



CRUCE SUBTERRÁNEO RUTA NACIONAL N°51 BAJO FC BELGRANO RAMAL C14- SAN ANTONIO DE LOS COBRES – Pcia. De SALTA

Koller, Stella Maris. Ingeniera civil. - Re, Pablo Martín. Ingeniero Civil †.
CADIA S.A. – GREEN S.A. – VIALIDAD NACIONAL.
rekollering@gmail.com

RESUMEN

Este trabajo abarca el proyecto completo del cruce de la Ruta Nac N° 51, entre las progresivas 22+500 y 22+560, y las vías del Ramal C14 del FC Belgrano, conocido popularmente como “tren a las nubes”. Este proyecto surge por la transformación de la traza de la ruta 51, conformando una circunvalación a la localidad de San Antonio de los Cobres en Salta, fue desarrollado en el año 2016.

La obra consta de un túnel de 60 metros de longitud y 10m de luz, con muros de contención a la entrada y a la salida de entre 20 y 60 metros de largo. El túnel está conformado por una cáscara abierta, con un tramo central horizontal superior y dos tramos curvos de transición entre las paredes laterales verticales y el techo. Las paredes del túnel descansan sobre zapatas corridas que se vinculan entre sí con puntales ubicados a 1m por debajo de la calzada.

La construcción del túnel se realizó cielo abierto. La obra fue inaugurada en 2019.

ABSTRACT

This work covers the complete project of the crossing of the National Route No. 51, between the progressive 22 + 500 and 22 + 560, and the railway branch C14 of FC Belgrano, popularly known as “train to the clouds”. the project was born from the need to have a road that surrounds the town of San Antonio de los Cobres in Salta without crossing it as happened with the national route 51.

The development of this project was carried out in 2016

The work includes a tunnel 60 meters long and 10m wide, with retaining walls at the entrance and exit between 20 and 60 meters long. The tunnel is made up of an open shell, with an upper horizontal central span, and two curved transition sections between the vertical side walls and the roof. The tunnel walls are supported by continuous footings that are linked to each other with struts located 1m below the road.

The construction of the tunnel was carried out with open pit excavation and was inaugurated in 2019.



1.- ALCANCE

El trabajo encomendado, requería la realización del proyecto ejecutivo de las estructuras necesarias para el cruce de la Ruta N° 51 y vías del ferrocarril Belgrano ubicada en la localidad de San Antonio de los Cobres, provincia de Salta.

En este informe se presentan las alternativas para el túnel, estudiadas en etapa de anteproyecto en forma resumida, y la solución estructural adoptada finalmente, de manera más detallada.

En una primera etapa, se verificaron las secciones consideradas como más críticas para la comparación de diferentes soluciones con algunos estados de cargas supuestos como los más desfavorables, tanto para la sección típica del túnel, como para el sector de muros más alto.

Luego de aceptada la propuesta considerada como más conveniente, en el cálculo definitivo se contemplaron todos los estados de cargas posibles y se incluyeron los dimensionamientos y verificaciones en todas las secciones necesarias.

El proyecto completo también abarca los muros de sostenimiento a la entrada y salida del túnel. Pero de estas estructuras se hará solo una mención al final de este trabajo.

2.- ESTUDIO DE ALTERNATIVAS.

El primer estudio de distintas alternativas para resolver la estructura soporte para el cruce subterráneo, abarcó diferentes tipologías comenzando por un sistema de pórticos, separados 5m, de 10m de luz y 5.10m de altura libre según los requerimientos del gálibo previsto para esta vía de comunicación.

Entre dichos pórticos (Fig. 1), se disponía una placa como losa de techo y placas laterales, paredes, que transmitirían a la estructura principal de los pórticos las cargas de tapada de suelo, tren, empujes, etc.

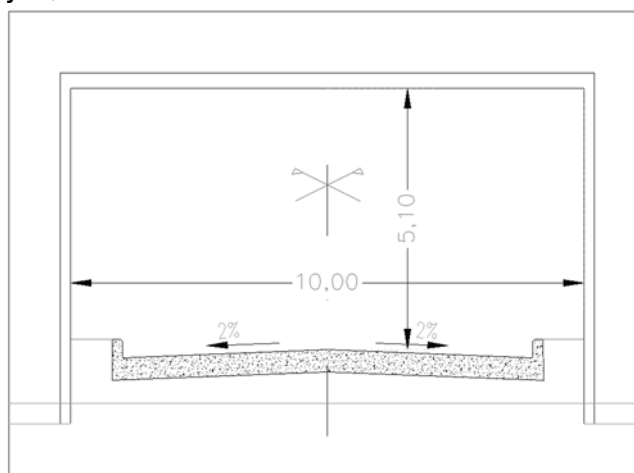


Figura 1. - Alternativa estructura aporticada 1

El resultado del análisis de esta primera propuesta fue descartado por las importantes dimensiones de las secciones de hormigón requeridas (el travesaño resultaba con una sección de 50cm de ancho y 150cm de altura mínima).

Se intentó mejorar la propuesta realizando pórticos cuyo travesaño tuviera el eje quebrado para reducir la luz de flexión (Fig. 2), pero no se logró una disminución significativa en las solicitaciones.

