cuanto a la geometría y características de los apartaderos en túneles de carretera, no existe una geometría definida para su diseño, por lo que se ha considerado una anchura de apartadero de 3 metros, con lo cual, para las Secciones EA y PR1, resulta una calzada de:

Arcén 1,0 m + 2 carriles de 3,5 m + Arcén 1,5 m + Apartadero 3,0 m = 12,5 m

Que, junto con las aceras de 0,75 metros dispuestas a cada uno de los lados, da una anchura total de 14,0 m.

2.5. ELEMENTOS DE SEGURIDAD

Para la definición de los criterios de seguridad a seguir en el caso de los túneles, se ha tomado como referencia la Directiva Europea 2004/54/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de abril de 2004, sobre "Requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras"; No obstante, se han analizado también los requisitos exigidos por el RD 635/2006 para los túneles unidireccionales con una longitud superior a los 1000 metros, que son los que se relacionan a continuación:

- Aceras.
- Salidas de emergencia.
- Conexiones transversales para accesos de los servicios de emergencia.
- Cruce de la mediana fuera de cada boca.
- Apartaderos.
- Drenaje de líquidos tóxicos.
- Centro de control.
- Circuito cerrado de televisión.
- Sistema informático de extracción de humos automático y manual.
- Iluminación normal.
- Iluminación de seguridad.
- Iluminación de emergencia.
- Ventilación.
- Doble suministro eléctrico.
- Generadores de emergencia.
- Sistema de alimentación ininterrumpida (SAI).
- Detectores de CO.
- Opacímetros.
- Cable de detección de incendios.
- Detección automática de incidentes.
- Puesto de emergencia.
- Señalización de salidas y equipamientos de emergencia.
- Señalización según la Norma 8.1 y 8.2 IC.
- Paneles de señalización variables.
- Barras exteriores.
- Semáforos exteriores.
- Semáforos interiores (si el tubo mide igual o más de 3000m).
- Megafonía.
- Red de hidrantes.
- Aforadores.
- Sistema de radiocomunicación para servicios de emergencia.
- Mensajería de emergencia por canales de radio para usuarios.

Los requisitos anteriores han sido tenidos en cuenta en las secciones funcionales analizadas.

3. DESCRIPCIÓN DE LAS SECCIONES FUNCIONALES CONSIDERADAS

En este apartado se describen las secciones correspondientes a las tres secciones funcionales analizadas para los túneles de Belate y Almandoz.

3.1. SECCION DEL ESTUDIO DE ALTERNATIVAS

Esta sección, es la presentada en el *"Estudio de alternativas para la duplicación de los túneles de Belate y Almandoz en la carretera N-121-A (Pamplona-Behobia)"*, y consiste en una bóveda de radio único, con dos carriles de 3,5 m de ancho cada uno y un arcén de 1,0 m a la izquierda de la calzada y de 1,5 m a la derecha.

En el Estudio de Alternativas se presentaron dos secciones, con y sin contrabóveda, para su utilización en función de la calidad del terreno atravesado:

- **Sección EA1:** Sección del estudio de Alternativas aplicable a terrenos normales.
- **Sección EA2:** Sección del Estudio de Alternativas aplicable en tramos con fluencia del terreno.

A continuación, se presenta una descripción de las dos secciones indicadas.

3.1.1. Sección del Estudio de Alternativas aplicable a terrenos normales

En la **Figura 3.1.1.a** se presenta la Sección EA1, aplicable a terrenos normales, para los túneles de Belate y Almandoz y presentada en el *"Estudio de alternativas para la duplicación de los túneles de Belate y Almandoz en la carretera N-121-A (Pamplona-Behobia)"*.

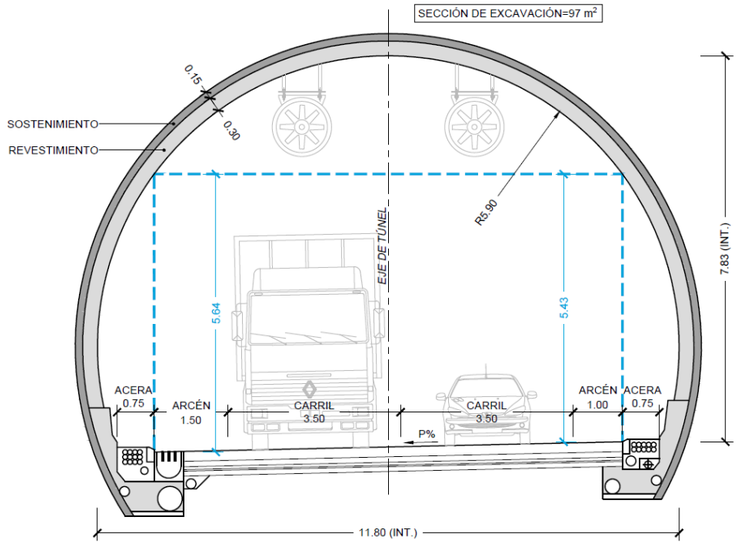


Figura 3.1.1.a.- Definición geométrica de la sección del Estudio de Alternativas aplicable a terrenos normales (Sección EA1).

Las características geométricas que definen la Sección EA1 son las siguientes:

- Dos carriles de 3,5 m de anchura cada uno de ellos
- Dos arcenes de 1,5 m en el lado derecho y de 1,0 m en el lado izquierdo.
- Ancho de calzada de 9,5 metros
- A ambos lados de la calzada existen dos aceras de 0,75 metros cada una.
- El gálibo disponible es de 5,50 m en la en la parte central de la sección.
- La sección interior del túnel presenta una bóveda de sección circular con un arco de radio interior único R=5,90 m, cuyo centro está situado en el eje del túnel 2,04 m metros por encima de la calzada.
- La sección de excavación es de 97 m^2.

3.1.2. Sección del Estudio de Alternativas aplicable en tramos con fluencia del terreno

En la **Figura 3.1.2.a** se presenta la Sección EA2, para su aplicación en aquellos tramos con fluencia en el terreno, diseñada para los túneles de Belate y Almandoz y presentada en el *"Estudio de alternativas para la duplicación de los túneles de Belate y Almandoz en la carretera N-121-A (Pamplona-Behobia)"*.

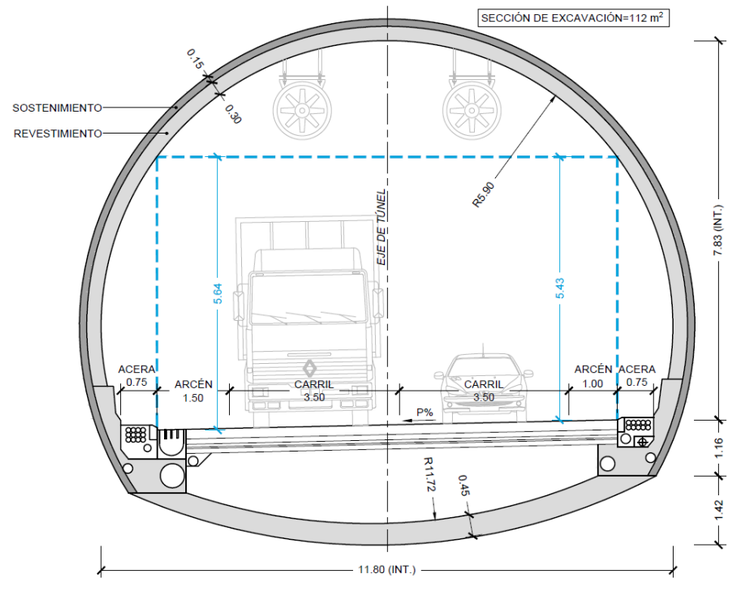


Figura 3.1.2.a.- Definición geométrica de la sección del Estudio de Alternativas aplicable en tramos con fluencia del terreno (Sección EA2).

Las características geométricas que definen esta sección tipo son las siguientes:

- Dos carriles de 3,5 m de anchura cada uno de ellos.
- Dos arcenes de 1,5 m en el lado derecho y de 1,0 m en el lado izquierdo.
- El ancho de calzada de 9,5 metros.
- Dispone de dos aceras a ambos lados de la calzada de 0,75 metros cada una.
- Cuenta con un gálibo de 5,50 m en la en la parte central de la sección.
- La sección interior del túnel presenta una bóveda de sección circular con un arco de radio interior único R=5,90 m, cuyo centro está situado en el eje del túnel 2,04 m metros por encima de la calzada.
- En la parte inferior dispone de una contrabóveda curva con un radio interior de 11,72 m y un espesor de 45 cm.

Con estas características, la sección de excavación es de 112 m^2.

3.1.3. Sección del Estudio de Alternativas para los apartaderos

En el Estudio de Alternativas, aunque se tenía en cuenta la construcción de apartaderos, no se definió sección alguna con apartadero.

3.2. OPTIMIZACIÓN DE LA SECCIÓN DEL ESTUDIO DE ALTERNATIVAS

Para optimizar la sección del Estudio de Alternativas, se ha rediseñado la excavación con una bóveda definida por tres arcos, con el fin de reducir al máximo el área de excavación, y se han definido los hastiales con una pared recta con una inclinación respecto a la vertical de 5º; lo cual facilita su construcción. Además, se ha diseñado un sistema separativo para la evacuación de los vertidos en la calzada y para las aguas de infiltración, pues en el Estudio de Alternativas los vertidos en la calzada y las aguas de infiltración confluyen a un único colector.

Esta optimización se concreta en las cuatro secciones siguientes:

- **Sección PR1.1**: Aplicable a terrenos normales.
- **Sección PR1.2**: Aplicable en tramos con fluencia del terreno.
- **Sección PR1.3**: Con apartadero y aplicable a terrenos normales.
- **Sección PR1.4**: Con apartadero y aplicable en tramos con fluencia del terreno.

De la misma forma que en el apartado anterior, a continuación, se presentan estas secciones.

3.2.1. Sección PR1.1

La Sección PR1.1, aplicable a terrenos normales, está definida en la **Figura 3.2.1.a.**

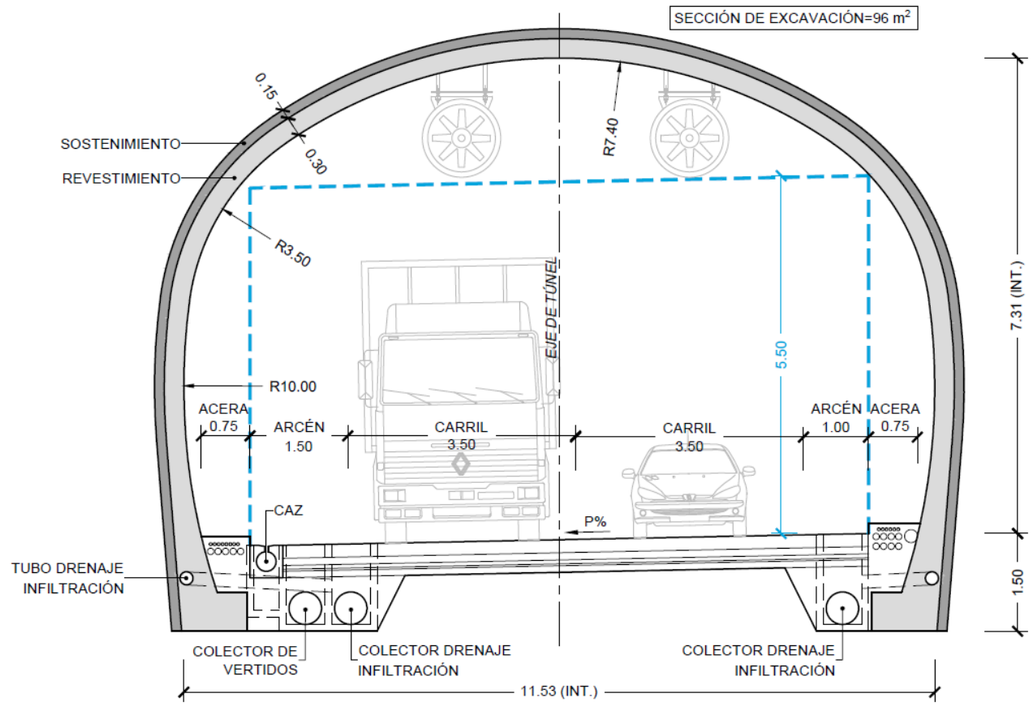


Figura 3.2.1.a.- Definición geométrica de la Sección PR1.1 aplicable a terrenos normales.

