ADECUACIÓN DEL TÚNEL DE RAÑADOIRO (ASTURIAS)

Juan J BREGEL[1]*, Antonio CARRERAS[2], Juan C GUERRA[1], y Juan M SANZ[2]

[1] Ferrovial-Agroman. Delegación de Asturias y Dirección Técnica, Madrid.

[2] Euroestudios. Madrid

RESUMEN

En esta comunicación se describe la adecuación al Real Decreto 635/2006, de 26 de Mayo, sobre Requisitos Mínimos de Seguridad en los Túneles de Carreteras del Estado realizada en el Túnel de Rañadoiro, ubicado en el Principado de Asturias. Para ello, en primer lugar se realiza la descripción de las características del túnel según el Proyecto Constructivo inicial, posteriormente se realiza la exposición detallada del estudio realizado, poniendo de manifiesto los aspectos de dicho Proyecto Constructivo que no acatan el Real Decreto, o precisan alguna aclaración y, finalmente, se analizan las medidas que han de tomarse para su adaptación al Real Decreto 635/2006. Además, se incluye el Análisis de Riesgos realizado que estudia las diversas alternativas planteadas y establece el equipamiento necesario para alcanzar el nivel de seguridad equivalente al establecido por el Ministerio en su R.D.

Se han tenido en cuenta todos los factores que afectan a la seguridad, en particular, la geometría del túnel (que ha sufrido una importante transformación para albergar la galería de evacuación y las salidas de emergencia, ambas inexistentes en el proyecto original), el entorno, las características del pavimento y el tráfico, el equipamiento y el tiempo de llegada de los servicios de emergencia. Además, se han estudiado las medidas adicionales de seguridad o equipamiento complementario para garantizar un adecuado nivel de seguridad del túnel de Rañadoiro.

1. INTRODUCCIÓN

El túnel de Rañadoiro, que atraviesa el puerto que le da su nombre, está ubicado en el P.K. 0+433 de la carretera AS-15, Cornellana-Puerto de Cerredo, entre los municipios de Larón y Rengos, en el Principado de Asturias. Se trata de un túnel bidireccional de carácter interurbano, que presenta una longitud total de 1.868 metros, con una pendiente uniforme del 3%, que presenta una circulación sin retenciones y sin restricciones a la circulación de vehículos con mercancías peligrosas. El túnel soportará una IMD_{2010} total de 1.615 vehículos/día con 81 vehículos pesados al día (suma de los dos sentidos).

2. CARACTERÍSTICAS DEL TÚNEL SEGÚN EL PROYECTO INICIAL

Según el Proyecto Constructivo inicial, la sección transversal tipo del túnel, que tiene un gálibo siempre superior a los 5 m que marca la norma, presenta las siguientes características (ver Figura 1).

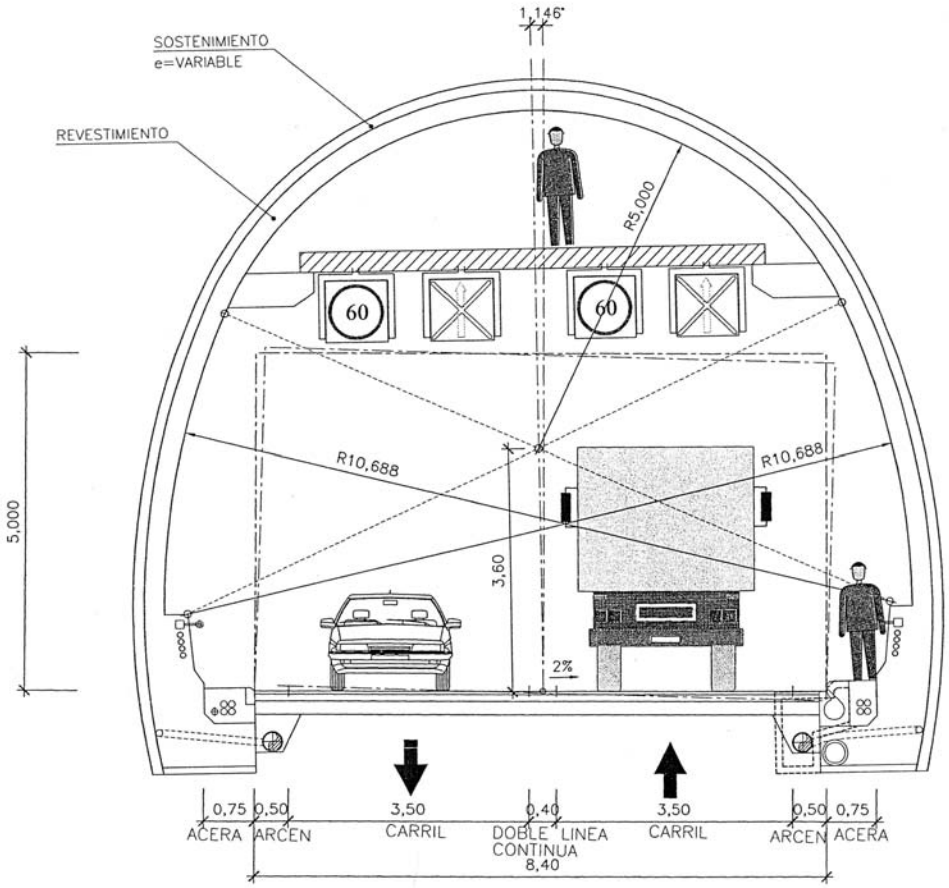

Figura 1. Sección transversal tipo del túnel de Rañadoiro según el Proyecto de Construcción inicial

El equipamiento del que disponía el túnel de Rañadoiro según el Proyecto de Construcción inicial (fecha de redacción junio de 2006) es el siguiente: *Aceras* (de 0,75 m de anchura), *Apartaderos* (dos apartaderos de 25 m de longitud), *Drenaje de líquidos tóxicos*, *Centro de Control* (ubicado en el bucle de la curva cerrada de la actual AS-15, en las proximidades de la boca sur), *Circuito cerrado de TV*, *Ventilación* (sistema mixto, longitudinal en los extremos y semitransversal en la parte central), *Iluminación normal, de seguridad y de emergencia*, *Doble suministro eléctrico* (CT1 en las proximidades de la boca de acceso al túnel desde Larón y, el otro CT2 se ubicará junto a la boca de acceso al túnel desde Rengos, conectados ambos entre sí), *Generadores de Emergencia* (dos grupos electrógenos de 630 kVA en la boca de Larón, y otro de 360 kVA en la boca Rengos), *Sistema de alimentación ininterrumpida* (SAI), *Detectores de CO y NOx* (con sensores cada 50 metros), *Opacímetros* (un total de 4 opacímetros separados 500 m), *Cable lineal de detección de incendios*, *Detección automática de incidentes* (en tiempo real basado en técnica de procesado digital de imágenes; los equipos DAI se ubican en el centro de control del túnel), *Estaciones de emergencia* (13 estaciones dotadas de poste SOS, 2 extintores y una BIE de 25 mm, separadas 150 m, al tresbolillo), *Señalización de salidas y equipamientos de emergencia* (fotoluminiscentes y luminosas), *Señalización* (según norma

8.1 y 8.2 IC), *Paneles de señalización variable* (en exterior, 2 gráficos fullcolor montados sobre pórtico visitable o banderola; en interior, paneles de mensaje variable), *Barreras exteriores* (una en cada boca), *Semáforos exteriores*, *Megafonía*, *Red de hidrantes y BIEs*, *Aforadores*, *Sistema de radiocomunicación para servicios de emergencia* y, por último, *Mensajería de emergencia por radio para usuarios* (canales de radiodifusión FM con posibilidad de inserción de mensajes de socorro o aviso, en caso de emergencia).