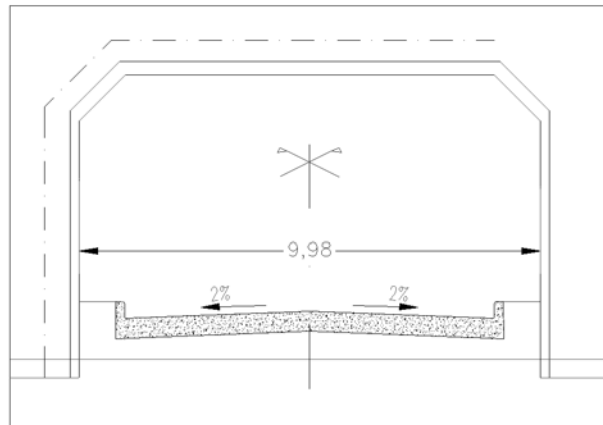


Figura 2. - Alternativa estructura aporcada 2

Finalmente se analizaron estructuras típicas de túneles, con diferentes secciones transversales, conformadas por elementos laminares sin nervaduras, es decir tabiques y cáscaras que resistieran las cargas con un comportamiento mixto membranal y flexional, y no únicamente flexional como ocurría preponderantemente con los diseños anteriores.

Así se evaluaron varias propuestas con diferentes directrices para la sección transversal (Fig. 3), y se optó por la que mejor comportamiento tiene, en cuanto a la forma de trabajo de la estructura para la absorción de esfuerzos (Fig. 4). La limitación en altura, era de mínima (gálibo interior) y de máxima. Por encima, el nivel de vía era fijo, por lo que las alternativas de mayor altura y mejor comportamiento estructural fueron descartadas.

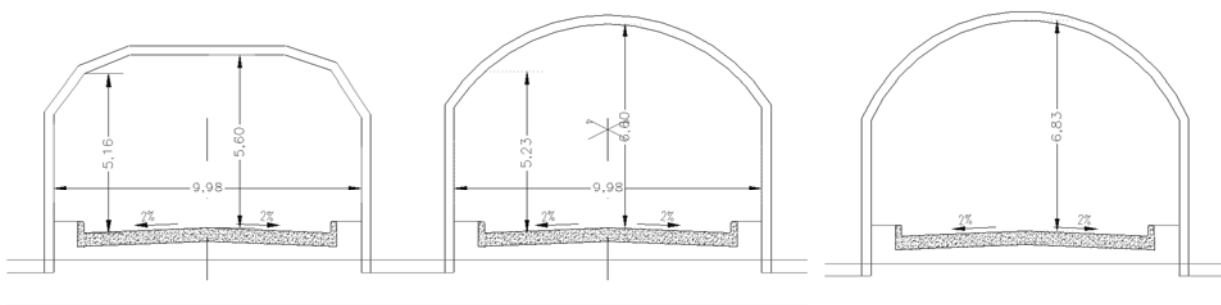


Figura 3. – Alternativas con cáscaras.

La estructura del túnel consta básicamente (Fig. 4) de tabiques laterales encardados de tomar los empujes horizontales y de transmitir a la fundación las cargas provenientes del techo del túnel.

El techo está conformado por una cáscara, que tiene un tramo central horizontal y dos tramos curvos en los extremos que conectan con los tabiques laterales. La estructura trabaja en conjunto paredes y techo, como una única cáscara de 35cm de espesor y solo se lo ha diferenciado aquí de manera descriptiva.

Las paredes del túnel rematan en su borde inferior, en una zapata corrida de 60cm de espesor y 195cm de ancho que distribuye la carga sobre el terreno de fundación. El ancho de la zapata surge de la consideración de la resistencia del suelo obtenida del informe del estudio geotécnico.

Las zapatas están unidas cada 5m por un puntal de 40cmx60cm.

Los empujes horizontales son variables a lo largo del túnel y diferentes a un lado y a otro del mismo. Es decir distintos empujes para tabique derecho e izquierdo. Esto sucede debido a que la traza de la ruta recorre un terreno con pendiente transversal.

La construcción del túnel se realizará a cielo abierto y luego se rellenará con el mismo suelo obtenido de la excavación, esta mención del método constructivo es importante a la hora de determinar las cargas de empuje horizontal de suelo.

Se incluyó en el proyecto ejecutivo, la definición de la secuencia de etapas constructivas. Se elaboró un plano con plantas y cortes donde se especificó el orden de ejecución del relleno, una vez realizado el túnel y habiendo alcanzado la resistencia requerida del hormigón.