Las características geométricas que definen esta sección tipo son las siguientes:

- Dos carriles de 3,5 m de anchura cada uno de ellos.
- Arcén de 1,5 m en el lado derecho y otro de 1,0 m en el lado izquierdo.
- En conjunto se dispone de un ancho de calzada de 9,5 metros.
- A ambos lados de la calzada existen dos aceras de 0,75 metros cada una.
- Se dispone de un gálibo de 5,5 m.
- La sección interior de la bóveda del túnel está constituida por tres arcos, un arco central que define la clave de la bóveda con un radio de 7,40 metros, y dos radios laterales que abarcan los hombros de la bóveda con un radio interior R=3,50 m.
- Los hastiales del túnel presentan una cara interior de forma circular con un radio R= 10 m, mientras que la cara exterior de los hastiales es recta con una inclinación con respecto a la vertical de 5º.
- La sección de excavación es de 96 m^2.

Esta propuesta solo consigue disminuir la sección a excavar respecto a la Sección EA1 en 1 m^2, pues parte de lo que se gana con la bóveda de tres arcos debe compensar la mejor extracción del sistema de colectores separativos. La disminución conseguida supone el 1% de la excavación prevista en el Estudio de Alternativas.

3.2.2. Sección PR1.2

La Sección PR1.2, aplicable en tramos con fluencia del terreno, se define en la **Figura 3.2.2.a.**

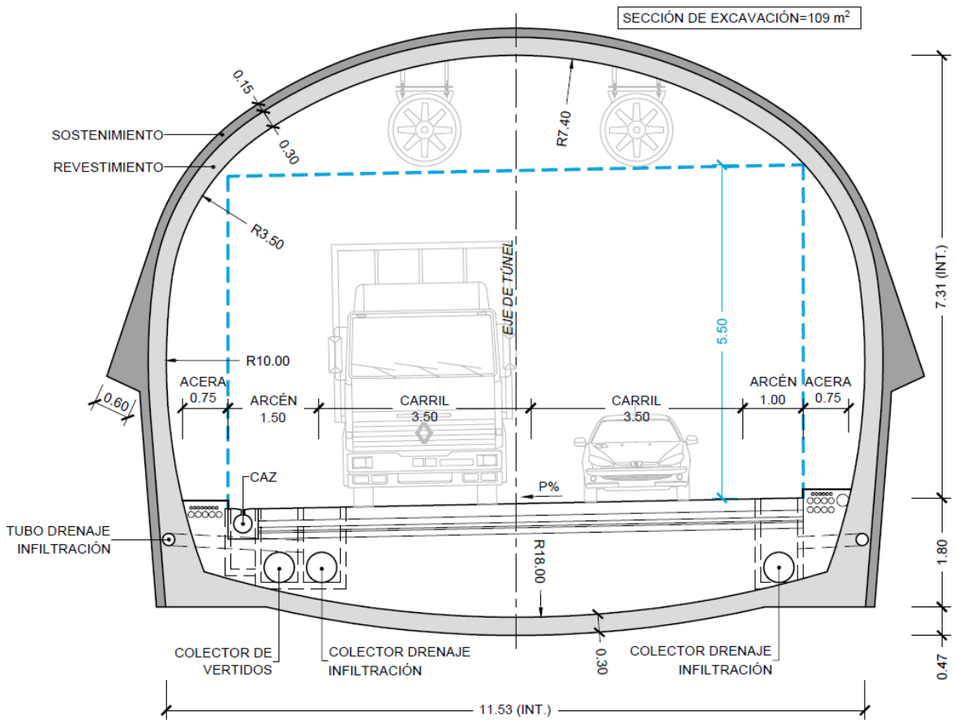


Figura 3.2.2.a.- Definición geométrica de la Sección PR1.2 aplicable en tramos con fluencia del terreno.

Las características geométricas que definen esta sección tipo son las siguientes:

- Dos carriles de 3,5 m de anchura cada uno de ellos.
- Arcenes de 1,5 m en el lado derecho y de 1,0 m en el lado izquierdo.
- El ancho de calzada de 9,5 metros.
- Existen de dos aceras a ambos lados de la calzada de 0,75 metros cada una.
- Se dispone de un gálibo de 5,5 m.
- La sección interior de la bóveda del túnel está constituida por tres arcos, un arco central que define la clave de la bóveda con un radio de 7,40 metros, y dos radios laterales que abarcan los hombros de la bóveda con un radio interior R=3,50 m.
- Además, se han dispuesto, a ambos lados de la sección de avance, una pequeña pata de elefante con un ancho de la zona de apoyo de 0,6 metros, con el objeto de evitar, durante la ejecución de la fase de avance de los túneles, el proceso de hincamiento del sostenimiento en el terreno, como consecuencia de su mala calidad y reducir así los desplazamientos sufridos por el terreno.
- Los hastiales del túnel presentan una cara interior de forma circular con un radio R= 10 m, mientras que la cara exterior de los hastiales es recta con una inclinación con respecto a la vertical de 5º.
- En la parte inferior dispone de una contrabóveda curva con un radio interior de 18,0 m y un espesor de 30 cm
- La sección de excavación es de 109 m^2.
- Además se ha aligerado el espesor de la contrabóveda, pasando de 45 cm a 30 cm.

Esta propuesta supone disminuir en 3 m^2 la sección a excavar respecto a la sección incluida en el Estudio de Alternativas (EA2), presentada en el Apartado 3.1.2; lo cual supone un 2,7%.

3.2.3. Sección PR1.3

En la Figura **3.2.3.a** se presenta la Sección PR1.3 con apartadero y aplicable a terrenos normales.

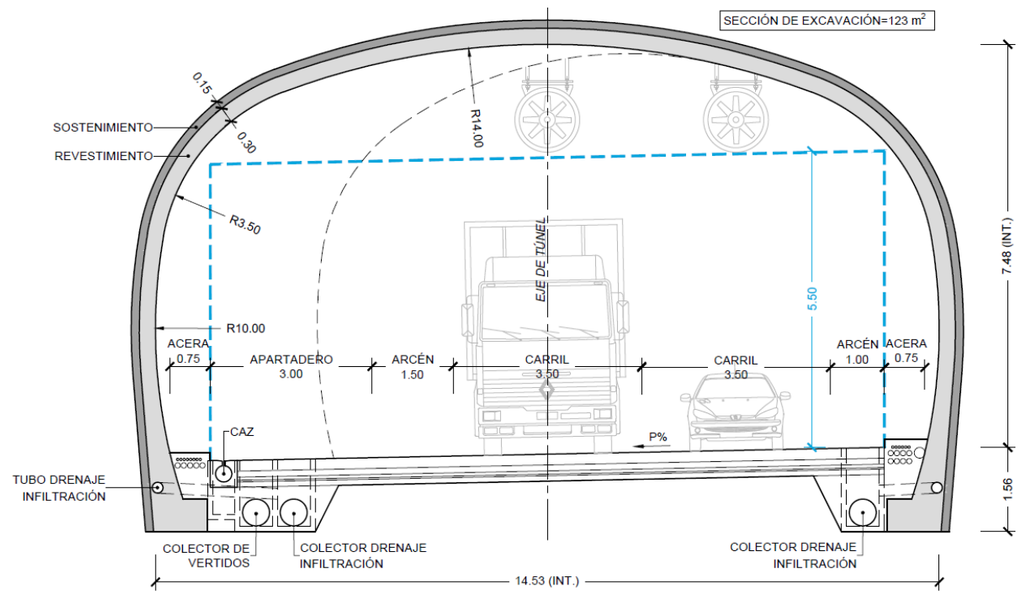


Figura 3.2.3.a.- Definición geométrica de la Sección PR1.3 con apartadero y aplicable a terrenos normales.

Las características geométricas que definen esta sección tipo son las siguientes:

- Dos carriles de 3,5 m de anchura cada uno de ellos.
- Arcén de 1,5 m en el lado derecho y otro de 1,0 m en el lado izquierdo.
- Dispone de un apartadero de 3,0 m de ancho en el lado derecho de la calzada.
- Cuenta con un ancho de calzada de 12,5 metros.
- A ambos lados de la calzada existen dos aceras de 0,75 metros cada una.
- Se dispone de un gálibo de 5,5 m.
- La sección interior de la bóveda del túnel está constituida por tres arcos, un arco central que define la clave de la bóveda con un radio de 14,0 metros, y dos radios laterales que abarcan los hombros de la bóveda con un radio interior R=3,50 m.
- Los hastiales del túnel presentan una cara interior de forma circular con un radio R= 10 m, , mientras que la cara exterior de los hastiales es recta con una inclinación con respecto a la vertical de 5º.
- La sección de excavación es de 123 m^2.

Esta sección no se puede comparar con la correspondiente al Estudio de Alternativas; pues en éste no estaba definida.

3.2.4. Sección PR1.4

La sección PR1.4, con apartadero y aplicable en tramos con fluencia del terreno se define en la **Figura 3.2.4.a.**

Las características geométricas que definen esta sección tipo son las siguientes:

- Dos carriles de 3,5 m de anchura cada uno de ellos.
- Arcén de 1,5 m en el lado derecho y otro de 1,0 m en el lado izquierdo.
- Dispone de un apartadero de 3,0 m de ancho en el lado derecho de la calzada.
- En conjunto se dispone de un ancho de calzada de 12,5 metros.
- A ambos lados de la calzada existen dos aceras de 0,75 metros cada una.
- Se dispone de un gálibo de 5,5 m.
- La sección interior de la bóveda del túnel está constituida por tres arcos, un arco central que define la clave de la bóveda con un radio de 14,0 metros, y dos radios laterales que abarcan los hombros de la bóveda con un radio interior R=3,50 m.