3. CUMPLIMIENTO DEL RD 635/2006 EN EL PROYECTO INICIAL

Según el Real Decreto 635/2006, en lo que se refiere a equipamiento mínimo según la tipología del túnel, este túnel se clasifica dentro del grupo:

- *Túneles bidireccionales.*
- *Longitud mayor de 1.000 m.*
- *Tráfico IMD superior a 1.000 veh/carril.* (Aunque la IMD2010 es de 1.615 veh/carril, el RD 635/2006 en su punto 2.1.2, parece referirse a la IMD prevista al término de un periodo de 15 años por ser un túnel en fase de proyecto. En esta fecha se prevé que se superará el valor de 1.000 veh/carril).

En la tabla siguiente, se relacionan los requisitos solicitados por el RD para este túnel, además de la conclusión de si se cumple o no en el Proyecto Constructivo inicial:

TABLA 1: Cumplimiento del RD 635/2006 del túnel de Rañadoiro según Proyecto inicial

Equipamiento del Túnel de Rañadoiro, según Proyecto inicial		**Cumplimiento según RD 635/2006**
1	Aceras	Sí
2	Salidas de emergencia cada 400 m	No (A)
3	Apartaderos	Sí
4	Drenaje de líquidos tóxicos	Sí
5	Centro de Control	Sí
6	Circuito cerrado de TV	Sí
7	Ventilación y sistema informático de extracción de humos	Sí
8	Iluminación normal	Sí
9	Iluminación de seguridad	Sí (B)
10	Iluminación de emergencia	Sí (C)
11	Doble suministro eléctrico	Sí
12	Generadores de emergencia	Sí (D)
13	Sistema de alimentación ininterrumpida (SAI)	Sí
14	Detectores de CO	Sí
15	Opacímetros	Sí
16	Cable para detección de incendios	Sí
17	Detección automática de incidentes	Sí
18	Estaciones de emergencia	Sí (E)
19	Señalización de salidas y equipamientos de emergencia	Sí
20	Señalización según norma 8.1. y 8.2 IC	Sí (F)
21	Paneles de señalización variable	Sí (G)
22	Barreras exteriores	Sí
23	Semáforos exteriores	Sí (H)
24	Megafonía	Sí
25	Red de hidrantes y BIEs	Sí (I)
26	Aforadores	Sí
27	Sistema de radiocomunicación para servicios de emergencia	Sí

28	Mensajería de emergencia por radio para usuarios	Sí

De la Tabla 1 anterior, se deduce que, el Proyecto Constructivo inicial del túnel de Rañadoiro cumple una gran parte de las exigencias del Real Decreto. Ahora bien, hay equipamientos que no acatan fielmente dicho Real Decreto, o precisan alguna aclaración (indicaciones entre paréntesis para posterior referencia). A continuación se pone de manifiesto qué aspectos del Proyecto inicial no cumplen el RD 635/2006 o precisan matizaciones para su cumplimiento.

(A) SALIDAS DE EMERGENCIA: El Proyecto Constructivo inicial no prevé la construcción de ninguna salida de emergencia, apelando a los siguientes razonamientos:

- Técnicamente no existe ningún lugar donde pueda desembocar una salida de emergencia: no existe un tubo paralelo; la montera es muy alta y no existen puntos donde sea viable construir una salida. Así, no existe salida posible, salvo que se construya una galería longitudinal o tubo paralelo, únicamente para uso como vía de evacuación.
- En el estudio de alternativas, estudio de impacto ambiental y declaración de impacto ambiental, documentos todos ellos anteriores al RD 3635/2006, no está contemplada esta posibilidad de construir un tubo, galería o conducto de evacuación más. Debido a que el proyecto se desarrolla en una zona ambientalmente sensible (en el Parque Natural de Fuentes del Narcea y de Ibias), no se incluye un tubo más como vía de evacuación.

A pesar de estas justificaciones incluidas en el Proyecto Constructivo inicial, obviamente, la inexistencia de salidas de emergencia en un túnel bidireccional con una longitud de 1.868 m, constituye un incumplimiento muy grave del RD 635/2006.

(B) ILUMINACIÓN DE SEGURIDAD: Se debe conectar al SAI los proyectores que correspondan a la iluminación de seguridad, ya que en caso de fallo de red, al estar conectados a los Grupos Electrógenos, los equipos tardarían bastante tiempo hasta que vuelvan a estar operativos una vez que se disponga de nuevo de alimentación.

(C) ILUMINACIÓN DE EMERGENCIA: Según las directrices del RD 635/2006, la iluminación de emergencia deberá proyectarse de modo que permita guiar a los usuarios del túnel para evacuarlo a pie con un mínimo de 10 lux. El Proyecto inicial indica la instalación de una luminaria destinada a iluminación de emergencia cada 42 m, distancia insuficiente para asegurar las condiciones exigidas por el RD 635/2006 (sería necesario colocar una luminaria autónoma de emergencia aproximadamente cada 10 m).

(D) GENERADORES DE EMERGENCIA: Según el Proyecto inicial, los dos Grupos Electrógenos a instalar alimentarán la mitad de los circuitos de la ventilación instalada en el interior del túnel. Para cumplir el RD 635/2006, estos grupos deben alimentar a la totalidad de los circuitos de la ventilación necesaria para extraer el humo en caso de incendio.

(E) ESTACIONES DE EMERGENCIA: El RD 635/2006 solicita la presencia de puestos de emergencia cerca de las bocas y en el interior del túnel, situados a intervalos no superiores a 150 metros para nuevos túneles. En el Proyecto Constructivo inicial, las estaciones están

previstas cada 150 metros, pero colocadas a tresbolillo, y deberían estar enfrentadas para evitar que un usuario que necesitara utilizar una estación cruzara la carretera y se expusiera a un atropello. Además, los apartaderos deberían contar con un puesto de emergencia, particularidad que no cumple el Proyecto inicial. Por lo tanto, habría que redistribuir las estaciones de emergencia para que coincidieran con los dos apartaderos existentes, o bien añadir otras dos estaciones en estos puntos.

(F) SEÑALIZACIÓN: Para que se cumpliera la norma de señalización 8.1 IC, en su punto 9.20. (*señalización en túneles*), faltaría incluir las señales de prohibido adelantar (R-305) a una distancia mínima de 200 m antes de las bocas de entrada y las señales de fin de prohibiciones (R-500) a una distancia de 75 m después de las bocas de salida, si el trazado lo permite. Además, parece interpretarse, que al ser un túnel con vigilancia permanente, debieran colocarse varias secciones de semáforos de dos y tres aspectos anteriores a las bocas del túnel, para señalizar un posible problema en el interior del túnel (únicamente se dispone de un semáforo en la boca del túnel).

(G) PANELES DE SEÑALIZACIÓN VARIABLE: Según el RD 635/2006, en los túneles de longitud superior a 1.000 m, se dispondrán paneles gráficos y alfanuméricos cada 1.000 metros, y señales de afección de carril y limitación de velocidad cada 400 m, que se correspondería con tener cada 400 m señales aspa-flecha y señales variables de control de límite de velocidad (CLV). El túnel de Rañadoiro, en su Proyecto Constructivo inicial, no dispone de señales aspa-flecha o CLV en su interior, además de contar con PMV de 2 líneas y 12 caracteres sin gráfico.

(H) SEMÁFOROS EXTERIORES: Como ya se ha justificado en el punto F (señalización) anterior, deberían colocarse varias secciones de semáforos de dos y tres aspectos anteriores a las bocas del túnel.

(I) RED DE HIDRANTES y BIEs: Según el RD 635/2006, el túnel debe disponer de hidrantes cerca de la entrada y en su interior, a intervalos no superiores a 250 metros. El Proyecto Inicial contempla la instalación de BIEs de 25 mm cada 50 m, colocadas al tresbolillo, pero sólo hidrantes en el exterior. La solución sería equipar de una toma de bomberos o hidrante algunas de las BIEs, de tal manera que haya un hidrante cada 250 m en el interior del túnel, además de colocar BIEs de 45 mm en lugar de las previstas de 25 mm. También, debería incrementarse la capacidad del aljibe para el funcionamiento de los hidrantes, ya que el aljibe de 50 m^3 dispuesto en el Proyecto inicial es insuficiente.