3.- GEOMETRÍA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL TÚNEL

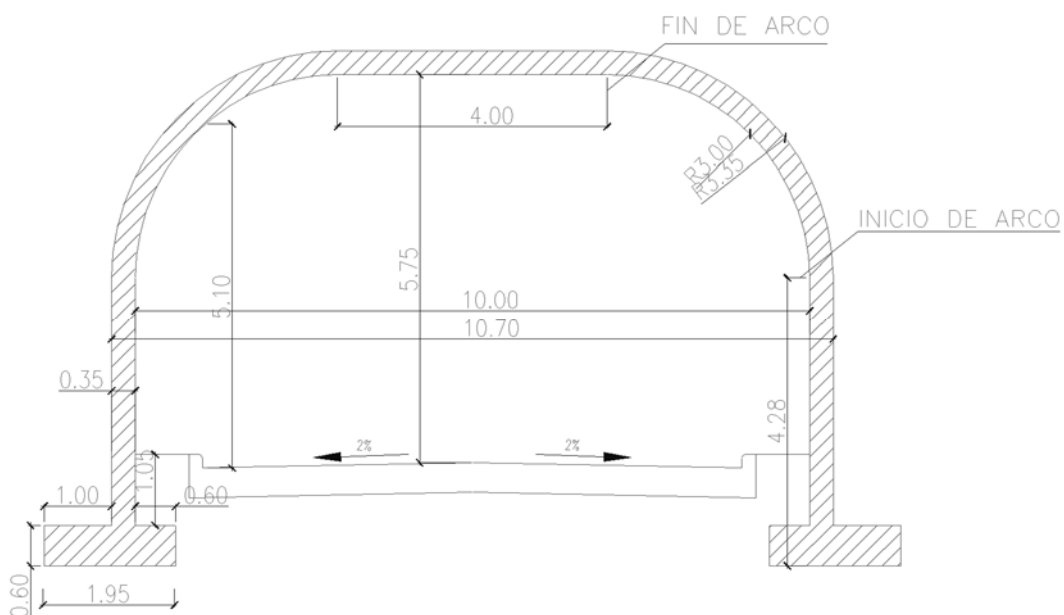


Figura 4. – Alternativa elegida.



Figura 5. – Túnel ejecutado.

4.- ANÁLISIS DE CARGAS

Las cargas que inciden sobre el túnel son las siguientes:

4.1.-Peso propio de la estructura, (considerado en forma automática por el software de cálculo).

4.2.-Tapada de suelo sobre el techo. Se evalúan las tapadas sobre el techo del túnel en distintas progresivas acorde va cambiando la topografía del terreno. Se considera como peso específico del suelo: $\gamma_{\text{suelo}} = 2.0\text{t/m}^3$ En la Fig. 6 se presenta un esquema con la determinación de la tapada según las progresivas y el valor de la carga considerada. También se coloca la carga vertical del suelo de relleno sobre la zapata exterior del muro, según la altura que alcance el relleno y sobre la solera interior con una altura de 1m de suelo y vereda.

En la parte abovedada superior del túnel, sector curvo, se contempla el aumento de la altura de tapada, considerando 2 escalones, uno desde el nivel del techo hasta la mitad del arco, y otro escalón desde la mitad hasta la finalización del arco. Para calcular los valores de la carga, se tomaron las alturas en la mitad de cada semiarco: en el primer escalón $H_1=1.25\text{m}$, y en el segundo $H_2=1.75\text{m}$.

Carga vertical de la tapada sobre la solera exterior: **4.0t/m^2** .

4.3. Empuje lateral del terreno sobre las paredes del túnel. Se tienen en cuenta dos estados de cargas de empujes, uno en etapa constructiva y otro ya en estado definitivo con todo el relleno colocado sobre el túnel y a los costados.

4.3.1- Empuje de suelo en Estado definitivo: Vialidad Nacional requiere que, para el empuje activo del terreno sobre las paredes del túnel, se considere el coeficiente de empuje en reposo del suelo de relleno, y establece los siguientes parámetros para el cálculo:

Coef. empuje en reposo: $K_0=0.5$; Ángulo de fricción interna: $\phi= 30^\circ$; $\gamma_{\text{suelo}}= 2.0 \text{ t/m}^2$

Empujes sobre las paredes.

$$E_H = K_0 \cdot \gamma_{\text{suelo}} \cdot H \quad (1)$$

H: altura medida desde el nivel superior del relleno.

Como la tapada varía no sólo a lo largo del túnel sino que también a cada margen del mismo, en Fig. 7 se visualizan los distintos diagramas de empuje de suelo adoptados según las progresivas y según sea margen derecha o izquierda del túnel.