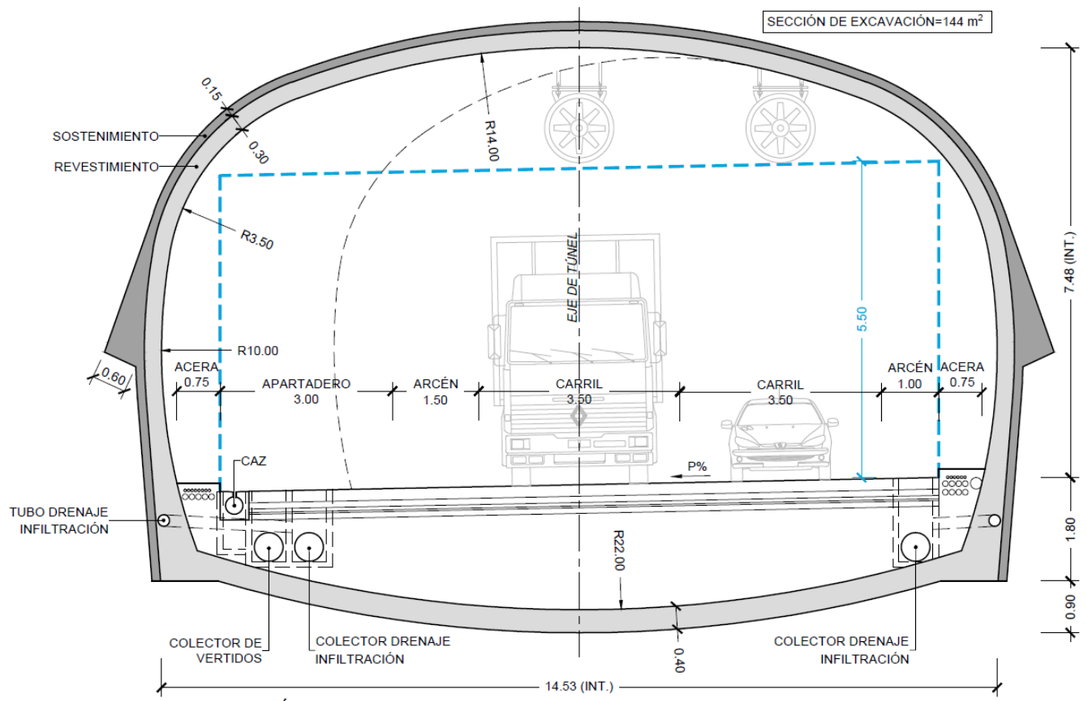


Figura 3.2.4.a.- Definición geométrica de la Sección PR1.4 con apartadero y aplicable en tramos con fluencia en el terreno.

- Los hastiales del túnel presentan una cara interior de forma circular con un radio R= 10 m, mientras que la cara exterior de los hastiales es recta con una inclinación con respecto a la vertical de 5º.
- En la parte inferior dispone de una contrabóveda curva con un radio interior de 18,0 m y un espesor de 40 cm.
- Con estas características, la sección de excavación es de 144 m^2.

Esta sección tampoco se puede comparar con la homologa del Estudio de Alternativas; pues, en ese documento no fue definida.

3.3. SECCION DE DOS CARRILES Y ARCENES DE 1,0 Y 3,0 M

Además de los dos grupos de alternativas de sección presentadas en los apartados anteriores, con arcenes de 1,5 m en el lado derecho y otro de 1,0 m en el lado izquierdo, se ha diseñado un tercer grupo de alternativas con un arcén de 1,0 m de ancho en el lado izquierdo de la calzada y otro de 3,0 m de ancho en el lado derecho.

De este modo se consigue una anchura de túnel accesible a los vehículos, una vez excluidas las partes elevadas y los carriles de normales de circulación, de 4 metros, que al ser superior a la anchura de un carril de circulación, tal y como se indica en el Apartado 2.4 permitiría prescindir de los apartaderos, disponiendo de un arcén de 3,0 m de ancho en el lado derecho de la calzada a lo largo de todo el túnel, en el que será posible el estacionamiento de cualquier vehículo, en el caso de ser necesario.

Para esta alternativa, al no ser necesario la ejecución de apartaderos, se presentan únicamente dos secciones con y sin contrabóveda, que se denominarán PR2.1 en el caso general y PR2.2 con contrabóveda.

En los siguientes apartados se realiza una descripción detallada de cada una de estas secciones.

3.3.1. Sección PR2.1

La sección PR2.1, **Figura 3.3.1.a,** tiene las características que se indican a continuación.

Figura 3.3.1.a.- Definición geométrica con arcén a la derecha de 3 m.

Las características geométricas que definen esta sección tipo son las siguientes:

- Sección de dos carriles de 3,5 m de anchura cada uno de ellos.
- Presenta un arcén de 3,0 m en el lado derecho y otro de 1,0 m en el lado izquierdo.
- Dispone de un ancho de calzada de 11,0 metros.
- A ambos lados de la calzada existen dos aceras de 0,75 metros cada una.
- Se dispone de un gálibo de 5,5 m.
- La sección interior de la bóveda del túnel está constituida por tres arcos, un arco central que define la clave de la bóveda con un radio de 10,0 metros, y dos radios laterales que abarcan los hombros de la bóveda con un radio interior R=3,50 m.
- Los hastiales del túnel presentan una cara interior de forma circular con un radio R= 10 m, , mientras que la cara exterior de los hastiales es recta con una inclinación con respecto a la vertical de 5º.
- Con estas características, la sección de excavación es de 108 m^2.

El incremento de excavación que supone esta sección respecto a su homóloga del Estudio de Alternativas (EA1), definida en el Apartado 3.1.1, es de 11 m^2; es decir, el 11,3%.

3.3.2. Sección PR2.2

En la **Figura 3.3.2.**a se presenta la Sección PR2.2, aplicable en tramos con fluencia del terreno, que tiene las características que se indican a continuación.

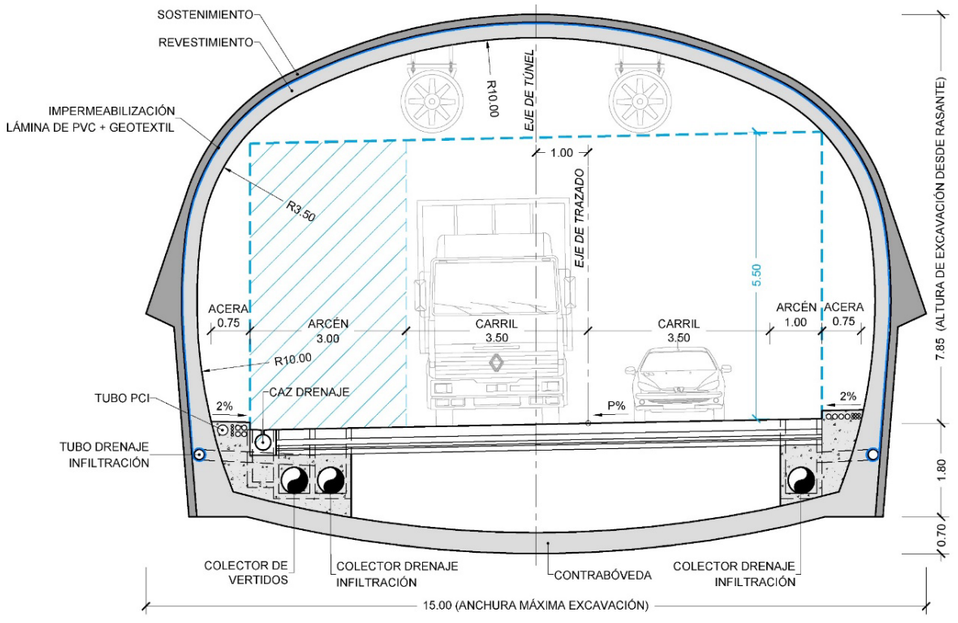


Figura 3.3.2.a.- Definición geométrica de la Sección con arcén a la derecha de 3 m y contrabóveda.

Las características geométricas que definen esta sección tipo son las siguientes:

- Dos carriles de 3,5 m de anchura cada uno de ellos.
- Arcén de 3,0 m en el lado derecho y otro de 1,0 m en el lado izquierdo.
- Ancho de calzada de 11,0 metros.
- A ambos lados de la calzada existen dos aceras de 0,75 metros cada una.
- Se dispone de un gálibo de 5,5 m.
- La sección interior de la bóveda del túnel está constituida por tres arcos, un arco central que define la clave de la bóveda con un radio de 10,0 metros, y dos radios laterales que abarcan los hombros de la bóveda con un radio interior R=3,50 m.
- Los hastiales del túnel presentan una cara interior de forma circular con un radio R= 10 m, mientras que la cara exterior de los hastiales es recta con una inclinación con respecto a la vertical de 5º.
- En la parte inferior dispone de una contrabóveda curva con un radio interior de 22,0 m y un espesor de 40 cm
- Con estas características, la sección de excavación de 126 m^2.

Esta propuesta supone un incremento de excavación de 14 m^2 respecto a la Sección del Estudio de Alternativas (EA2), que está definida en el Apartado 3.2.2.

Este incremento de excavación supone el 12,5% de la sección del Estudio de Alternativas.

4. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LAS SECCIONES FUNCIONALES

En los siguientes apartados se van a analizar diferentes aspectos de las secciones funcionales consideradas para los Túneles de Belate y Almandoz.

4.1. COMPORTAMIENTO ANTE LA FLUENCIA DE LAS PIZARRAS NEGRAS

En el Túnel de Belate se produjeron importantes problemas de estabilidad en el tramo excavado en pizarras negras, debido al fenómeno de fluencia al que se vio sometido este terreno; para lo cual no se diseñó un sostenimiento adecuado.

En el Estudio de Alternativas se ha definido una sección con contrabóveda para ser aplicada en los terrenos de peor comportamiento: en concreto en el tramo excavado con pizarras negras. En el Apartado 3.1.2 se indican las características de esta sección.

Se va a analizar el comportamiento de las secciones indicadas en apartados anteriores con contrabóveda ante los terrenos de peor calidad existentes en los túneles; que como se ha indicado es el tramo en pizarras negras del Túnel de Belate II.

De acuerdo con lo anterior, en este apartado se analiza el comportamiento de la solución del Estudio de Alternativas y de las soluciones alternativas en el Tramo del Túnel Belate II excavado en pizarras negras; que, de acuerdo con el perfil longitudinal del Túnel Belate II, que se muestra en la **Figura 4.1.a,** estará comprendido entre el PK. 1+650 y el PK 2+090.

En los apartados siguientes se presenta el método de análisis y los resultados obtenidos.

4.1.1. Método de análisis

El método de análisis que se ha empleado consiste en calcular el comportamiento tenso-deformacional de la sección incluida en el Estudio de Alternativas y las dos propuestas estudiadas.

Para realizar estos cálculos se ha confeccionado para cada una de las tres secciones, un modelo de elementos finitos; que se ha resuelto mediante el programa FLAC 3D.

En la **Figura 4.1.1.a** se presenta el modelo confeccionado para la Sección Propuesta en el Estudio de Alternativas.

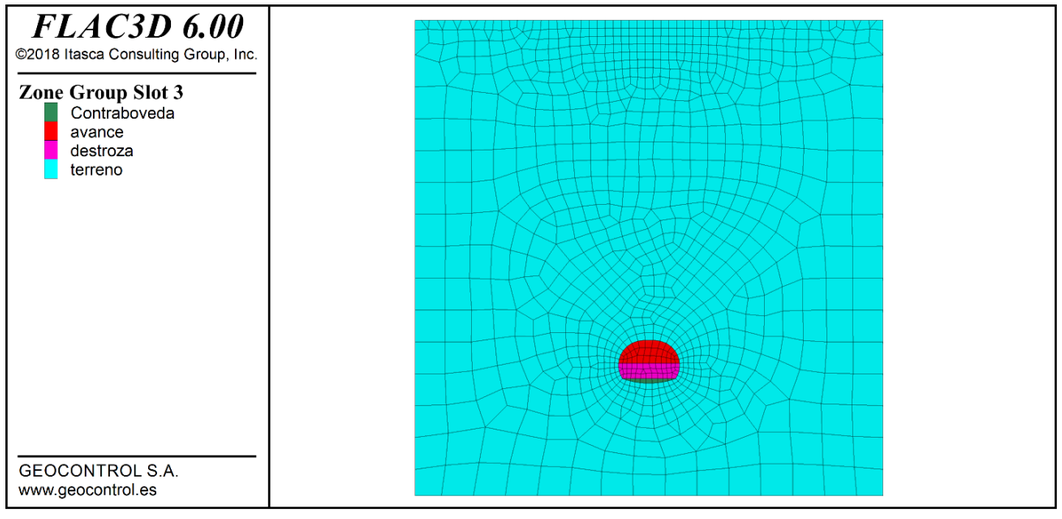


Figura 4.1.1.a.- Modelo de cálculo para la Sección del Estudio de Alternativas (EA2).