Por otra parte, citar que, el Proyecto inicial contempla ciertos aspectos que no son exigidos por el RD 635/2006, pero que suponen una mejora del equipamiento y seguridad del túnel, éstos son:

- Limitación de velocidad de 60 km/h.
- Existencia de semáforos interiores ámbar-rojo con una interdistancia de 300 m para indicar la parada de un coche en el carril.
- Disposición de sensores de NOx electroquímicos cada 50 m.

4. CARACTERÍSTICAS DEL TÚNEL SEGÚN PROYECTO MODIFICADO

A consecuencia del grave incumplimiento del RD 635/2006 por la ausencia de salidas de emergencia, en su día, se tomó la decisión de realizar las siguientes modificaciones con

respecto al Proyecto Constructivo inicial de Junio de 2006:

1) Disposición de una *galería lateral de evacuación en toda su longitud*, con varias *salidas de emergencia*, cumpliendo así fielmente el RD 635/2006, que prescribe habilitar en túneles bidireccionales e interurbanos salidas de emergencia cada 400 m, si no hay retenciones, y cada 150 m, si son esperadas retenciones al menos 5 días al año y no dispongan de control de accesos. Para albergar esta galería de evacuación y las salidas de emergencia (inexistentes en el proyecto original), la sección transversal del túnel ha sufrido, como luego veremos, una importante transformación geométrica respecto a la inicialmente prevista.
2) Consecuencia de estos cambios geométricos en la sección del túnel, también se tomó la decisión de adoptar una *ventilación longitudinal* en lugar de ventilación mixta longitudinal-semitransversal del Proyecto que, según el RD, se podrá utilizar únicamente en los túneles con circulación bidireccional o unidireccional congestionada, si un *Análisis de Riesgos* (conforme al artículo 11) muestra que es aceptable, o bien si se toman medidas específicas, tales como una apropiada gestión del tráfico, una reducción de la distancia entre salidas de emergencia y la colocación de extractores de humo a intervalos adecuados.

Además de estas importantes modificaciones, también se propusieron los siguientes cambios, también necesarios para cumplir el RD 635/2006:

- Colocación de un hidrante cada 250 metros en el interior del túnel e incrementar la capacidad del aljibe.
- Colocación las estaciones de emergencia cada 150 m enfrentadas en ambos hastiales del túnel.
- Redistribución de las estaciones de emergencia para conseguir que los apartaderos existentes dispongan de un puesto de emergencia.
- Colocación de la señalización pertinente para cumplir las normas 8.1 y 8.2 IC.
- Colocación de señales aspa-flecha y CLV cada 400 m.
- Adición a los PMV de 2 filas interiores de una zona gráfica.
- Alimentación desde el SAI del alumbrado de seguridad.
- Disminución de la interdistancia de las luminarias del alumbrado de emergencia a 10 metros.
- Adaptación de los Grupos Electrógenos, que deben dar suministro la totalidad de la ventilación instalada en el interior del túnel.
- Colocación de varias secciones de semáforos de dos y tres aspectos anteriores a las bocas del túnel.

Por otra parte, citar que la longitud total del túnel fue, finalmente, 1.920 metros en lugar de los 1.868 metros inicialmente previstos. El resto del equipamiento del túnel se mantuvo fiel al Proyecto de Construcción inicial.

Lógicamente, dado que el sistema de ventilación propuesto en el Proyecto Modificado fue longitudinal, en fiel cumplimiento del RD 635/2006, fue necesaria la realización de un *Análisis de Riesgos* que mostrase que dicho sistema era aceptable o bien mostrase si era necesario tomar medidas específicas, tales como: una apropiada gestión del tráfico, una reducción de la distancia entre salidas de emergencia o la colocación de extractores de humo a intervalos adecuados.

5. ANÁLISIS DE RIESGOS DEL TÚNEL EN SU NUEVA SITUACIÓN

5.1. METODOLOGÍA

Es importante reseñar que, actualmente, no existe ninguna metodología de *Análisis de Riesgos* aprobada por el Ministerio de Fomento. Es por ello que, este *Análisis de Riesgos* pretende establecer las medidas correctoras necesarias, de forma que, las consecuencias de un accidente en el túnel de Rañadoiro sean iguales o equivalentes a las que se obtendrían si se cumpliera el RD 635/2006.

A partir del análisis de los sistemas internacionales de evaluación del riesgo, de nuestra experiencia acumulada en riesgos de túneles y, por último, tomando como base el proyecto de I+D+i de título: "*Elaboración de una metodología de Análisis de Riesgos en túneles de carretera*", elaborado por la empresa *Euroestudios*, resulta posible la evaluación del nivel de riesgo de un túnel como la probabilidad de que se produzca un incidente multiplicado por sus consecuencias.

En el caso que nos ocupa, no hay ninguna variación de equipamiento o configuración del túnel que modifique sustancialmente la probabilidad de un accidente (mismos anchos, misma pendiente longitudinal, señalización,…), que los exigidos en el Real Decreto 635/2006. Es por ello que, cualquier variación que se obtenga tiene que ir encauzada a que las consecuencias sean las mismas (haciendo que los usuarios del túnel se evacuen de forma segura y que los equipos de emergencia puedan intervenir eficazmente).

Con este *Análisis de Riesgos* se establecen las medidas adicionales de seguridad o equipamiento complementario para alcanzar el nivel de riesgo equivalente al establecido por el Ministerio en su Real Decreto, es decir, equivalente a disponer de ventilación semitransversal.

Para alcanzar este nivel de riesgo equivalente, se decidió adoptar: unas medidas para disminuir el tiempo de evacuación a lugar seguro y otras medidas para facilitar la extinción de un incendio.

5.2. VENTILACIÓN

Como se ha citado anteriormente, el Proyecto Constructivo inicial no presentaba estrictamente una ventilación semitransversal, sino un sistema de ventilación mixto longitudinal–semitransversal de acuerdo al esquema recogido en la Figura 2.

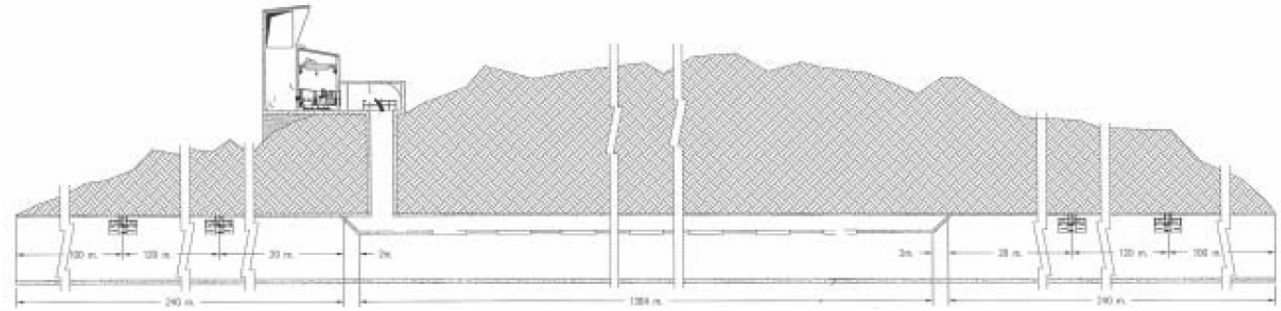

Figura 2. Esquema de ventilación del túnel de Rañadoiro según el Proyecto de Construcción inicial

En las bocas del túnel (y en un tramo de 240 m de longitud) se dispone una ventilación longitudinal con ventiladores tipo jet, que se utilizan para la dilución de contaminantes y, además, para el control de humos en caso de un incendio, si el foco está localizado en las proximidades de las bocas del túnel.