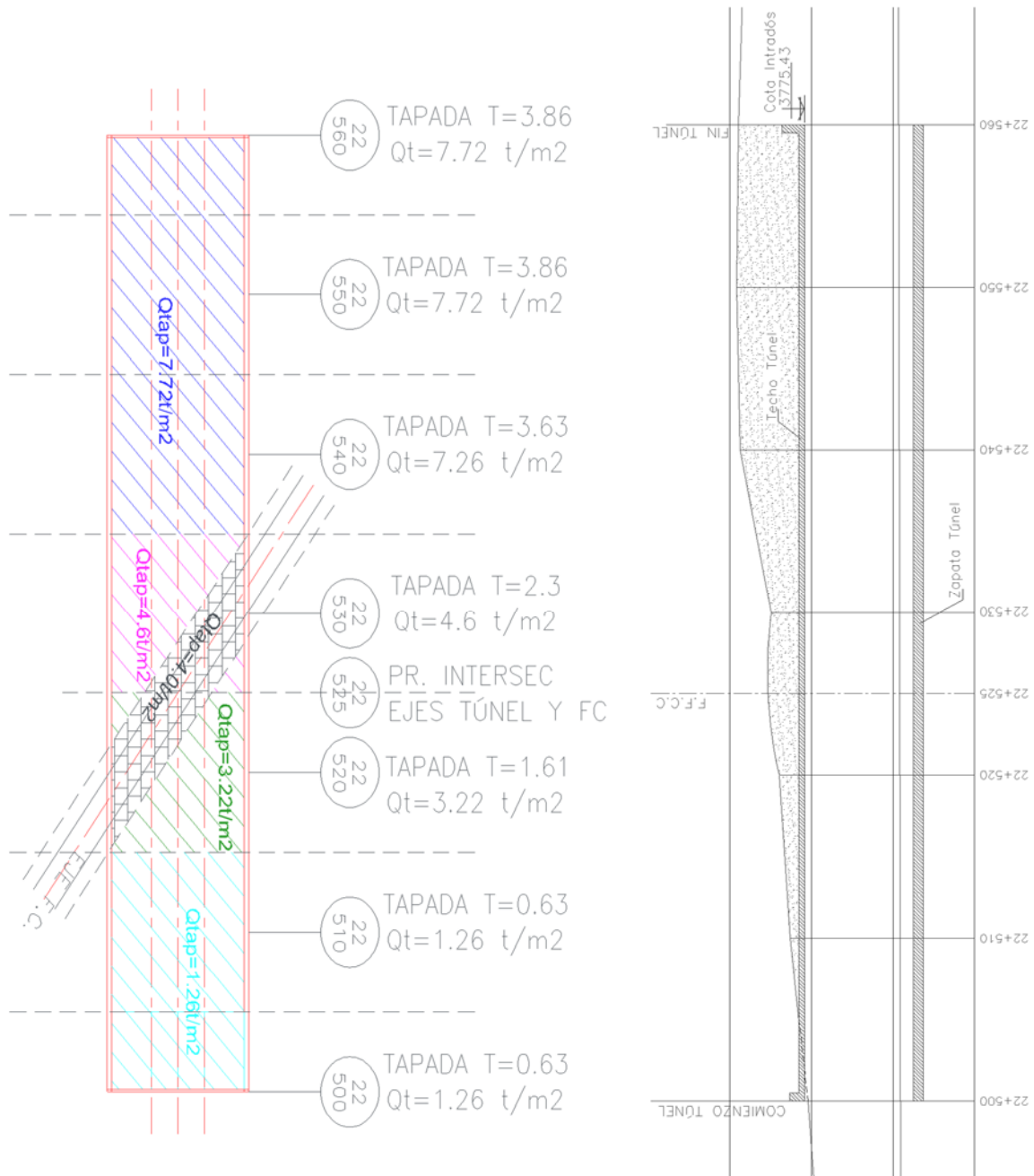


Figura 6. – Cargas de tapada.- Corte longitudinal

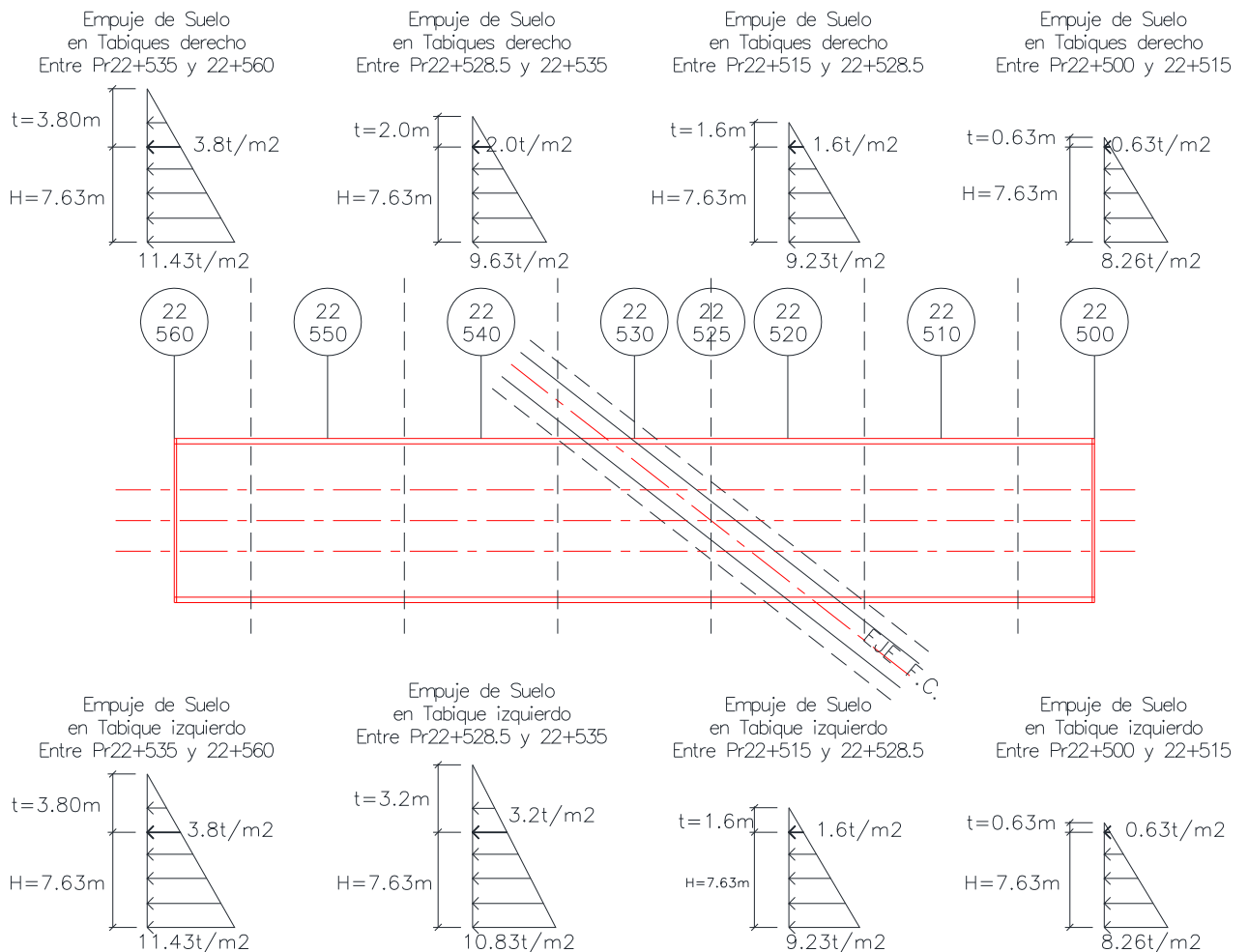


Figura 7. – Empujes s/paredes.