En la **Tabla 4.1.1.b** se presentan los parámetros que se han considerado representativos del comportamiento de las Pizarras Negras estimados, y que se han utilizado en los cálculos realizados.

Litologia	Densidad (kN/m^3)	Módulo de Young (MPa)	Cohesión (MPa)	Ángulo de Fricción (º)	Coeficiente de Poisson	Coeficiente de reparto de tensiones
Pizarras Negras	27	670	0,7	25	0,35	0,7

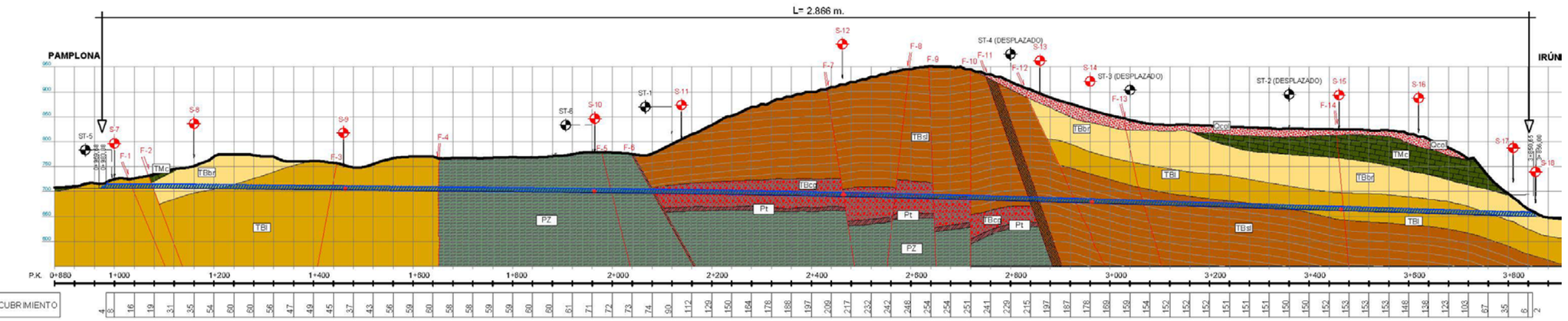
Tabla 4.1.1.b.-Parámetros geotécnicos de las Pizarras Negras estimados de la documentación disponible para la realización de los cálculos.







I.- PERFIL LONGITUDINAL



ESCALA A1: 1:4.000
A3: 1:8.000

II.- ESTIMACIÓN DE LA DIFICULTAD CONSTRUCTIVA

TRAMO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
P.K.INICIO/P.K. FINAL	0+864 1+000	1+000 1+080	1+080 - 1+210	1+210 - 1+650	1+650 - 2+090	2+090 - 2+470	2+470 - 2+720	2+720 - 2+840	2+840 2+880	2+880 - 3+380	3+380 - 3+750	3+750 -3+850
LONGITUD DE TRAMO (m)	16	80	130	440	440	380	250	120	40	500	370	100
LITOTIPO A COTA DE TÚNEL	ARENISCAS Y LUTITAS ROJAS	LIMOLITAS	ARGILITAS	LIMOLITAS	PIZARRAS NEGRAS	CONGLOMERADO	CONGLOMERADO	ARENISCAS II CONGLOMERADO	ARENISCAS	ARENISCAS	LIMOLITAS	ARGILITAS BRECHOIDES
RESISTENCIA A COMPRESIÓN (MPa)	27,0	32,5	2,1	32,5	7,0	45,3	45,3	90,0	105,8	105,8	32,5	6 - 9 (7)
PRESENCIA DE AGUA												
ESTIMACIÓN RMR	39-40 (39)	40 - 45 (43)	30 - 38 (34)	40 - 45 (43)	22 - 32 (27)	60 - 70 (65)	61 - 70 (65)	55 - 65 (60)	40 - 46 (43)	56 - 65 (60)	40 - 45 (43)	30 - 38 (34)
ICE	74 - 92 (111)	111 - 79 (84)	8 - 2 (4)	48 - 40 (46)	10 - 2 (6)	85 - 65 (70)	65 - 40 (51)	95 - 70 (85)	50 t/2 (56)	118 - 131 (124)	20 - 33 (25)	5 - 20 (10)
DIFICULTAD CONSTRUCTIVA	MUY BAJA	BAJA	MUY ALTA	MEDIA	MUY ALTA	BAJA	MEDIA	BAJA	MEDIA	BAJA	ALTA	MUY ALTA

III.- ESTIMACIÓN DE LA SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA

CONTRABÓVEDA (SI/NO)	NO	NO	SI	SI	SI	NO	SI	NO	NO	NO	SI	SI
EXC. SEC. COMPLETA (SI/NO)	SI	SI	NO	NO	NO	SI	NO	SI	SI	SI	NO	NO
TIPO DE SOSTENIMIENTO	ST-II	ST-II	ST-V	ST-III	ST-V	ST-II	ST-III	ST-II	ST-III	ST-II	ST-IV	ST-V
REFUERZO	PARAGUAS MICROPILOTES	-	-	-	-	-	-	-	PARAGUAS MICROPILOTES	-	-	- PARAGUAS MICROPILOTES

Figura 4.1.a.-Perfil longitudinal del Túnel de Belate II.

Los cálculos se han realizado en dos dimensiones suponiendo que la excavación se realiza en tres fases: avance, destroza y contrabóveda y se ha aplicado la teoría de Panet para evaluar el efecto del frente de excavación en cada fase.

4.1.2. Sección prevista en el estudio de alternativas

En la **Figura 4.1.2.a** se muestra la distribución de los desplazamientos verticales del terreno una vez que se ha finalizado la construcción del túnel, empleando la sección del Estudio de Alternativas con contrabóveda.

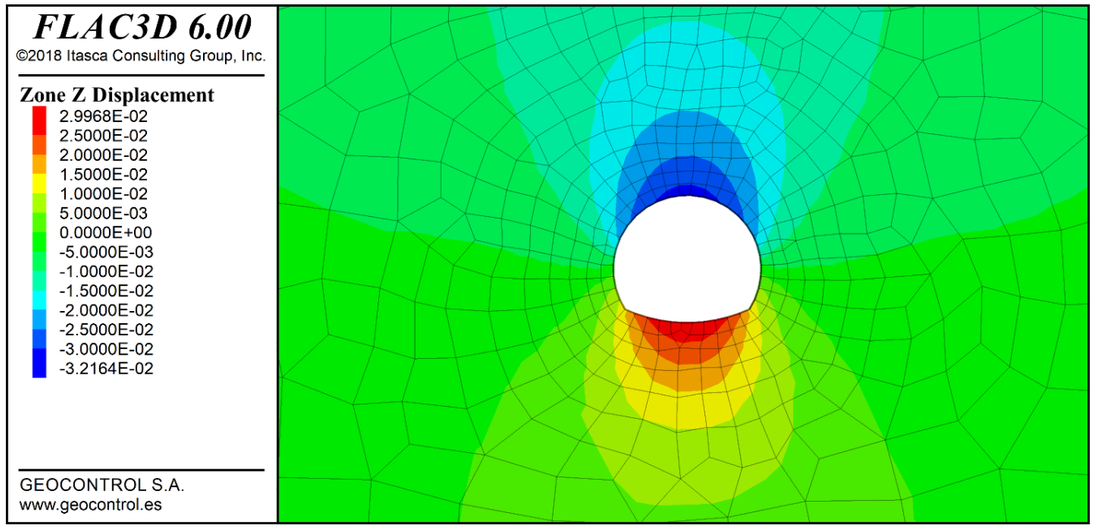


Figura 4.1.2.a.- Desplazamientos verticales en el terreno tras finalizar el túnel en la Sección EA2.

En esta figura se aprecia que el descenso de la clave del túnel es de 3,2 cm; mientras que la parte inferior del túnel experimenta un ascenso de 2,9 cm.

En la **Figura 4.1.2.b** se muestra la distribución de las deformaciones unitarias al corte del terreno, una vez finalizada la construcción del túnel.

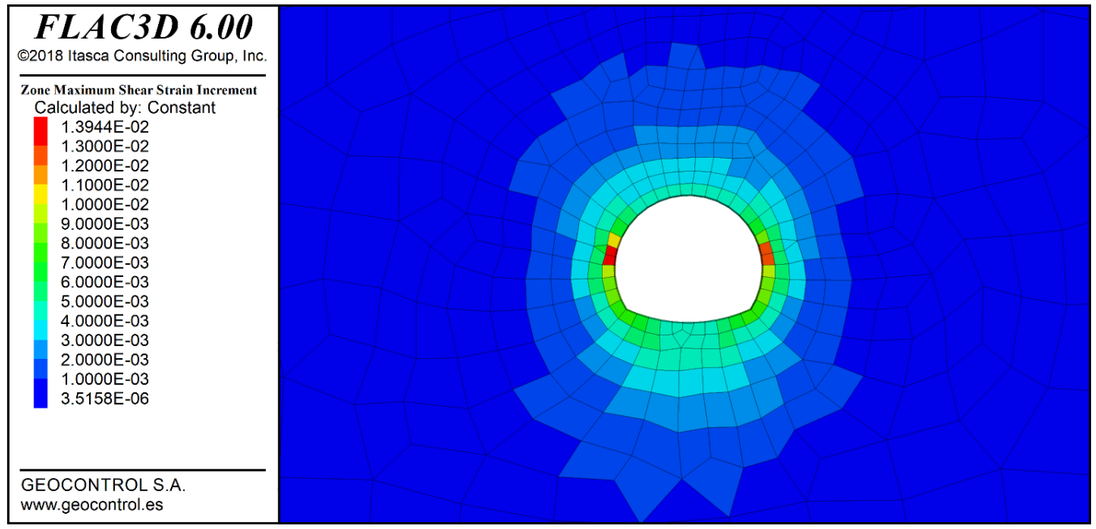


Figura 4.1.2.b.- Deformaciones unitarias al corte en el terreno.

En esta figura se observa que la máxima deformación se produce en los paramentos del túnel, exactamente en la unión entre la excavación del Avance y la Destroza y que alcanza un valor del 1,4%.

Aunque este valor es asumible por las pizarras negras, el hecho de que la máxima deformación se produzca en el límite entre la excavación del Avance y la Destroza sugiere que se debe diseñar una pata de elefante en ese punto.

4.1.3. Sección propuesta como optimización

La Sección Propuesta como Optimización del Estudio de Alternativas está definida en el Apartado 3.2.2, y abreviadamente se ha denominado PR1.2.

En la **Figura 4.1.3.a** se muestra la distribución de los desplazamientos verticales del terreno calculados tras construir el túnel aplicando esta sección.