En los 1.384 m centrales del túnel, existe una ventilación semitransversal, con rejillas motorizadas conectadas con una estación de ventilación exterior, que en caso de incendio extraerían el humo. Este sistema de ventilación (semitransversal) está recomendado para túneles de circulación bidireccional largos, es decir, para un túnel como el de Rañadoiro. El RD 635/2006 indica la adopción de este sistema de ventilación para todo el túnel (no sólo para la parte central). En la Figura 3 se observa el esquema de funcionamiento de un sistema de ventilación semitransversal, antes citado.

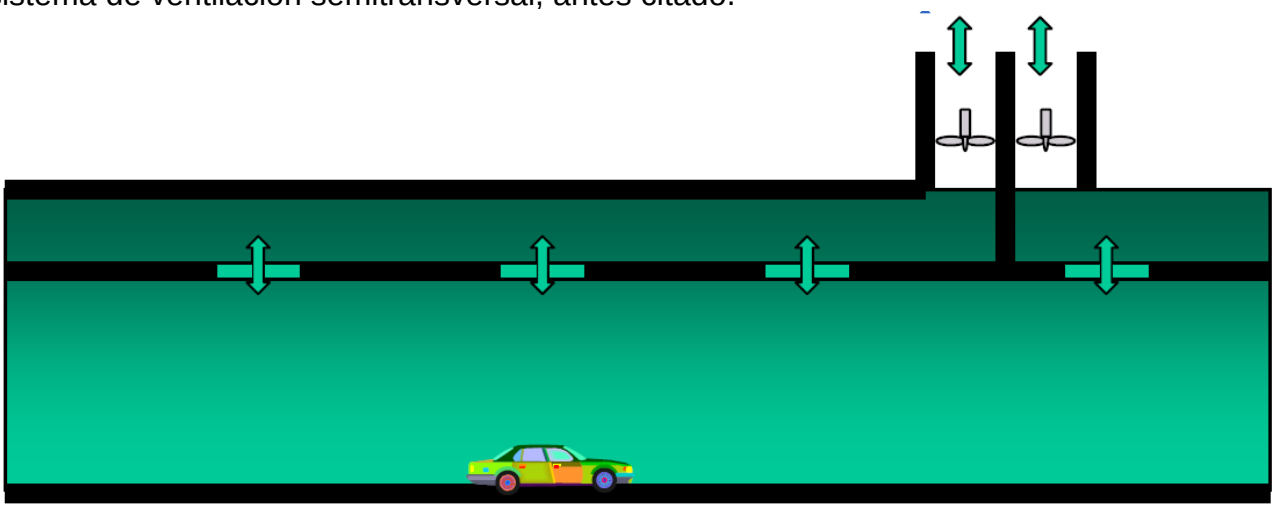

Figura 3. Ventilación semitransversal

La inclusión de una galería longitudinal para uso como vía de evacuación mejora en gran medida las condiciones de seguridad en la evacuación de los usuarios, pero requiere un importante cambio de sección geométrica del túnel. Este cambio de sección dificulta la ejecución de una galería superior a lo largo del túnel para la extracción de humos en caso de incendio, construcción necesaria para la mencionada ventilación semitransversal.

Es por estas causas por las que se planteó, en el Proyecto Modificado, un sistema de ventilación longitudinal, en el cual se disponían ventiladores axiales (de chorro) en el

interior del túnel. Así, el aire se impulsa desde una boca hasta la contraria. En la Figura 4 se observa el esquema de funcionamiento de la ventilación longitudinal.

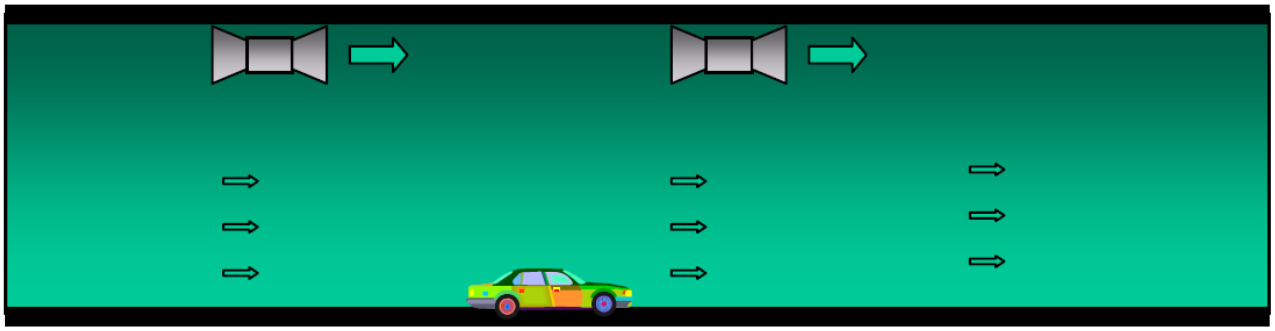

Figura 4. Ventilación longitudinal

Este sistema de ventilación va encaminado a mantener condiciones adecuadas para la explotación, a controlar el humo en caso de incendio, de forma que se mantengan unas condiciones razonables de evacuación y, posteriormente, a facilitar la actuación de los bomberos, en caso de ser necesario.

En el sistema de ventilación longitudinal, en caso de incendio, el humo se impulsaría hacia la boca más cercana, controlando la velocidad durante la fase de evacuación para mantener la máxima zona de humos estratificada. En la Figura 5, gráfico explicativo de "*XVIII Congres Mundial de la Route, publicación de la PIARC (Association Internationale premanente des Congrès de la Route)*", se representa el comportamiento del humo en función de la distancia al foco del incendio en un túnel con ventilación longitudinal.

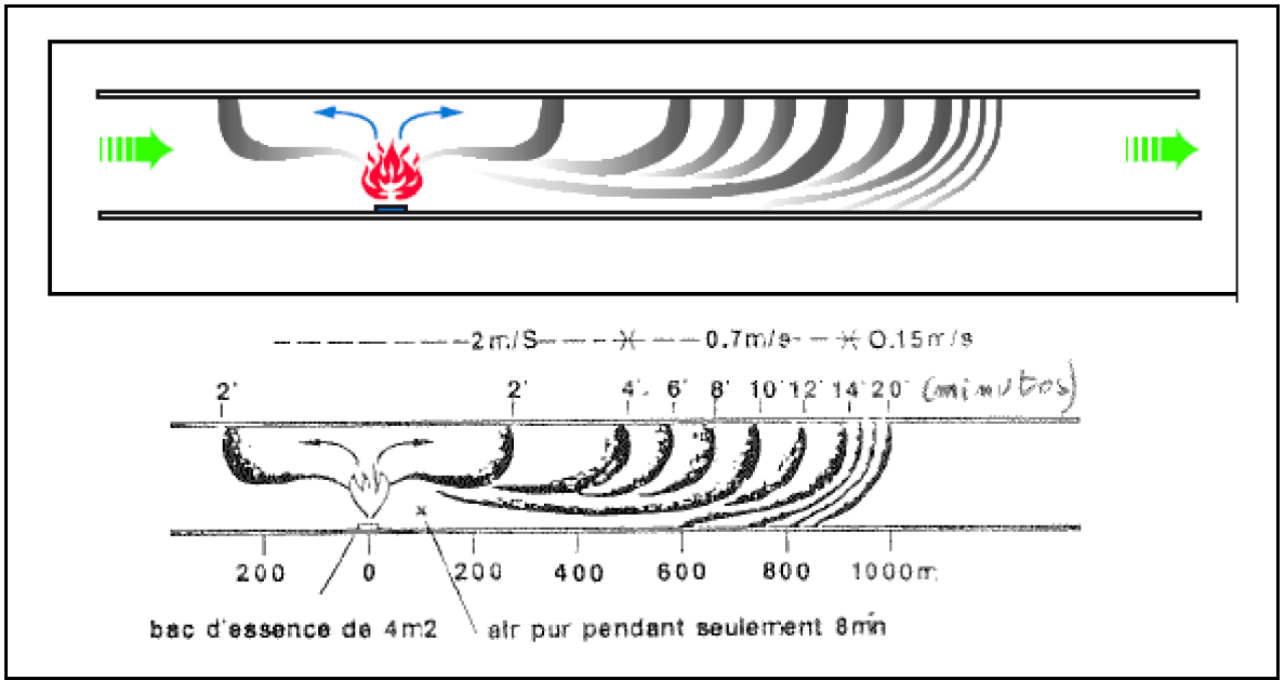

Figura 5. Desestratificación del humo en un sistema de ventilación longitudinal (PIARC)