4.3.2- Empuje de suelo en estado constructivo.

Este estado supone que el túnel está totalmente hormigonado y la ejecución del relleno de suelo ha avanzado sobre un solo lado del túnel hasta una altura de 2m, de manera que resulta un estado de carga netamente **asimétrico**.

En este estado el coeficiente de empuje activo se toma: $K_a = 0.333$

$$E_H = K_a \cdot \gamma_{\text{suelo}} \cdot H \quad (2)$$

Para tener en cuenta el efecto dinámico de la compactación se considera en la combinación correspondiente, un coeficiente de impacto de 1.5, esta hipótesis es conservadora ya que el efecto dinámico es localizado, solo donde se está compactando el suelo, y no en todo el largo del túnel simultáneamente.

De acuerdo a la Ec. (2), el empuje horizontal es un diagrama triangular donde el valor máximo inferior es **1.333t/m²** y el superior a los 2m vale cero.



4.4.- Cargas del Tren – Según Reglamento de Ferrocarriles Argentinos

La vía en cuestión tiene una trocha igual a 1m.

De acuerdo al reglamento mencionado debe disponerse un tren con dos locomotoras, una a continuación de la otra y luego una sucesión infinita de vagones.

El reglamento indica que las cargas se disipan, desde el extremo de los durmientes abriéndose con una pendiente 1:2. Por lo tanto como hay una tapada de 2m en el sector de las vías, sobre el techo del túnel las cargas se distribuyen en un ancho de 4m.

4.4.1- Conjunto: Rieles + Durmientes

Rieles: $q_r = 50\text{kg/m}$

Durmientes: $q_d = 87\text{kg/m}$

4.4.2-Tren-Carga Vertical

+Coeficiente de impacto $\phi = 1.20$

+Carga Total Locomotora $Q_L = 140\text{ ton}$

+Longitud de la locomotora con el tender $L_{Loc} = 19.5\text{m}$

Carga con impacto s/túnel: $q_{Loc} = \phi \times Q_L / (L_{Loc} \times 4\text{m}) = 1.2 \times 140\text{ton} / (4\text{m} \times 19.5\text{m})$

$$q_{Loc} = 2.154\text{ t/m}^2$$

Comparando la longitud que ocupan dos locomotoras contiguas, 39m, respecto a la dimensión del túnel (ancho exterior 10.7m), la peor posición es: ambas locomotoras dispuestas simétricamente sobre el túnel.

4.4.3- Frenado del Tren

Según el reglamento la carga horizontal de frenado es igual a la séptima parte de la carga vertical. Se establece como hipótesis, que la carga horizontal de frenado también se disipa de acuerdo a lo descrito en el punto 4.4. Entonces, la carga longitudinal de frenado sobre las vías, se transmite de los rieles a los durmientes, de los durmientes al balasto y al suelo disipándose como mencionamos. Por lo tanto, esta fuerza, causará sobre el techo un esfuerzo rasante según el eje de la vía, y sobre el tabique que se encuentra del lado que viene el tren, un incremento del empuje horizontal.

La carga ha sido evaluada considerando que la primera locomotora frena sobre el techo del túnel: $q_{fr} = 140\text{t} / (19.5\text{m} \times 4\text{m} \times 7) = 0.256\text{ t/m}^2$

4.5- Empuje de Suelo por Efecto del Sismo

El efecto sísmico provoca sobre el túnel un estado de empujes asimétrico como puede verse en los diagramas representados más abajo. Según la Norma NAA80, pag.58:

$$E_{as} = E_a + \Delta E_{as}$$

E_{as} : Empuje activo total durante el sismo.

E_a : empuje activo estático

ΔE_{as} : incremento del empuje activo durante el sismo

DIAGRAMAS DE EMPUJES PARA SECCIONES MÁS SOLICITADAS (Prgr. 22.535 a 22.550)