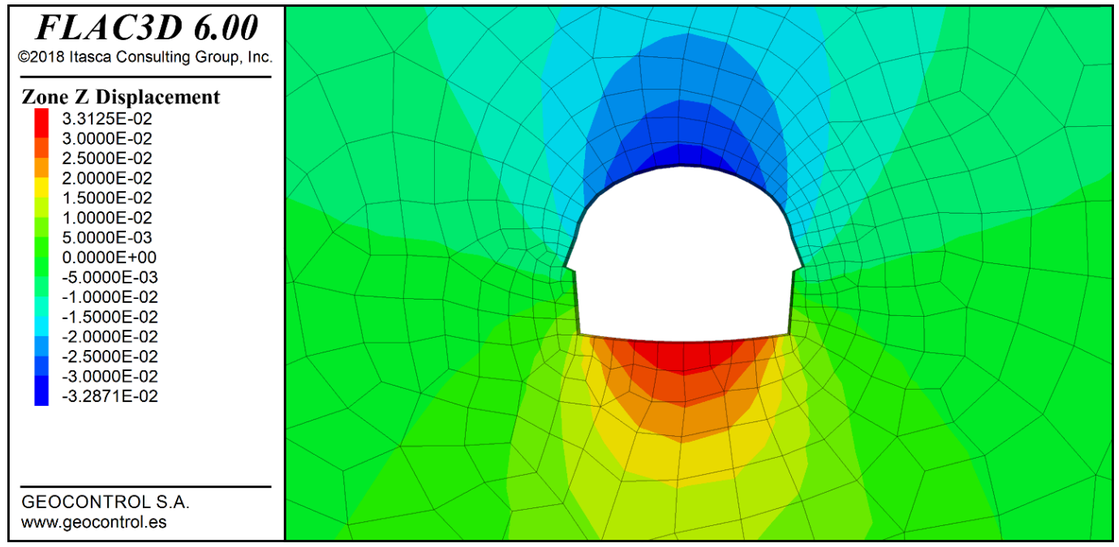


Figura 4.1.3.a- Desplazamientos verticales en el terreno tras finalizar el túnel en la Sección PR1.2.

En esta figura se aprecia que el descenso de la clave del túnel es de 3,2 cm; mientras que la parte inferior del túnel experimenta un ascenso de 3,3 cm.

En la **Figura 4.1.3.b** se muestra la distribución de las deformaciones unitarias al corte del terreno, una vez finalizada la construcción del túnel en la Sección PR1.2.

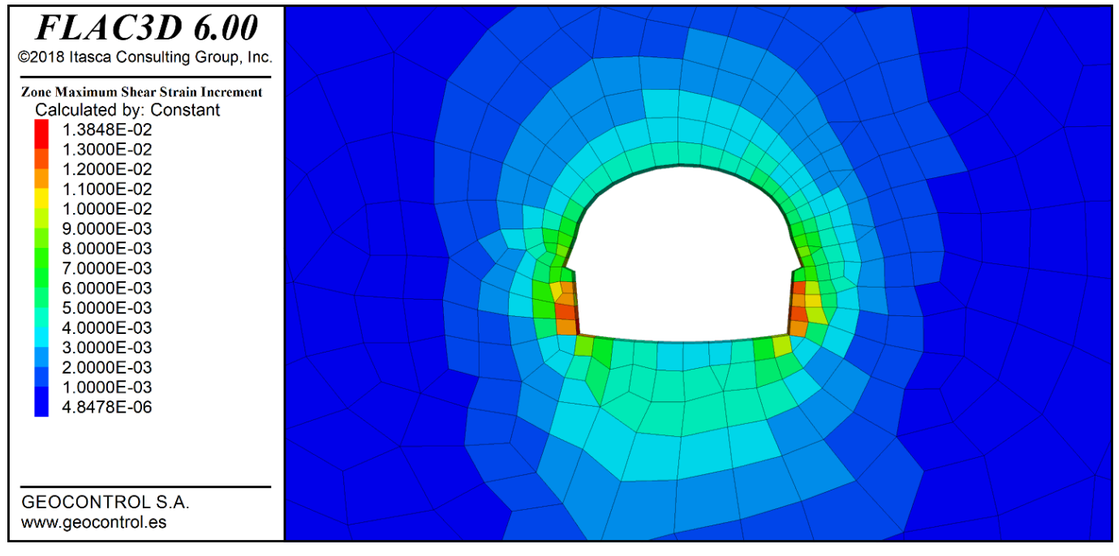


Figura 4.1.3.b.- Deformaciones unitarias al corte en el terreno en la Sección PR1.2.

En cuanto a la máxima deformación al corte en la Figura 4.1.3.b se observa que esta se produce en los hastiales del túnel con un valor máximo de aproximadamente 1,4%.

4.1.4. Sección optimizada con apartadero

La Sección Optimizada respecto del Estudio de Alternativas con apartadero está definida en el Apartado 3.2.4, y abreviadamente se ha denominado PR1.4.

En la **Figura 4.1.4.a** se muestra la distribución de los desplazamientos verticales del terreno calculados tras construir el túnel aplicando esta sección.

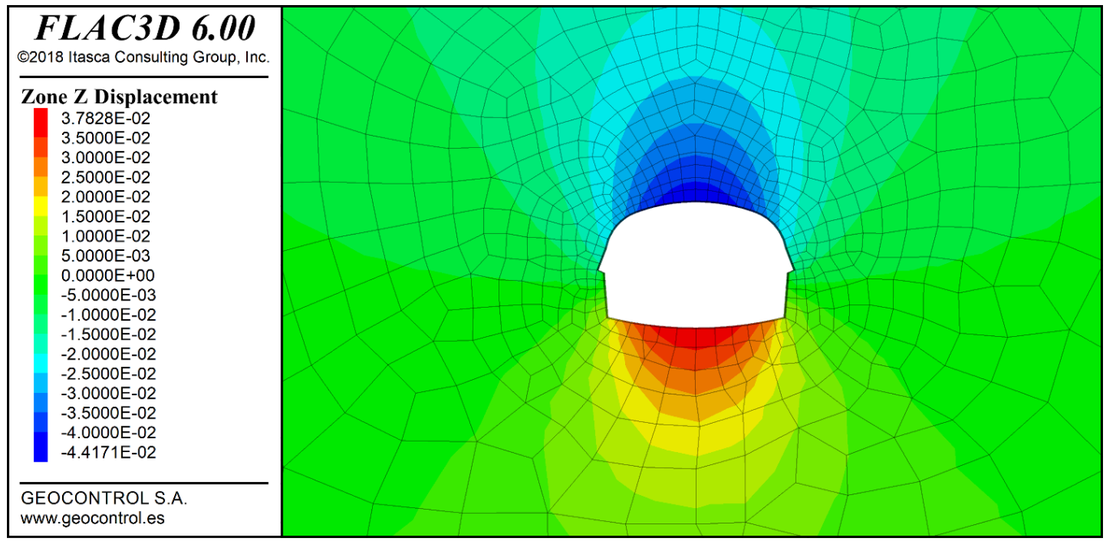


Figura 4.1.4.a.- Desplazamientos verticales en el terreno tras finalizar el túnel en la Sección PR1.4.

En esta figura se aprecia que el descenso de la clave del túnel es de 4,4 cm; mientras que la parte inferior del túnel experimenta un ascenso de 3,8 cm.

En la **Figura 4.1.4.b** se muestra la distribución de las deformaciones unitarias al corte del terreno, una vez finalizada la construcción del túnel en la Sección PR1.4.

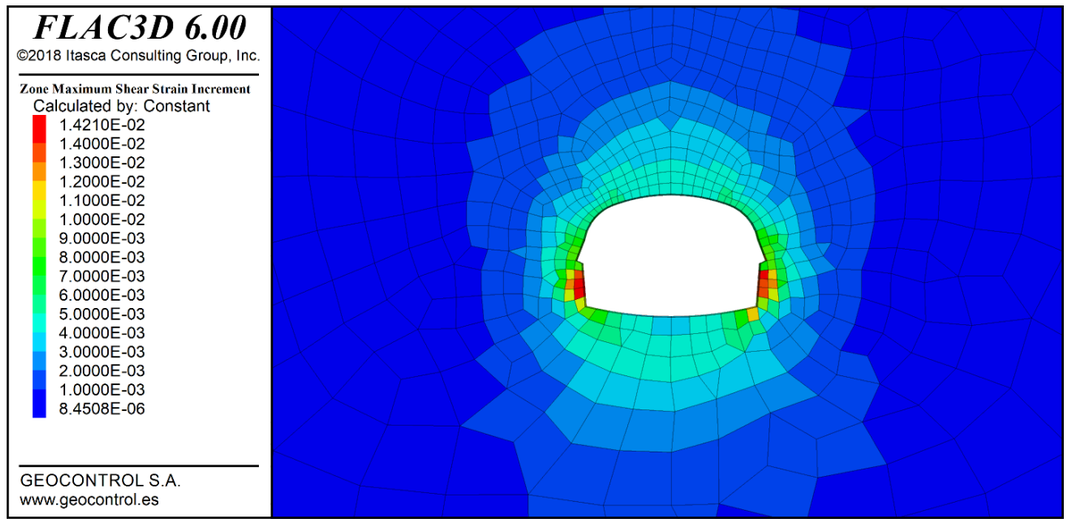


Figura 4.1.4.b.- Deformaciones unitarias al corte en el terreno en la Sección PR1.4.

La máxima deformación al corte en la Figura 4.1.4.b se observa se produce en los hastiales del túnel con un valor máximo de 1,4%, que está situado en la parte baja de los parámetros del túnel. Esto es una situación más favorable desde el punto de vista constructivo, que se debe al efecto de las patas de elefante adoptadas en esta sección.

4.1.5. Sección de dos carriles con arcenes de 1,0 y 3,0 M

La Sección de dos carriles con arcenes de 1,0 y 3,0 m que, abreviadamente, se ha denominado PR2.2, ha sido definida en el apartado 3.3.2.

En la **Figura 4.1.5.a** se muestra la distribución de los desplazamientos verticales del terreno calculados tras construir el túnel aplicando esta sección.

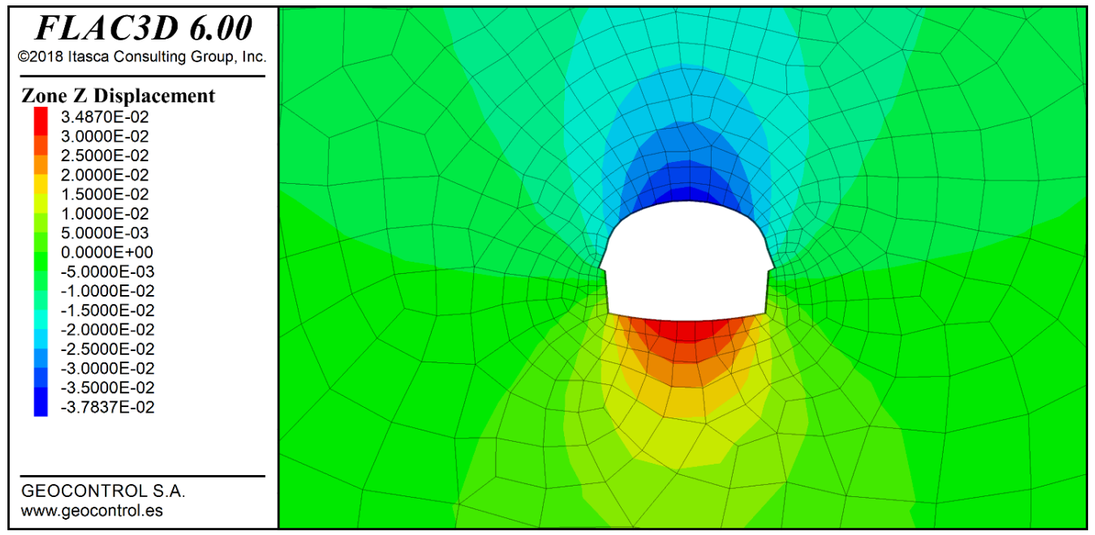


Figura 4.1.5.a.- Desplazamientos verticales en el terreno tras finalizar el túnel en la Sección PR2.2.