La diferencia entre un sistema de ventilación semitransversal y uno longitudinal estriba en el control de los humos que, lógicamente, es mejor en el sistema semitransversal que en el longitudinal. El sistema semitransversal facilita la extracción total del humo, a lo largo del

tiempo mantiene condiciones compatibles con la evacuación, mientras que en un sistema longitudinal correctamente diseñado, se realiza un control de humos dejando libre una parte del incendio (aguas arriba) y una zona estratificada (aguas abajo) de unos 500-600 metros a partir de la cual se desestratifica y queda todo el túnel lleno de humo, tal y como se observa en la Figura 5 anterior. Por lo tanto, habrá que ubicar las *Salidas de Emergencia* a una distancia tal, que ocasionado un incendio, las salidas más cercanas se encuentren dentro de la zona libre de humos.

Además, para que el sistema longitudinal tenga igual nivel de seguridad que el semitransversal, se debe, en primer lugar, asegurar que nunca hay congestión, y que nada más producirse un incidente se cierran las bocas de entrada al túnel de forma que se garantice que no se incremente el tráfico en el túnel en torno a 300 m del incidente (sobre todo aguas abajo del mismo).

5.3. DISPOSICIÓN DE SALIDAS DE EMERGENCIA

Como ya se ha mencionado a lo largo de la presente comunicación, el principal incumplimiento del Proyecto Constructivo inicial radicaba en no contemplar la existencia de salidas de emergencia dispuestas en el interior del túnel.

El RD 635/2006 indica que para un túnel de las características del de Rañadoiro se disponga un sistema de ventilación semitransversal y se sitúen salidas de emergencia cada 400 m. Si se produce un incendio en el túnel se extraería la capa de humo mediante rejillas situadas en torno a la zona del incendio (normalmente del orden de unos 300 m), no habría desestratificación del humo, lo cual permitiría la evacuación de los ocupantes por las salidas de emergencia colocadas cada 400 metros (según RD 635/2006), tal y como se representa en la Figura 6.

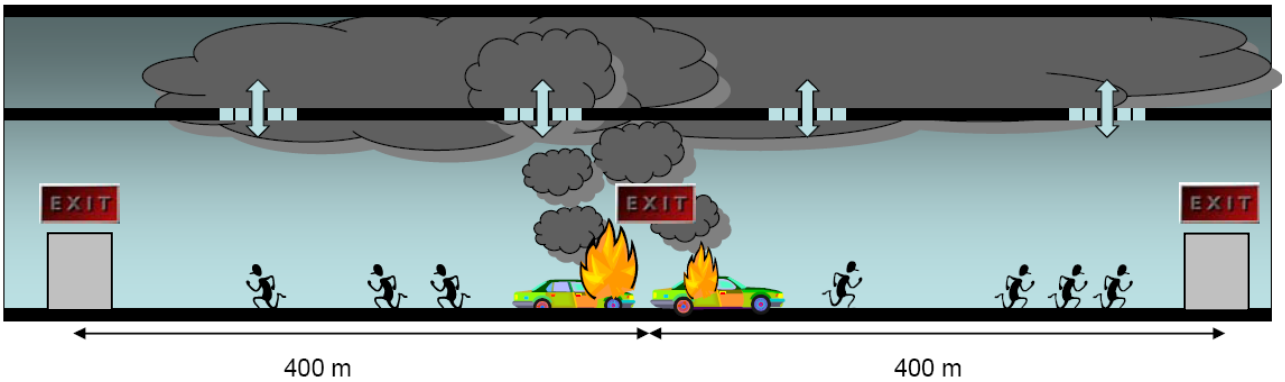

Figura 6. Evacuación durante incendio en el caso de ventilación semitransversal y salidas de emergencia cada 400 m

Sin embargo, si en el túnel se dispone un sistema de ventilación longitudinal, como es el caso que nos ocupa, no se extraerá el humo, sino que se controla su movimiento dirigiéndolo hacia la boca más cercana. Las salidas de emergencia deben estar a una distancia menor que el comienzo de la desestratificación. Según la Figura 5, se deduce que las salidas de emergencia deberán estar situadas una distancia aproximada de unos 300 metros entre sí.

En el caso específico de este túnel de Rañadoiro, al ser su longitud 1.920 m, se colocaron las salidas de emergencia cada 320 m aproximadamente (ver Figura 7). Además, se hizo

coincidir una de las salidas con el apartadero más cercano a la boca Norte.

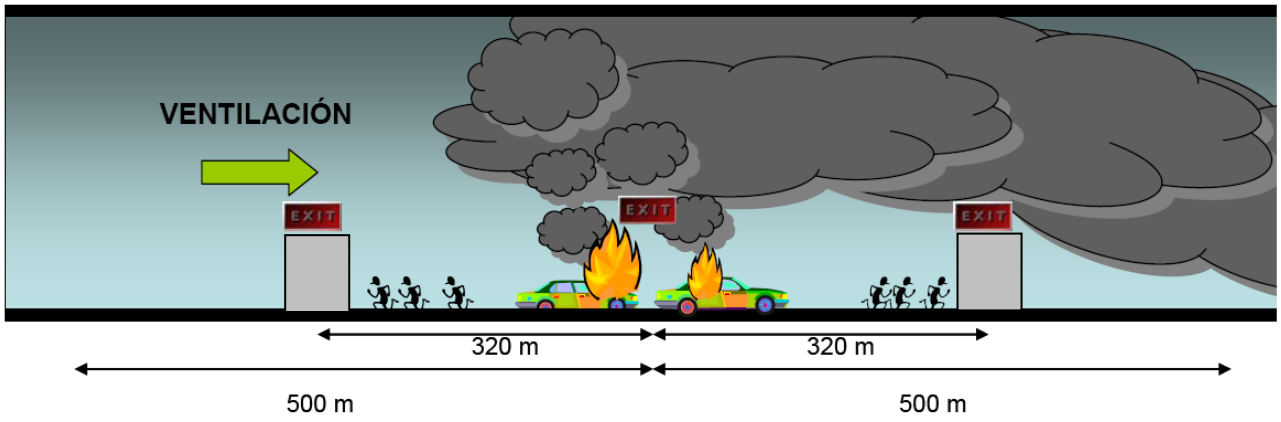

Figura 7. Evacuación en caso de incendio según el Proyecto Modificado del Túnel de Rañadoiro

5.4. TIEMPOS DE EVACUACIÓN

Según las *Normas Técnicas de Prevención* publicadas por el *Ministerio de Trabajo, NTP 436*, en el caso de una persona adulta sin impedimentos físicos, la velocidad de desplazamiento horizontal se podría estimar a razón de *1 m/s*, y el tiempo de detección que se debe considerar será menor de 1 minuto para el caso de haber central de alarma automatizada. Por lo tanto, en los cálculos del Proyecto Modificado se consideró una velocidad de evacuación de 1 m/s y un tiempo de respuesta de 1 minuto.