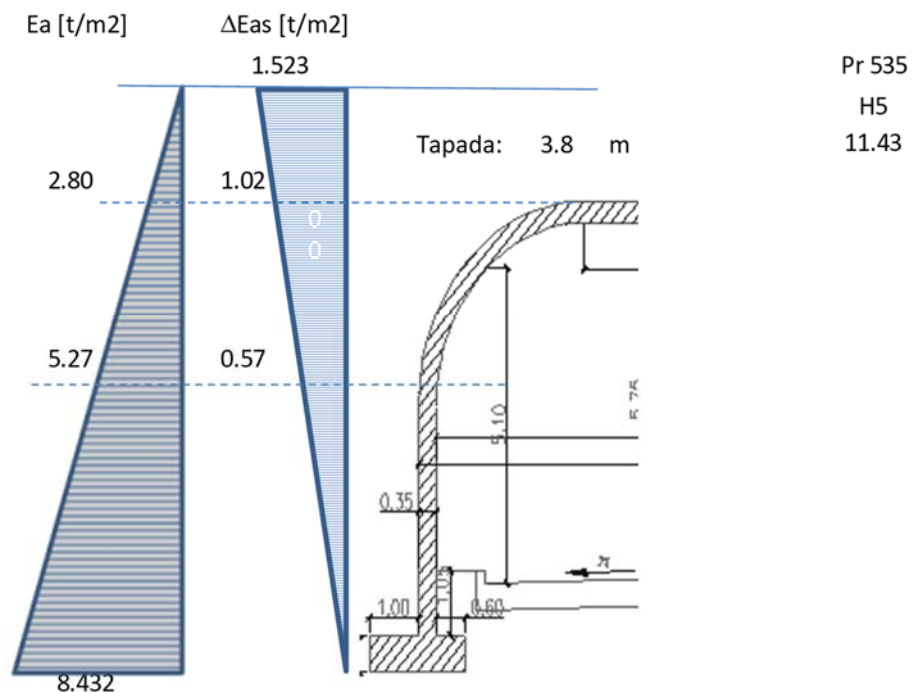


Figura 8. – Empujes por efecto sísmico

4.6. Combinaciones de estados de cargas básicos

COMB1: DEAD + TAPADA + (RIELES+DURMIENTES) + $E_{H_{suelo}}$

COMB2: DEAD + TAPADA + (RIELES+DURMIENTES) + $E_{H_{suelo}}$ + TREN + FRENADO

COMB3: DEAD + $E_{H_{suelo}}$ (h=2m Etapa ejecución de relleno)

COMB4: 0.7 DEAD + 0.7 $E_{H_{suelo}}$ (sismo) + 0.7 TAPADA + 0.7 TREN

5. MODELO ESTRUCTURAL DEL TÚNEL.

Se modela la estructura del túnel completo (60m) con elementos de cáscara de 40cm x 50cm, y 35cm de espesor para paredes y cáscara curva. El tramo central del techo comienza con 35cm de espesor en el extremo de arco y termina con un espesor de 39cm en el eje del túnel, lo que obliga a definir diferentes tipos de elementos. La variación de los valores y tipos de cargas imponen el estudio de la estructura en forma espacial (Fig. 9).

En lo que respecta a las paredes en su parte inferior se vinculan a elementos de placa de 60cm de espesor, que representan a la zapata corrida. A estos elementos se les asigna un vínculo elástico (apoyo sobre el terreno) cuya constante de rigidez es el coeficiente de balasto del terreno de fundación. Este dato se obtiene a partir de lo descrito en el informe geotécnico.

Se considera entonces un coeficiente de balasto vertical = 12.800t/m^3 .

Los puntales que unen las zapatas cada 5m, se modelan con elementos de barra de 40x60. También con elementos de barras se modelan los contrafuertes en los tímpanos extremos a la entrada y a la salida del túnel.

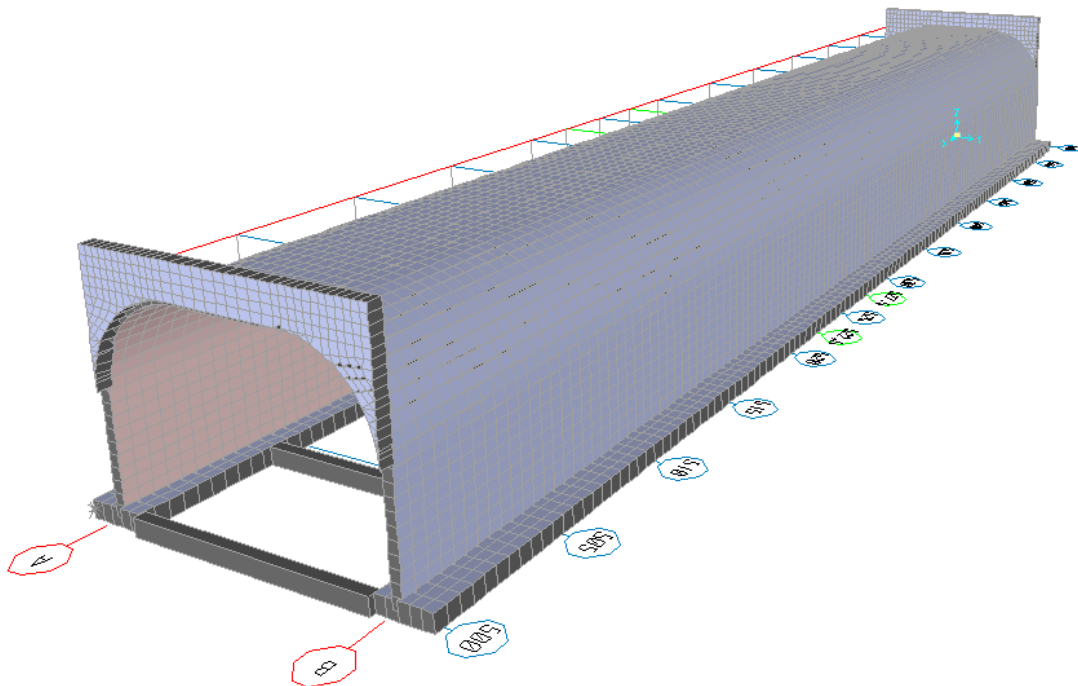
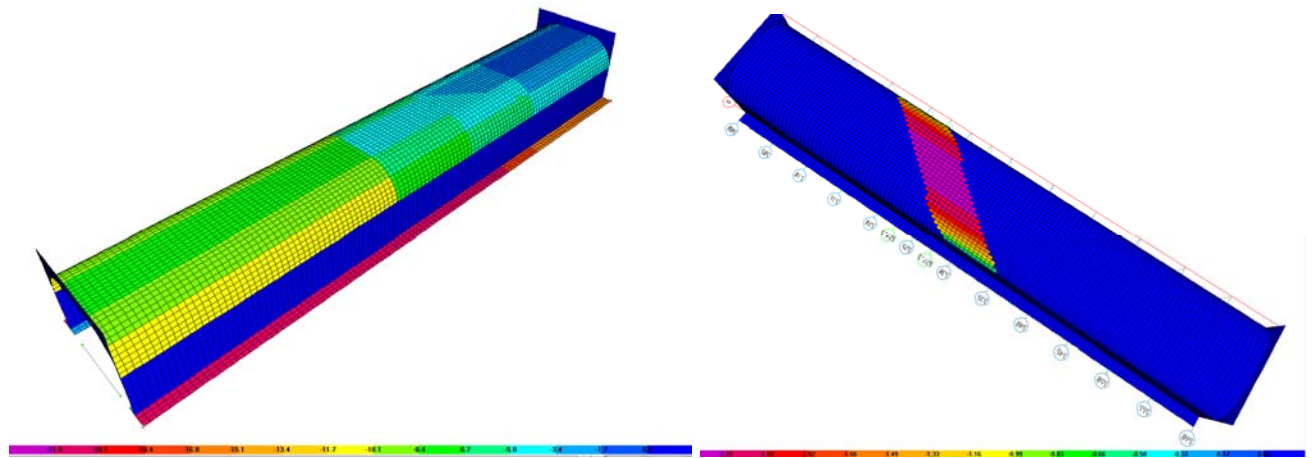