En esta figura se aprecia que el descenso de la clave del túnel es de 3,8 cm; mientras que la parte inferior del túnel experimenta un ascenso de 3,5 cm.

En la **Figura 4.1.5.b** se muestra la distribución de las deformaciones unitarias al corte del terreno, una vez finalizada la construcción del túnel en la Sección PR2.2.

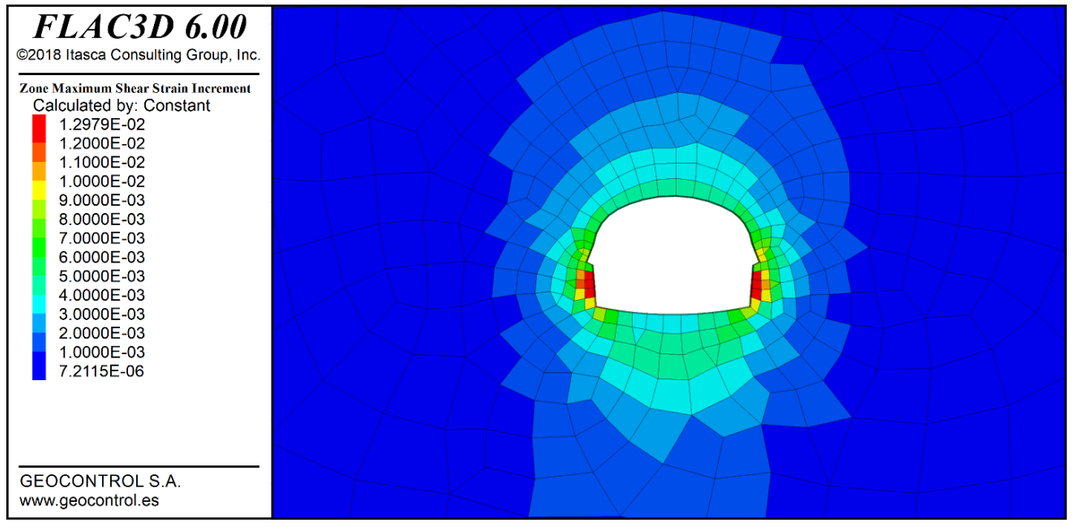


Figura 4.1.5.b.- Deformaciones unitarias al corte en el terreno en la Sección PR2.2.

En este caso, la máxima deformación al corte en la Figura 4.5.b, que se produce en los hastiales del túnel como en los casos anteriores, tienen un valor del 1,3%; valor algo menor que el calculado para los casos anteriores.

4.1.6. Comentarios sobre el comportamiento tenso-deformacional de las secciones propuestas

En la **Tabla 4.1.6.a** se presenta un resumen de los niveles de desplazamientos y deformaciones al corte calculados en los apartados anteriores.

Sección	Descripción	Desplazamiento (cm)			Deformaciones unitarias al corte máximas (5)	
		Descenso de clave	Descenso del piso	Convergencia vertical	Valor	Ubicación
EA2	Sección con contrabóveda	3,2	2,9	6,1	1,4	Apoyo del Avance
PRI.2	Optimización con contrabóveda	3,2	3,3	6,5	1,4	Parámetros de la destroza
PRI.4	Sección optimizada con apartadero	4,4	3,8	8,2	1,4	Parámetros de la destroza
PRI.2.2	Carril de 3m y contrabóveda	3,8	3,5	7,3	1,3	Parámetros de la destroza

Tabla 4.1.6.a.- Resumen de los resultados obtenidos.

Por lo que se refiere a los desplazamientos verticales hay que señalar que la mayor convergencia, 8,2 cm, se obtiene en la sección optimizada con apartaderos; lo cual es lógico pues su anchura, que es de 14,53 cm, es la mayor de todas las secciones analizadas.

En cuanto a las deformaciones unitarias al corte, se aprecia que son similares en todos los casos; aunque se nota el efecto favorable de las patas de elefante, que trasladan el valor máximo de la deformación unitaria al corte desde el apoyo del Avance a las paredes de la excavación en Destroza.

De todo lo anterior se concluye que el comportamiento de las cuatro secciones analizadas es satisfactorio; a pesar de que la contrabóveda de la sección optimizada se ha calculado con 30 cm de espesor y en las secciones optimizada con apartadero y la sección de arcenes de 1,0 m y 3,0 m el espesor calculado es de 40 cm; en vez de los 45 cm del Estudio de Alternativas.

4.2. SOBRECOSTE PARA CONSTRUIR LOS TÚNELES CON UN ARCÉN DERECHO DE 3M

Se va a realizar un análisis comparativo de coste entre la Sección con Arcén de 3,0 m a la derecha y la Sección Optimizada con Arcén de 1,5 m a la derecha, para los Túneles de Belate y Almandoz.

En el Anejo de Geología y Geotecnia, se realiza una estimación de la dificultad constructiva mediante el ICE para los túneles.

En la **Tabla 4.2.a** se muestra la evaluación de la dificultad constructiva estimada para los 12 tramos homogéneos de terreno respecto del ICE, en los que se ha dividido el Túnel de Belate II.

Dificultad constructiva	Longitud del túnel afectada (m)	Proporción de la longitud total (%)
Muy baja	16	0,5
Baja	1.080	37,7
Media	730	25,5
Alta	370	12,9
Muy alta	670	23,4
Total	2.866	100,0

Tabla 4.2.a.- Distribución de la dificultad constructiva en el túnel Belate II.

Por otra parte, en la **Tabla 4.2.b** se muestra la evaluación de la dificultad constructiva estimada en cada uno de los cinco tramos en los que se ha dividido el Túnel Almandoz II.

Dificultad constructiva	Longitud del túnel afectada (m)	Proporción de la longitud total (%)
Muy baja	157	11,7%
Baja	970	72,1%
Media	108	8,0%
Alta	0	0,0%
Muy alta	110	8,2%
Total	**1.345**	**100 %**

Tabla 4.2.b.- Distribución de la dificultad constructiva en el Túnel Almandoz II.

Tal y como se observa en las tablas anteriores los tramos con dificultad constructiva baja son los que mayor proporción representan respecto a la longitud total de los túneles, que suponen un 37,7 % del total en el caso del Túnel de Belate y de un 72,1 % en el caso del Túnel de Almandoz.

Para realizar la comparativa entre las secciones funcionales, se va a considerar la sección tipo de sostenimiento de mayor utilización en los túneles, correspondiente a los tramos con dificultad constructiva baja.

Mediante el ICE, además de definirse el comportamiento tenso-deformacional, se puede obtener una estimación, de forma empírica, del método constructivo a utilizar y las Secciones Tipo de Sostenimiento a aplicar en los túneles utilizando la **Tabla 4.2.c.**

El caso de dificultad constructiva baja se corresponde con un ICE definido en el rango 70-130; tal como se observa en la Tabla 4.2.c el sostenimiento estimado para esa sección se compone de una capa de hormigón proyectado de 10 cm de espesor, a lo que hay que añadir una primera capa de 5 cm de espesor de sellado, cuya suma supone un espesor de 15 cm de hormigón proyectado de 35 MPa; además habría que colocar en la sección bulones tipo expansivos de longitud 4,5 m y disposición longitudinal y transversal de 2 m x 2 m.

En cuanto al revestimiento, se va a considerar hormigón encofrado de 30 MPa y de 30 cm de espesor.

ICE	Comportamiento de la excavación	Posible mecanismo de la inestabilidad	Excavación de la Sección	Sostenimiento orientativo	Elementos especiales de sostenimiento	Pase de Avance	Convergencia medible en obra	Tipo de revestimiento
> 130	Totalmente elástico	Caída gravitacional de bloques de roca. En estados tensionales muy asimétricos y con grandes recubrimientos, posibles estallidos de roca.	**SECCIÓN COMPLETA**	Bulones L = 4,5 m: E_T = 2 m; E_L = 2,5 m Hormigón proyectado: 5 cm	NO	EN FUNCIÓN DEL RME	Inapreciable	Bóveda y paramentos de hormigón. Solera en terreno natural.
70-130	En el límite elasto-plástico	Caída gravitacional de bloques de roca		Bulones L = 4,5 m: E_T = 2 m; E_L = 2 m Hormigón proyectado: 10 cm	NO		Milimétrica	Bóveda, paramentos y solera plana de hormigón.
40-69	Plastificación moderada	Colapsos puntuales de pocos m^3		Bulones L = 4,5 m: E_T = 1,5 m; E_L = 1,5 m Hormigón proyectado: 15 cm	NO	EN FUNCIÓN DEL RMR	Centimétrica	Bóveda y paramentos de hormigón. Contrabóveda de hormigón con flecha 0,1 x Anchura de excavación.
15-39	Plastificación intensa	Colapsos puntuales de algunas decenas de m^3. Hincamiento del sostenimiento colocado en el Avance	**AVANCE Y DESTROZA**	Cerchas TH-29 a 1 m 20 cm HP Hormigón proyectado: 25 cm	Patas de elefante para apoyar las cerchas del Avance			Bóveda y paramentos de hormigón. Contrabóveda de hormigón con flecha del 0,2 x Anchura de excavación.
<15	Plastificación muy intensa	Hincamiento del sostenimiento colocado en el Avance. Inestabilidad del frente		Cerchas HEB-180 a 1 m Hormigón proyectado: $\geq$ 30 cm	Patas de elefante. Paraguas pesado. Bulonaje del frente Micropilotes de recalce		Decimétrica	Revestimiento casi circular de hormigón, armado en la contrabóveda.

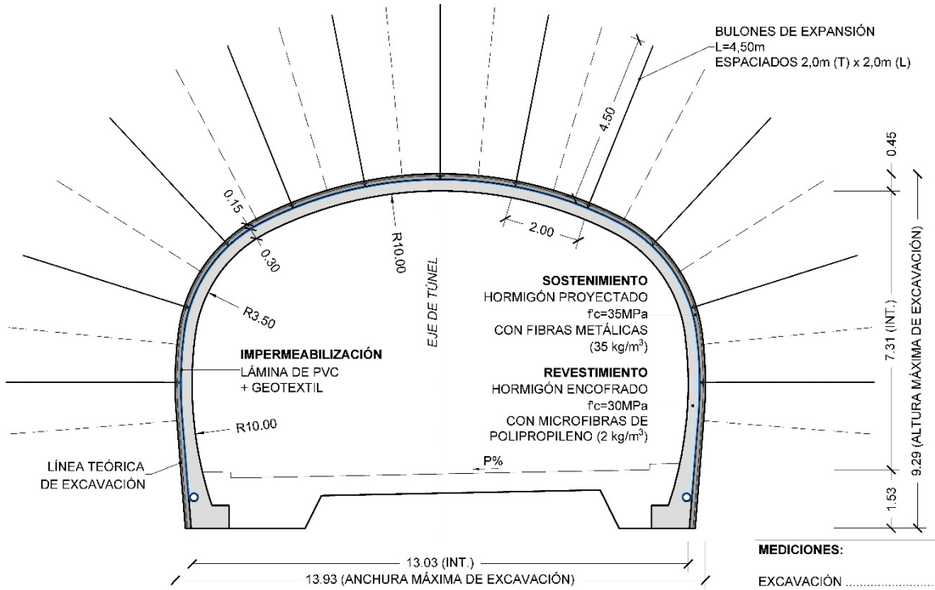
Tabla 4.2.c.- Excavación y Secciones Tipo de Sostenimiento en función del ICE.