Así, el tiempo necesario para evacuar el túnel con la disposición del Proyecto inicial (sin salidas de emergencia) puede ser un tiempo máximo de 33 minutos (si el incendio se produce en las inmediaciones de una boca y se debe evacuar por la boca contraria).

$$t_{lugar\ seguro} = t_{respuesta} + t_{evacuación} = 60\ s + 1920\ m / 1\ m/s = 33\ minutos$$

Si se produce un incendio en un túnel que cumpliera estrictamente el RD 635/2006, con ventilación semitransversal, y las salidas de emergencia dispuestas cada 400 m, se extraería la capa de humo entorno a 600 m de la zona del incendio. Por lo tanto, todas las personas que se encontraran en el túnel podrían llegar a lugar seguro en un tiempo máximo de 7,67 minutos.

$$t_{lugar\ seguro} = t_{respuesta} + t_{evacuación} = 60\ s + 400\ m / 1\ m/s = 7{,}67\ minutos$$

Para este cálculo, se supone que el incendio bloquea una salida y los usuarios tienen que recorrer un máximo de 400 m hasta la siguiente salida de emergencia, tal y como se ha indicado en la Figura 6.

Se ha concluido en apartados anteriores que si el túnel dispone de un sistema de ventilación longitudinal, las salidas de emergencia deberán estar distanciadas 320 metros entre sí, aproximadamente. Aplicando nuevamente la fórmula anterior, se disminuye el tiempo de llegada a lugar seguro a 6,33 minutos.

$$t_{lugar\ seguro} = t_{respuesta} + t_{evacuación} = 60\ s + 320\ m / 1\ m/s = 6{,}33\ minutos$$

Por lo tanto, la colocación de las Salidas de Emergencia cada 320 m en lugar de 400 m, hace que se disminuya el tiempo de llegada a lugar seguro (pasaría de 7,67 minutos a 6,33 minutos), con lo que se optimiza el tiempo de evacuación de los usuarios.

5.5. EQUIPOS DE EXTINCIÓN

Lógicamente, al recortar la interdistancia entre Salidas de Emergencia también se facilita el acceso hasta el incendio a los servicios de emergencia una vez se haya evacuado el interior del túnel y, por tanto, se reduce también el tiempo de actuación de dichos servicios.

Para facilitar a los bomberos la extinción de un hipotético incendio, la medida que se debe tomar es sustituir las BIEs previstas en el Proyecto Constructivo inicial de 25 mm, por BIEs de 45 mm a intervalos regulares (de 50 metros) a tresbolillo, de forma que los bomberos puedan emplearlas. También se aconseja que haya al menos un extintor cada 50 metros en ambos hastiales del túnel para que los usuarios tengan la posibilidad de atajar los pequeños incendios en su fase inicial.

Se desaconsejan las BIEs de 25 mm, ya que estos dispositivos son poco efectivos para los bomberos y para incendios que tengan cierta envergadura, y su manejo por los usuarios es algo complicado, por lo que es más recomendable que estos empleen los extintores.

Se debe colocar un hidrante cada 250 metros en el interior del túnel, tal y como se indica en el RD 635/2006.

El Proyecto tiene previsto la instalación de barreras físicas motorizadas conectadas con los subsistemas de control, de tal forma que en caso de congestión, siniestro o incendio en el túnel desciendan y corten el acceso de vehículos (acompañado de semáforos, señales luminosas y acústicas).

6. NUEVA SECCIÓN TRANSVERSAL ADOPTADA EN EL TÚNEL

Según el RD 635/2006: *"Las salidas de emergencia permitirán a los usuarios del túnel utilizarlas para abandonar el túnel sin sus vehículos y llegar a un lugar seguro en caso de accidente o incendio y también proporcionarán acceso a pie a los servicios de emergencia del túnel. Dichas salidas podrán ser:*

- *Salidas directas del túnel al exterior.*
- *Conexiones transversales entre tubos del túnel.*
- *Salidas a galería de emergencia."*

Además, *"En el diseño de las salidas de emergencia, y vías de evacuación se prestará especial atención a la seguridad de las personas con discapacidad"*.

Debido a que el Túnel de Rañadoiro está constituido por un solo tubo y la posibilidad de ejecutar salidas directas al exterior es económicamente y medioambientalmente inviable (zona ambientalmente sensible perteneciente al Parque Natural de Fuentes del Narcea y

de Ibias), resulta que la única alternativa viable es la ejecución de una galería de evacuación, así como la adopción de salidas de emergencia a dicha galería.

Fueron varias las alternativas planteadas para la ubicación de dicha galería de evacuación y/o emergencia. En una primera instancia, se planteó la ejecución de un tubo paralelo al tubo principal, de menor sección, y con galerías de conexión entre ambos cada 200-300 m. No obstante, esta opción quedó descartada por el importante incremento de coste y plazos de ejecución que ello suponía.

Es por ello que, en su día, se planteó la posibilidad de situar la galería de evacuación dentro del mismo túnel principal. A su vez, se plantearon dos alternativas más, en lo referente a la situación de esta galería respecto a la calzada. La primera alternativa consistía en la ubicación de la galería de evacuación en la parte inferior del túnel principal, es decir, por debajo de la calzada y la segunda alternativa, consistía en ubicar la galería en un lateral del túnel principal, esto es, a la misma cota de la calzada.

Desde un punto de vista geotécnico (complicada geología del macizo atravesado por el túnel, inmerso en una estructura tectónica compleja), la primera alternativa se consideró del todo desaconsejable, debido a que el eje del túnel discurre prácticamente paralelo al rumbo de la estratificación que, en general, presentaba un buzamiento de unos 60º y una intensa fracturación. Además, la excavación posterior de la galería de evacuación por debajo de la solera, o simultáneamente a la excavación del túnel, como una fase más de excavación, implicaba reducir la zona de apoyo de la bóveda. Más aún, debido al buzamiento de los estratos, esta disposición obligaba, en el mejor de los casos, a instalar una serie de elementos de refuerzo del sostenimiento, para evitar el descalce de la bóveda a favor de la fracturación existente. Puesto que el funcionamiento de estos elementos podía no ser del todo fiable, se concluyó en la necesidad de realizar el cierre del túnel mediante contrabóveda en toda su longitud, lo que implicaba un aumento de sección considerable y los consecuentes retrasos en el ciclo de construcción.

Además, la necesidad de conectar la galería de emergencia con la calzada y cumplir con el requerimiento de accesibilidad a personas discapacitadas, es decir, mediante rampas con pendientes limitadas, tanto en inclinación como en longitud (*Ley 5/1995, de 6 de abril, de promoción de la accesibilidad y supresión de barreras del Principado de Asturias*); obligaba a realizar unas excavaciones perpendiculares al eje del túnel de unos 15 m a 20 m de longitud, en cada una de las salidas de emergencia.

Ante las dificultades que planteaba la opción de situar la galería por la parte inferior del túnel, bajo la calzada, se planteó la segunda alternativa de situar la galería de emergencia por un lateral del túnel, excavándose simultáneamente al resto del túnel y separándose mediante un tabique adecuado. Esta opción implicaba, en principio, un aumento de la sección del túnel, puesto que el ancho necesario para la galería de emergencia se suma al ancho necesario para el cumplir el gálibo horizontal del túnel. En cambio, no suponía un aumento en el área de excavación, comparándola con la sección necesaria para cumplir el gálibo horizontal más el área necesaria para la galería por la parte inferior y, lógicamente, muy inferior al requerido en el caso de tener que excavar contrabóveda en el túnel.

Por otra parte, todas las dificultades geotécnicas que plantea la primera alternativa (galería bajo la calzada), en esta segunda se veían reducidos y, aún más, incluso minimizandos los condicionantes no geotécnicos para la excavación del túnel.

Es por ello que, se concluyó como mejor alternativa, la segunda, con la ubicación de la galería de emergencia en un lateral, y a la misma cota que la calzada del túnel principal. Ésta fue la solución finalmente adoptada (ver Figura 8).