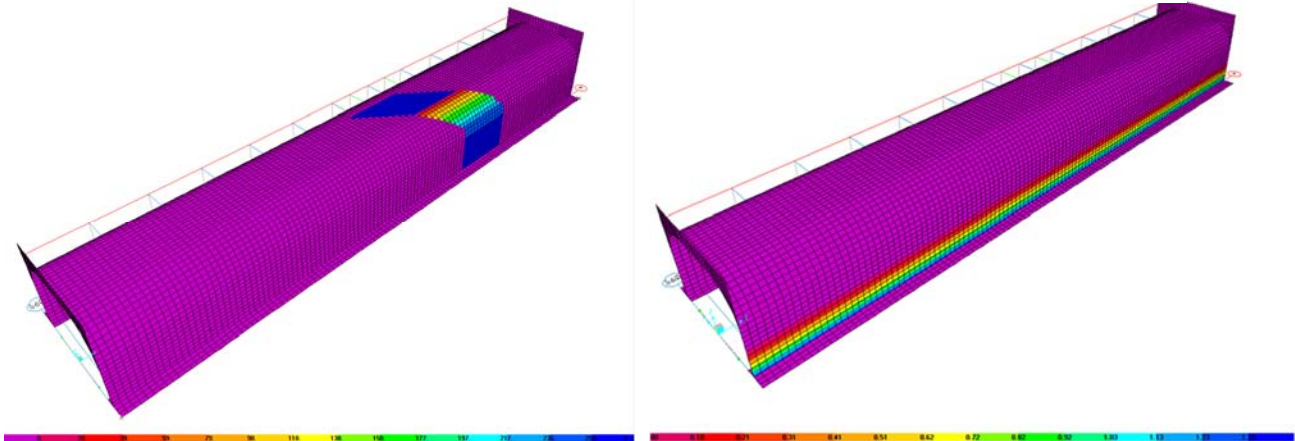
Figura 9. – Modelo estructural

A continuación se muestran una serie de gráficos ilustrativos donde se ven algunos de los estados con las cargas aplicadas sobre el modelo estructural.



“tapada” sobre túnel

Tren sobre túnel



Frenado del Tren sobre túnel

*Empuje Horizontal de suelo
(etapa constructiva $H_{relleno}=2m$)*

Figura 10. – Cargas aplicadas al modelo





6.- ANÁLISIS DE RESULTADOS, VERIFICACIONES Y DISEÑO DE ARMADURAS.

6.1.- Deformaciones.

La deformación máxima relativa en el techo del túnel alcanza **0.02m** que representa una relación de Luz/**500**, lo que constituye un valor aceptable, y posible de compensar contraflechando el encofrado.

El descenso máximo a nivel de la zapata de fundación resultó de **0.53cm** (con el coeficiente de balasto estimado) en el sector de tapada máxima.

6.2.- Verificaciones del Terreno de Fundación.

La tensión admisible indicada en el estudio de suelos, es el incremento de cargas que el terreno puede resistir en su estado natural. Dicho esto, como la tapada sobre la solera se colocó como carga externa, la tensión admisible total resulta de sumarle al valor del estudio de suelos la carga de la tapada.