En el sostenimiento se va a considerar la adicción de fibras metálicas en una dosificación de 35 kg/m^3 y en el revestimiento se va a considerar la adicción de microfibras de polipropileno, para mejorar el comportamiento del hormigón en caso de incendio, en una dosificación de 2 kg/m^3.

Se ha considerado la impermeabilización formada por lámina impermeabilizante y geotextil.

No se ha tenido en cuenta en la comparación de los elementos de obra civil: drenaje y auscultación, ya que estos elementos pueden considerarse de aplicación lineal a lo largo del túnel, y son independientes de la anchura del mismo.

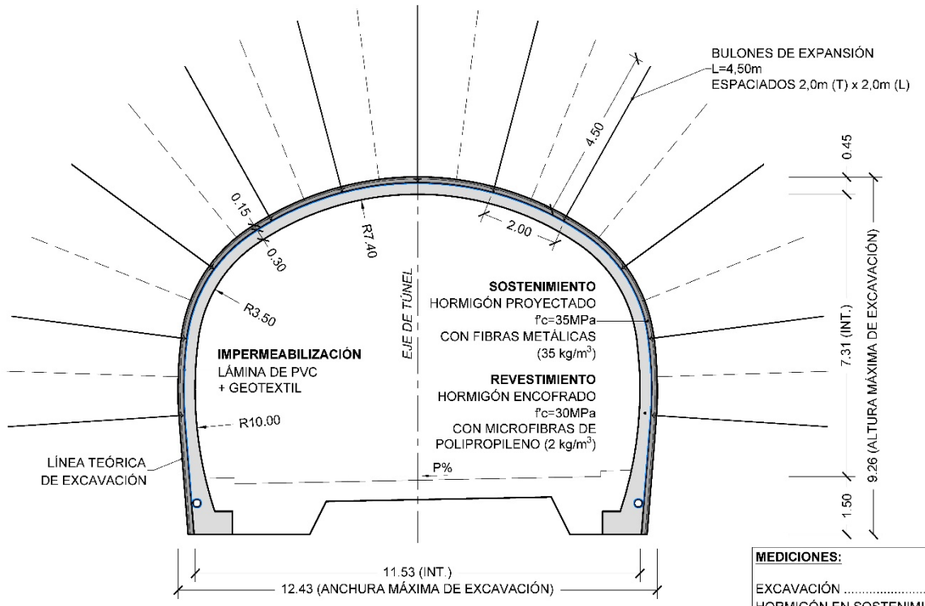
En la **Figura 4.2.d** y en la **Figura 4.2.e** se muestran las Secciones Tipo de Sostenimiento y las mediciones de los elementos constitutivos de las mismas para terrenos de dificultad constructiva baja, con arcén derecho de 3,0 m y de 1,5 m, respectivamente.



MEDICIONES:

EXCAVACIÓN	107,97 m^3/m
HORMIGÓN EN SOSTENIMIENTO	4,14 m^3/m
FIBRAS METÁLICAS SOSTENIMIENTO	144,9 kg/m
HORMIGÓN EN REVESTIMIENTO	9,41 m^3/m
MICROFIBRAS EN REVESTIMIENTO	18,82 kg/m
HORMIGÓN EN RELLENO Y ACERAS	3,44 m^3/m
BULONES	5,75 Ud/m
LÁMINA DE PVC	27,32 m^2/m
GEOTEXTIL	27,32 m^2/m
ENCOFRADO CURVO REVESTIMIENTO	25,32 m^2/m

Figura 4.2.d.- Sección Tipo de Sostenimiento para terrenos de dificultad constructiva baja, con arcén derecho de 3,0 m y revestimiento de hormigón encofrado.



MEDICIONES:

EXCAVACIÓN	95,89 m^3/m
HORMIGÓN EN SOSTENIMIENTO	3,92 m^3/m
FIBRAS METÁLICAS SOSTENIMIENTO	137,2 kg/m
HORMIGÓN EN REVESTIMIENTO	8,95 m^3/m
MICROFIBRAS EN REVESTIMIENTO	17,90 kg/m
HORMIGÓN EN RELLENO Y ACERAS	3,40 m^3/m
BULONES	5,25 Ud/m
LÁMINA DE PVC	25,85 m^2/m
GEOTEXTIL	25,85 m^2/m
ENCOFRADO CURVO REVESTIMIENTO	23,85 m^2/m

Figura 4.2.e.- Sección Tipo de Sostenimiento para terrenos de dificultad constructiva baja, con arcén derecho de 1,5 m y revestimiento de hormigón encofrado.

Los precios utilizados en la comparación se han tomado de la Base de Precios de Plataforma del ADIF del año 2011.

En la **Tabla 4.2.f** y en la **Tabla 4.2.g** se muestra el coste de la Sección Tipo para terrenos de dificultad constructiva baja, con arcén derecho de 3,0 m y 1,5 m, respectivamente.

SECCIÓN TIPO PARA TERRENOS DE DIFICULTAD CONSTRUCTIVA BAJA, CON ARCÉN DERECHO DE 3,0 m			
Medición unitaria	**Unidad de Obra**	**Coste Unitario**	**Importe**
	EXCAVACIÓN		
107,97 m³/m	EXCAVACIÓN DEL TÚNEL	45,77 €/m³	4.941,79 €/m
	SOSTENIMIENTO		
4,14 m³/m	HORMIGÓN PROYECTADO fc=35 Mpa	222,45 €/m³	920,94 €/m
144,90 kg/m	FIBRAS METÁLICAS (35 kg/m³)	1,17 €/kg	169,53 €/m
25,88 m/m	BULÓN DE EXPANSIÓN TIPO SWELLEX O SIMILAR	29,84 €/Ud	772,11 €/m
	REVESTIMIENTO		
9,41 m³/m	HORMIGÓN ENCOFRADO fc=30 Mpa	86,02 €/m³	809,45 €/m
18,82 kg/m	MICROFIBRA DE POLIPROPILENO (2 kg/m³)	4,19 €/kg	78,86 €/m
25,32 m2/m	ENCOFRADO Y DESENCOFRADO CURVO VISTO	23,64 €/m2	598,56 €/m
	IMPERMEABILIZACIÓN		
27,32 m2/m	LAMINA DE PVC DE 2 MM EN IMPERMEABILIZACIÓN	15,11 €/m2	412,81 €/m
27,32 m2/m	SUM. Y COLOCACIÓN DE GEOTEXTIL	11,78 €/m2	321,83 €/m
	RELLENOS Y ACERAS		
3,44 m³/m	HORMIGÓN fc=25 Mpa	74,96 €/m³	257,86 €/m
	TOTAL EJECUCIÓN MATERIAL OBRA CIVIL SECCIÓN		**9.283,74 €/m**
	16 % GASTOS GENERALES + BENEFICIO INDUSTRIAL		**1.485,40 €/m**
	PRESUPUESTO BASE OBRA CIVIL DE LA SECCIÓN TIPO		**10.769,14 €/m**

Tabla 4.2.f.- Coste de la Sección Tipo de Sostenimiento para terrenos de dificultad constructiva baja, con arcén derecho de 3,0 m y revestimiento de hormigón encofrado.

SECCIÓN TIPO PARA TERRENOS DE DIFICULTAD CONSTRUCTIVA BAJA, CON ARCÉN DERECHO DE 1,5 m			
Medición unitaria	**Unidad de Obra**	**Coste Unitario**	**Importe**
	EXCAVACIÓN		
95,89 m³/m	EXCAVACIÓN DEL TÚNEL	45,77 €/m³	4.388,89 €/m
	SOSTENIMIENTO		
3,92 m³/m	HORMIGÓN PROYECTADO fc=35 Mpa	222,45 €/m³	872,00 €/m
137,20 kg/m	FIBRAS METÁLICAS (35 kg/m³)	1,17 €/kg	160,52 €/m
23,63 m/m	BULÓN DE EXPANSIÓN TIPO SWELLEX O SIMILAR	29,84 €/Ud	704,97 €/m
	REVESTIMIENTO		
8,95 m³/m	HORMIGÓN ENCOFRADO fc=30 Mpa	86,02 €/m³	769,88 €/m
17,90 kg/m	MICROFIBRA DE POLIPROPILENO (2 kg/m³)	4,19 €/kg	75,00 €/m
23,85 m2/m	ENCOFRADO Y DESENCOFRADO CURVO VISTO	23,64 €/m2	563,81 €/m
	IMPERMEABILIZACIÓN		
25,85 m2/m	LAMINA DE PVC DE 2 MM EN IMPERMEABILIZACIÓN	15,11 €/m2	390,59 €/m
25,85 m2/m	SUM. Y COLOCACIÓN DE GEOTEXTIL	11,78 €/m2	304,51 €/m
	RELLENOS Y ACERAS		
3,40 m³/m	HORMIGÓN fc=25 Mpa	74,96 €/m³	254,86 €/m
	TOTAL EJECUCIÓN MATERIAL OBRA CIVIL SECCIÓN		**8.485,05 €/m**
	16 % GASTOS GENERALES + BENEFICIO INDUSTRIAL		**1.357,61 €/m**
	PRESUPUESTO BASE OBRA CIVIL DE LA SECCIÓN TIPO		**9.842,66 €/m**

Tabla 4.2.g.- Coste de la Sección Tipo de Sostenimiento para terrenos de dificultad constructiva baja, con arcén derecho de 1,5 m y revestimiento de hormigón encofrado.

Tal y como se observa en las Tablas 4.2.f y 4.2.g, el coste de la Sección Tipo de Sostenimiento más frecuente en los túneles, es de 10.769,14 €/m en el caso de arcén de 3,0 m y de 9.842,66 €/m en el caso de arcén de 1,5 m.

Se puede estimar que el incremento de coste calculado para la sección tipo considerada es semejante al incremento de coste de las otras secciones tipo a aplicar en los túneles.

Por tanto, el sobrecoste de la sección con arcén 3,0 m respecto a la sección con arcén 1,5 m, supone un sobrecoste de 926,48 €/m; es decir, el 8,7%.

De acuerdo con lo anterior, el sobrecoste al construir el Túnel de Belate II con arcén de 3,0 m se puede estimar en 2.655.292 €, mientras que el sobrecoste en la construcción del Túnel de Almandoz II con arcén de 3,0 m supone 1.246.116 €.

4.3. NIVEL DE SEGURIDAD DE LOS TÚNELES CON EL ARCÉN DERECHO DE 3 M

La proporción de vehículos pesados que circularon por los túneles de Belate y Almandoz en 2019 fue del orden del 27,5%; cifra que es elevada.

La disposición adoptada en los túneles de Belate II y Almandoz II permitirá el tráfico hacia Pamplona en pendiente ascendente; los vehículos que entren en el Túnel Belate II tendrán que afrontar una rampa del 3,04%, mientras que los que entren en el Túnel de Almandoz II tendrán una rampa del 2,04% tal como se muestra en la **Figura 4.3.a**.