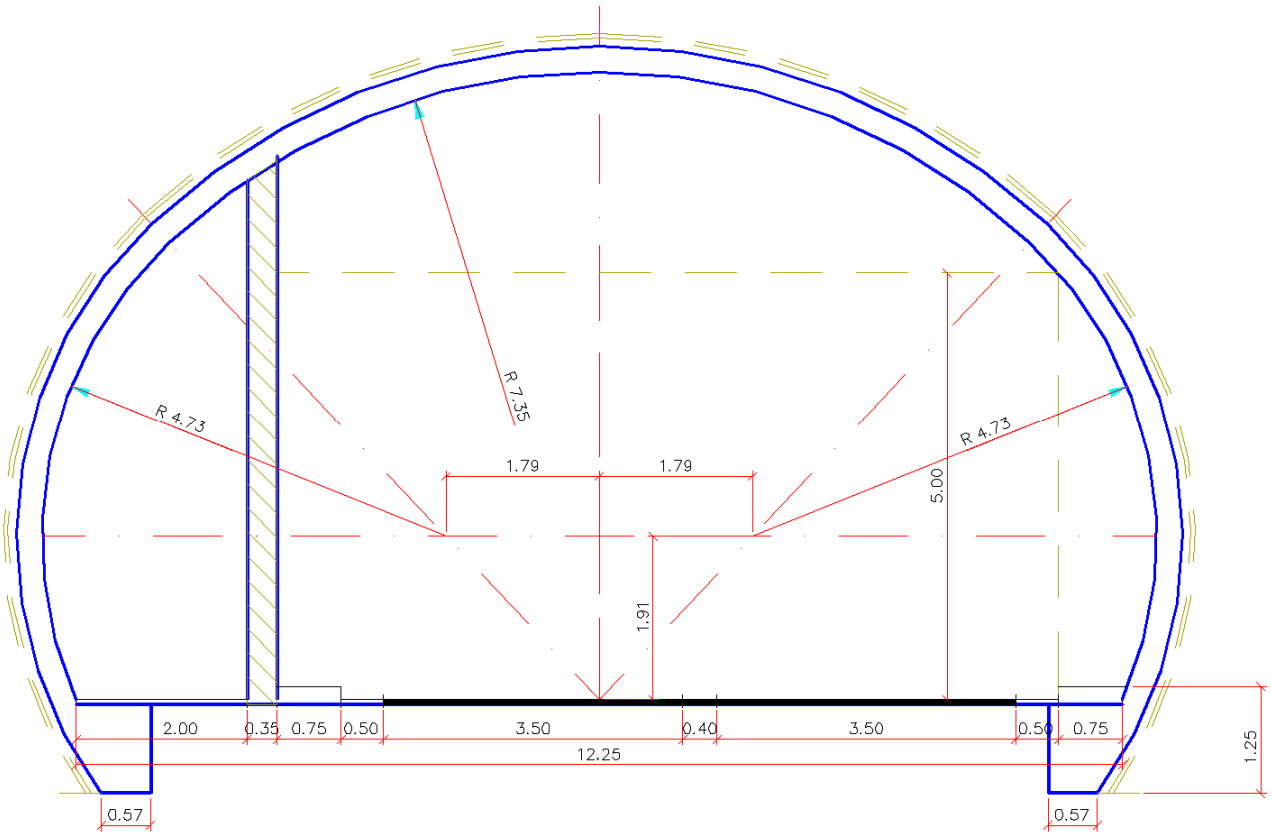

Figura 8. Nueva sección transversal adoptada en el túnel de Rañadoiro

Además de esta nueva sección transversal, existía la necesidad de diseñar nuevas secciones "especiales" de mayor gálibo horizontal debido:

- por una parte, a que se tenía la necesidad de conectar la galería de evacuación con la calzada mediante las salidas de emergencia que incluyeran un vestíbulo de seguridad (lógicamente, no puede estar comunicado directamente la calzada con la galería de evacuación). A esta sección se la denominó: "*sección especial con salidas de emergencia*" (ver Figura 9), en la que se necesitaba ampliar el gálibo horizontal 2,20 m, respecto a la sección normal.
- por otra, a que se tenía también la necesidad de incluir un apartadero en cada sentido de la marcha del tráfico. A esta sección se la denominó "*sección especial de apartadero*". En principio, se necesitaban dos a lo largo del túnel y en aquella, en la que el apartadero coincidía en el mismo lado que la galería de emergencia, se pudo incluir una salida de emergencia más. En la Figura 10, puede verse que se necesitó ampliar el gálibo horizontal 2,50 m, respecto a la sección normal.

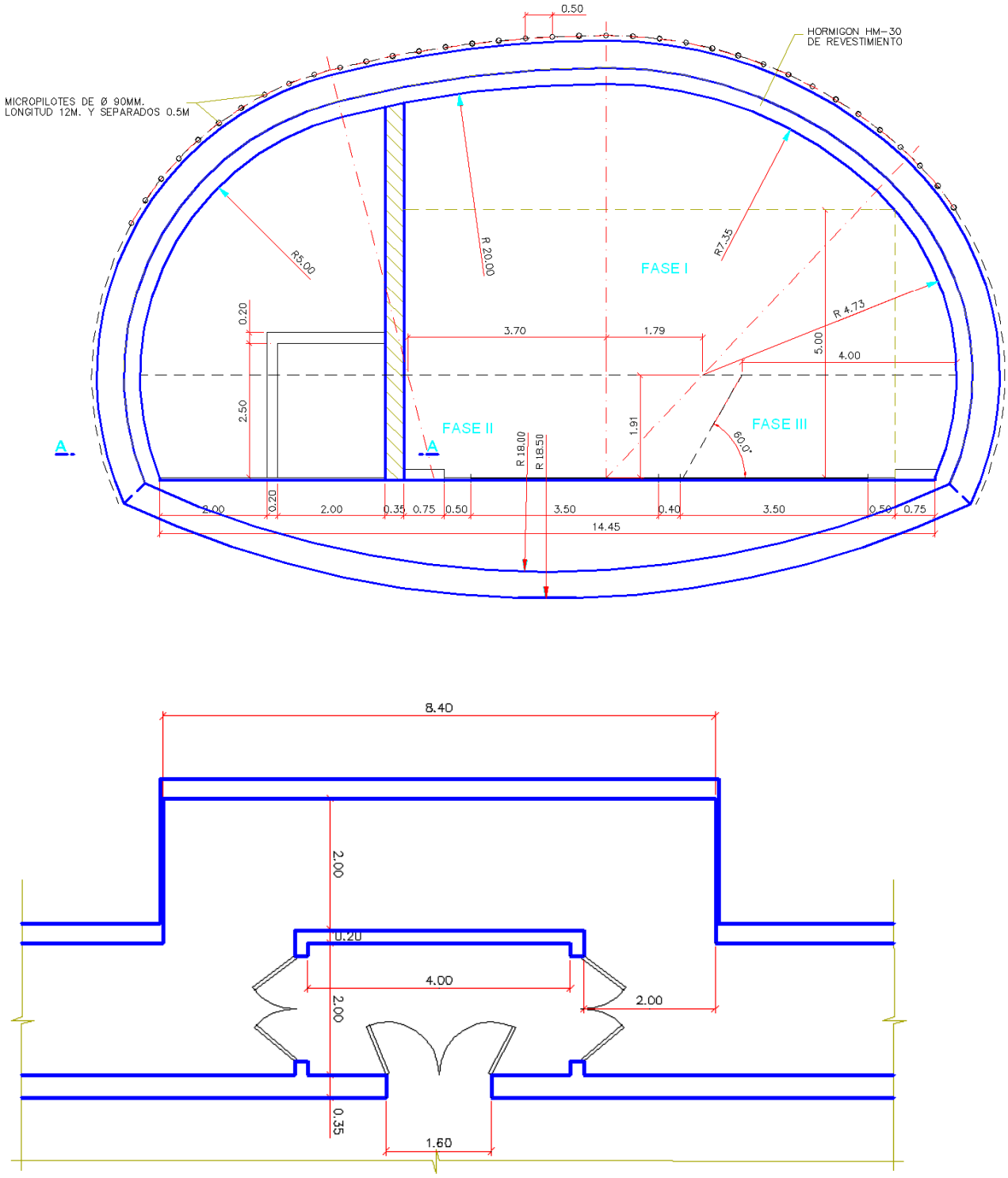

Figura 9. Nueva sección transversal especial adoptada con salida de emergencia

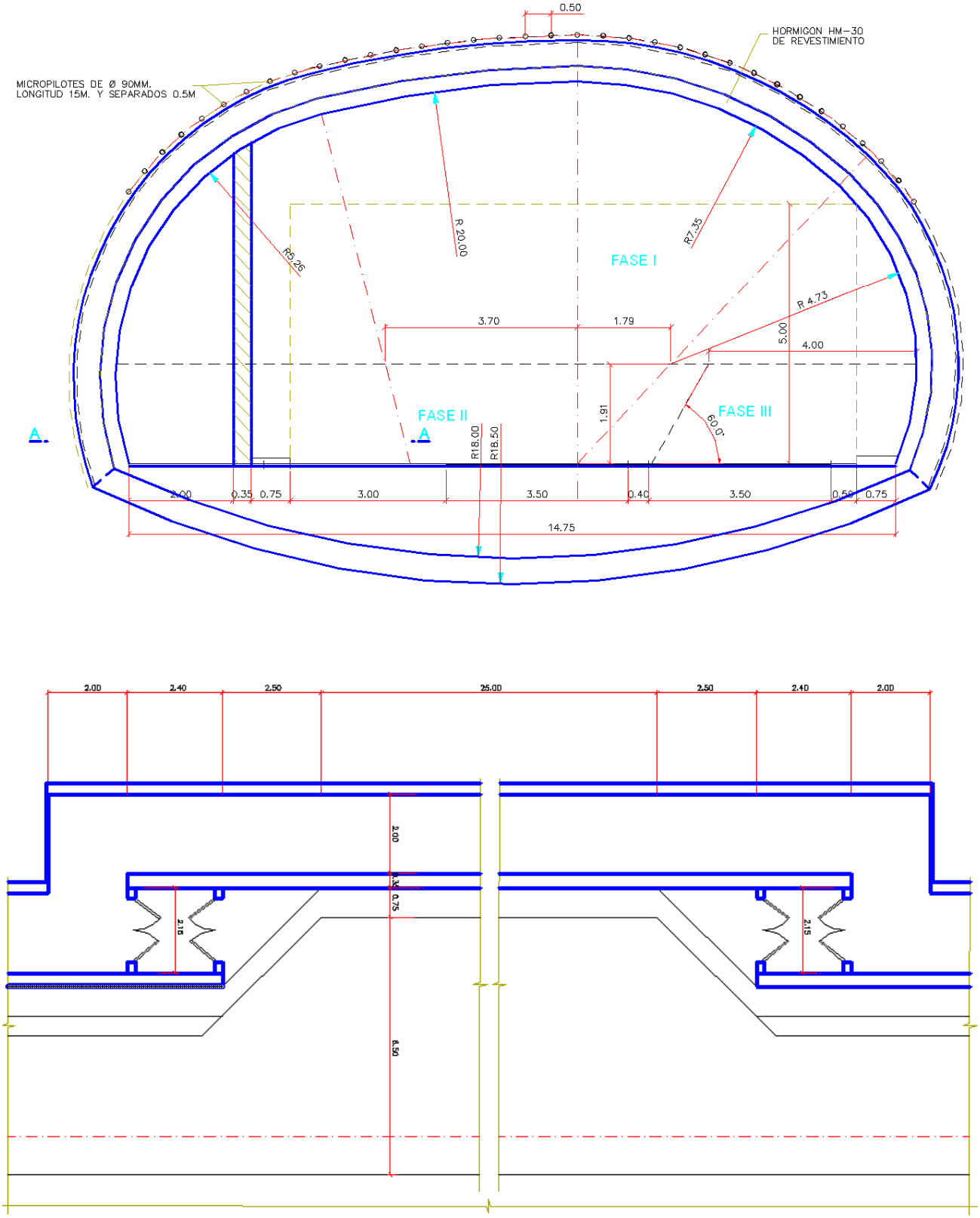

Figura 10. Nueva sección transversal especial adoptada de apartadero con salida de emergencia

7. CONCLUSIONES

En este comunicación se muestran los estudios realizados para la adaptación al Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en túneles de carretera del Estado, del *Túnel de Rañadoiro* incluido en el "*Proyecto de Construcción de la Variante de la Carretera As-15, Cornellana-Puerto De Cerredo, en el Puerto del Rañadoiro*", sito en el Principado de Asturias.

El Túnel de Rañadoiro, es un único *tubo bidireccional*, con una *longitud superior a 1.000 m* y una *IMD por carril superior a 1.000 vehículos*. Así pues, se trata de un túnel correspondiente a la tipología correspondiente al apartado 2.21.2.1.1 del Real Decreto 635/2006.

Entre otros muchos requisitos, el Real Decreto define que el equipamiento mínimo debe incluir salidas de emergencia. El Proyecto Constructivo inicial contempla todo el equipamiento mínimo exigido para cumplir el Real Decreto 635/2006, excepto las salidas de emergencia.

A consecuencia de este *grave incumplimiento del RD 635/2006 por la ausencia de salidas de emergencia*, en su día, se tomó la decisión de realizar las siguientes modificaciones con respecto al Proyecto Constructivo inicial de Junio de 2006:

1) Disposición de una *galería lateral de evacuación en toda su longitud*, con varias *salidas de emergencia.* Para albergar esta galería de evacuación y las salidas de emergencia, la sección transversal del túnel sufrió una importante transformación geométrica respecto a la inicialmente prevista.
2) También se tomó la decisión de adoptar una *ventilación longitudinal* en lugar de ventilación mixta longitudinal-semitransversal del Proyecto inicial, que según el RD se podrá utilizar únicamente en los túneles con circulación bidireccional o unidireccional congestionada, si un *Análisis de Riesgos* mostrase que resultaba aceptable.

La adopción de un sistema de ventilación longitudinal en el túnel de Rañadoiro, obligó a adoptar unas medidas adicionales, que se concretaron en el Análisis de Riesgos en su día realizado, para alcanzar un nivel de seguridad equivalente al establecido por el Ministerio en su R.D. 635/2006. Dichas medidas fueron las siguientes:

- Disposición de Salidas de Emergencia cada 320 m, aproximadamente.
- Disposición de BIEs de 45 mm cada 50 m, colocadas a tresbolillo.
- Disposición de extintores cada 50 m en cada hastial del túnel.

Además, para que el Proyecto Modificado cumpla el RD 635/2006 fue necesario corregir algunos puntos ya mencionados:

- Colocar un hidrante cada 250 m en el interior del túnel e incrementar la capacidad del aljibe.
- Colocar las estaciones de emergencia cada 150 m enfrentadas en ambos hastiales del túnel.
- Redistribuir las estaciones de emergencia para conseguir que los apartaderos existentes dispongan de un puesto de emergencia.

- Colocar la señalización pertinente para cumplir las normas 8.1 y 8.2 IC.
- Colocar señales aspa-flecha y CLV cada 400 m.
- Añadir a los PMV de 2 filas interiores una zona gráfica.
- Alimentar desde el SAI el alumbrado de emergencia y parte del de seguridad.
- Disminuir la interdistancia de las luminarias del alumbrado de emergencia a 10 metros.
- Los Grupos Electrógenos deben dar suministro la totalidad de la ventilación instalada en el interior del túnel.

Por último, y por su especial relevancia, citar la profunda remodelación estudiada en la adopción de la sección del túnel para albergar las galerías de evacuación y las salidas de emergencia. La novedosa solución finalmente adoptada, consistente en situar la galería de emergencia por un lateral de un túnel, excavándose simultáneamente al resto del túnel, ha supuesto un cambio radical de su geometría, así como un aumento de la sección del túnel, puesto que el ancho necesario para la galería de emergencia se suma al ancho necesario para cumplir el gálibo horizontal del túnel. Sin embargo, no ha supuesto un incremento del área de excavada, no penalizando, en consecuencia los costes ni los plazos de ejecución del túnel de Rañadoiro.