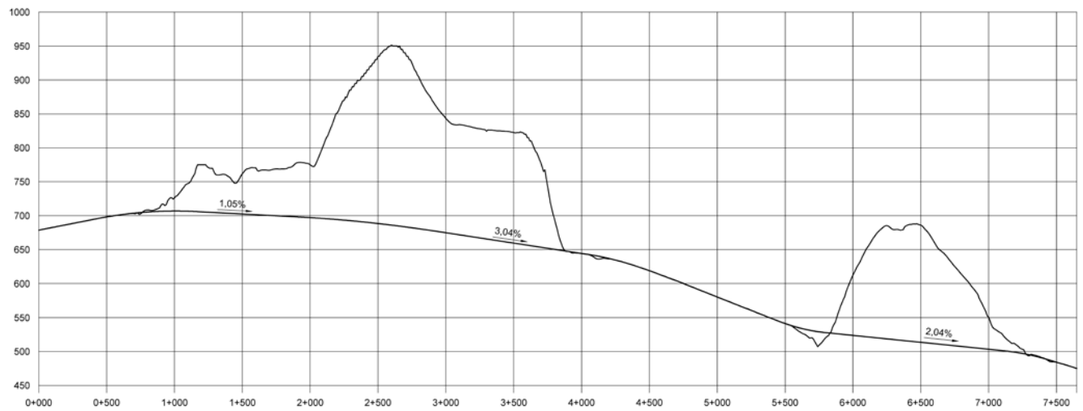


Figura 4.3.a.- Alzado de los nuevos túneles de Belate y Almandoz.

El disponer de un arcén derecho de 3 m aportaría a los nuevos túneles un incremento notable en el nivel de seguridad; pues, por un lado, los camiones con problemas podrían estacionarse en el arcén en cualquier punto del túnel sin afectar al tráfico y, por otro, en caso de accidente los equipos de socorro tendrían un acceso muy fácil y rápido.

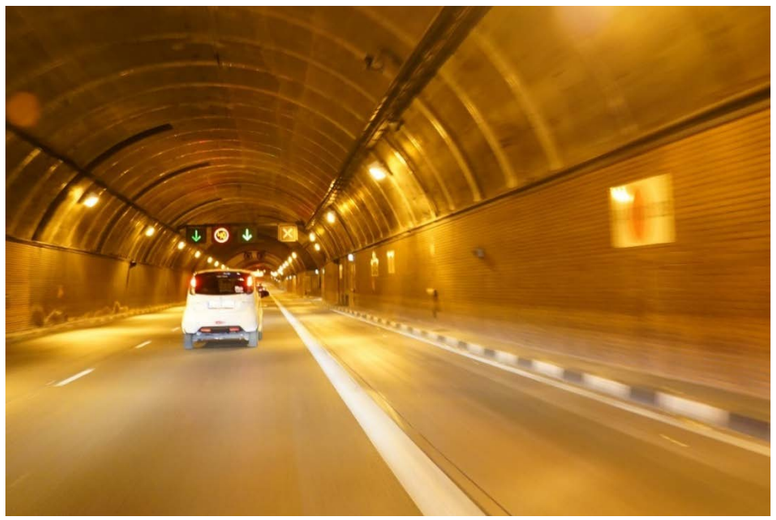
Un concepto similar se ha implementado en los túneles de El Cadí (Barcelona) y de María de Molina (Madrid).

En el Túnel de El Cadí se dispone de un pasillo central, para circulación de los vehículos de socorro; tal como se muestra en la **Fotografía 4.3.b.**



Fotografía 4.3.b.- Pasillo central para emergencias en el Túnel del Cadí (Barcelona).

El Túnel de María de Molina, que soporta una intensidad de tráfico de unos 47.000 vehículos/día, dispone de un arcén lateral de 2,7 m de ancho; tal como se muestra en la **Fotografía 4.3.c.**



Fotografía 4.4.c.- Túnel de María de Molina con arcén a la derecha de 2,7 m.

Hay que resaltar que tanto el pasillo central del Túnel del Cadí, como el arcén derecho sobredimensionado del Túnel de María de Molina han funcionado perfectamente en caso de incidente; pues han permitido un acceso muy rápido a los equipos de socorro.

4.4. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS COMPARATIVO DE SECCIONES

En el análisis de las secciones para los nuevos Túneles de Belate y Almandoz se han considerado los requisitos normativos vigentes, se han estudiado con detalle las secciones incluidas en el Estudio de Alternativas y se han definido dos propuestas alternativas:

I. **Optimización de la sección incluida en el Estudio de Alternativas,** mejorando su constructibilidad, creando un sistema separativo de captación del agua infiltrada y productos peligrosos vertidos en la calzada y se ha reducido levemente el área a excavar.

II. **Construcción del arcén derecho con 3 m de anchura,** manteniendo las optimizaciones de la Propuesta I, que permite disponer de un arcén para el tránsito de los vehículos de socorro y para estacionar, en cualquier punto del túnel, los vehículos con problemas; sin que éstos afecten al tráfico. Esta propuesta permite eliminar los anchurones de los túneles.

Se ha estudiado el comportamiento tenso-deformacional de la sección del Estudio de Alternativas y de todas las propuestas en las pizarras negras del Túnel de Belate, que constituyen el terreno de peor comportamiento de los que se tienen que excavar.

Los resultados del análisis realizado indica que todas las secciones se comportan satisfactoriamente; aunque ha sido necesario incorporar unas patas de elefante, para apoyo del sostenimiento de la Fase de Avance, a fin de mejorar el comportamiento de la sección propuesta en el Estudio de Alternativas.

Se ha estimado el sobrecoste de la sección con arcén 3,0 m respecto a la sección con arcén 1,5 m, que supone un 8,7%; por lo cual, el sobrecoste al construir el Túnel de Belate II con arcén de 3,0 m se puede estimar en 2.655.292€, mientras que el sobrecoste en la construcción del Túnel de Almandoz II con arcén de 3,0 m supone 1.246.116 €.

En los nuevos túneles desde su puesta en servició circulará casi un 30% de vehículos pesados y al entrar en el túnel se tendrá que afrontar una pendiente ascendente en los nuevos Túneles de Belate y Almandoz del 3,04% y del 2,04%, respectivamente.

Dado el moderado sobrecoste que supone construir la sección con arcén 3,0 m respecto a la sección con arcén 1,5 m, y la elevada funcionalidad que se consigue, se considera que la Sección Funcional de dos carriles con arcén derecho de 3,0 m e izquierdo de 1,0 m en sentido de la circulación, es la más adecuada en la construcción de los nuevos Túneles de Belate y Almandoz.

5. SECCIONES FUNCIONALES PROPUESTAS PARA LOS TÚNELES DE BELATE Y ALMANDOZ

En los **Planos 10.1.1 y 10.1.2** se muestran las Secciones Funcionales para los Túneles de Belate y Almandoz.

A continuación se definen las características de las Secciones Funcionales propuestas para ambos túneles.

5.1. SECCIÓN FUNCIONAL SIN CONTRABÓVEDA

La Sección Funcional sin contrabóveda de los Túneles de Belate y Almandoz se muestra en la **Figura 5.1.a**.

Figura 5.1.a.- Definición geométrica con arcén a la derecha de 3 m.

Las características geométricas que definen esta sección tipo son las siguientes:

- Sección de dos carriles de 3,5 m de anchura cada uno de ellos, con arcén de 3,0 m en el lado derecho y otro de 1,0 m en el lado izquierdo. Por lo que se dispone de un ancho de calzada de 11,0 metros.
- A ambos lados de la calzada existen dos aceras de 0,75 metros cada una y se dispone de un gálibo de 5,5 m.

- La sección interior de la bóveda del túnel está constituida por tres arcos, un arco central que define la clave de la bóveda con un radio de 10,0 metros, y dos radios laterales que abarcan los hombros de la bóveda con un radio interior R=3,50 m.
- Los hastiales del túnel presentan una cara interior de forma circular con un radio R= 10 m, mientras que la cara exterior de los hastiales es recta con una inclinación con respecto a la vertical de 5º.

5.2. SECCIÓN FUNCIONAL CON CONTRABÓVEDA

En la **Figura 5.2.a** se muestra la Sección Funcional con contrabóveda de los Túneles de Belate y Almandoz.

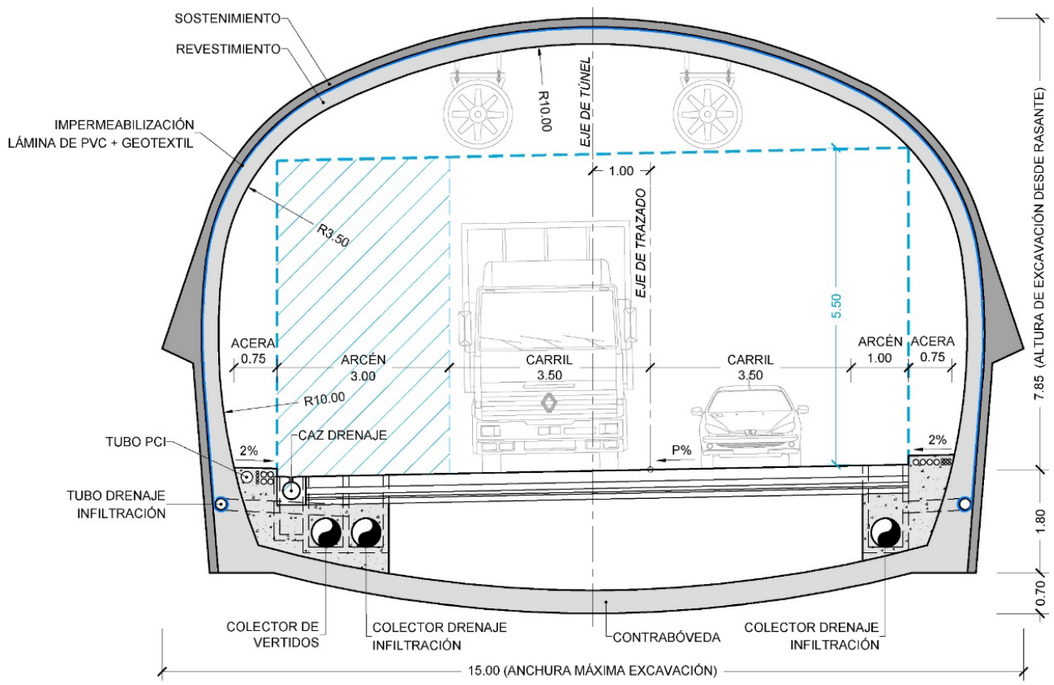


Figura 5.2.a.- Definición geométrica de la Sección con arcén a la derecha de 3 m y contrabóveda.

Las características geométricas que definen esta sección tipo son las siguientes:

- Sección de dos carriles de 3,5 m de anchura cada uno de ellos, con arcén de 3,0 m en el lado derecho y otro de 1,0 m en el lado izquierdo. Por lo que se dispone de un ancho de calzada de 11,0 metros.
- A ambos lados de la calzada existen dos aceras de 0,75 metros cada una y se dispone de un gálibo de 5,5 m.

- La sección interior de la bóveda del túnel está constituida por tres arcos, un arco central que define la clave de la bóveda con un radio de 10,0 metros, y dos radios laterales que abarcan los hombros de la bóveda con un radio interior R=3,50 m.
- Los hastiales del túnel presentan una cara interior de forma circular con un radio R= 10 m, mientras que la cara exterior de los hastiales es recta con una inclinación con respecto a la vertical de 5º.
- En la parte inferior dispone de una contrabóveda curva con un radio interior de 22,0 m y un espesor de 40 cm.