Por lo tanto, la tensión admisible del contra la que se comparan tensiones bajo la zapata, resulta:

$$\sigma_{adm}^* = 66.1t/m^2 + \gamma_s \cdot h^*$$

Donde:

+ 66.1t/m² es la tensión admisible según informe estudio de suelos.

+ $\gamma_s \cdot h^*$ es la carga por la tapada a la profundidad h^* .

En el sector de máxima tapada $h^* = 10.85m$. El valor de la tensión admisible es:

$$\sigma_{adm}^* = \mathbf{87.8 t/m^2} = \mathbf{8.78 kg/cm^2}$$

Las máximas tensiones se dan, justamente, en el sector de tapada máxima, cercano a la PR22+560 para la COMB1, en el borde exterior de la zapata y llegan a un valor de: $\sigma_{vmax} = \mathbf{73.9 t/m^2}$ y en la esquina de la zapata $\mathbf{74.8 t/m^2}$. Siempre valores inferiores a la tensión admisible.

Respecto a la seguridad al deslizamiento, solo tiene sentido verificarla cuando en la etapa constructiva, se coloca relleno de un solo lado (COMB3). Las zapatas de cada tabique están unidas por puntales separados entre sí 5m a lo largo de todo el túnel. Esto hace que las zapatas trabajen en conjunto frente a la posibilidad del deslizamiento, por lo que se tienen en cuenta las reacciones totales verticales y horizontales para realizar dichas verificaciones. Estas reacciones se obtienen del procesamiento de la estructura para la COMB3. Este procedimiento es válido ya que las cargas verticales son constantes a lo largo del todo el túnel (Peso propio estructura y tapada de altura 2m de relleno sobre el lado exterior de la zapata).

$RH_{tot} = \mathbf{119.35 tn}$: Reacción horizontal máxima.

$RV_{tot} = 1983.81$ tn: Reacción vertical concomitante con la horizontal máxima.
La verificación al deslizamiento, es en verdad la verificación de la resistencia al corte del suelo: $N \times \text{tg}(2/3 \phi) + c \times A_{efect} \times 0.5$ que tiene en cuenta tanto la fricción como la cohesión. Pero considerando que el valor la cohesión es susceptible a las variaciones de humedad en el terreno, no se la tiene en cuenta.

Resistencia al corte del suelo $Hs_{tot} = 1983.81 \text{ tn} \times \text{tg}(2/3 \times 36^\circ) = 883.2 \text{ tn}$

El coeficiente de seguridad vale $v = Hs_{tot}/RH_{tot} = 883.2\text{tn}/119.35\text{tn} = 7.4 \gg 1.5 \text{ B.C.}$

6.3. SOLICITACIONES.

Los diagramas de solicitaciones que se presentan corresponden a la combinación de cargas más desfavorable, que contemplan los siguientes estados básicos:

- +Cargas Muertas (peso propio y cargas permanentes)
- +Tapada del suelo de relleno sobre el túnel.
- +Durmientes y balasto.
- +Empujes de suelo.
- +Acciones del tren (tanto verticales como horizontales, cargas de peso propio, frenado, etc.)

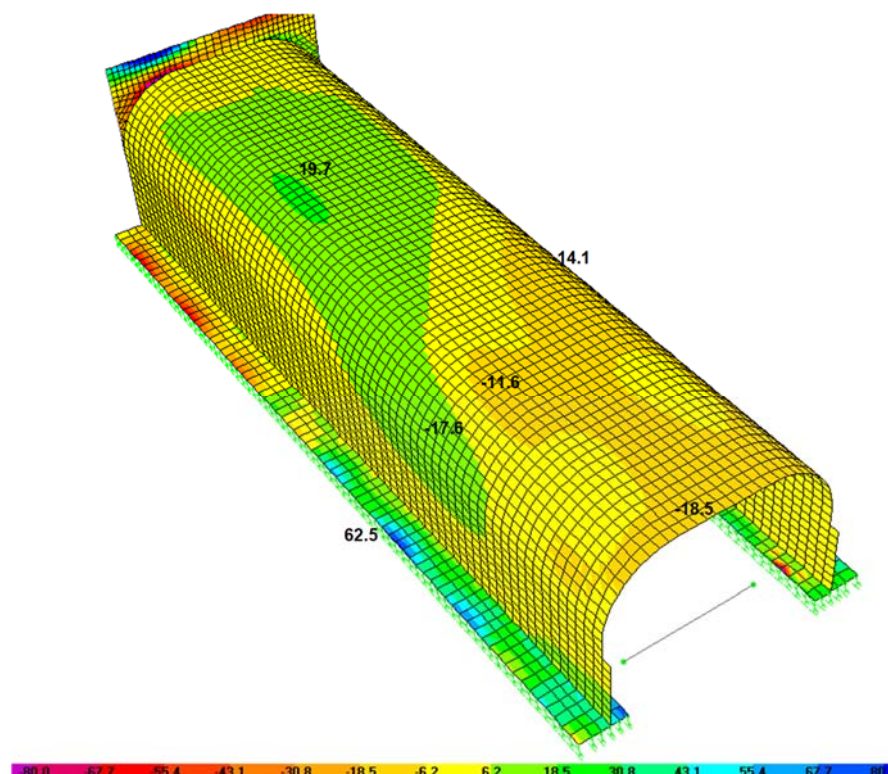


Figura 11. – $F11$ [tn/m] (esfuerzo normal en sentido long.) Tracción: (+). Compresión: (-)

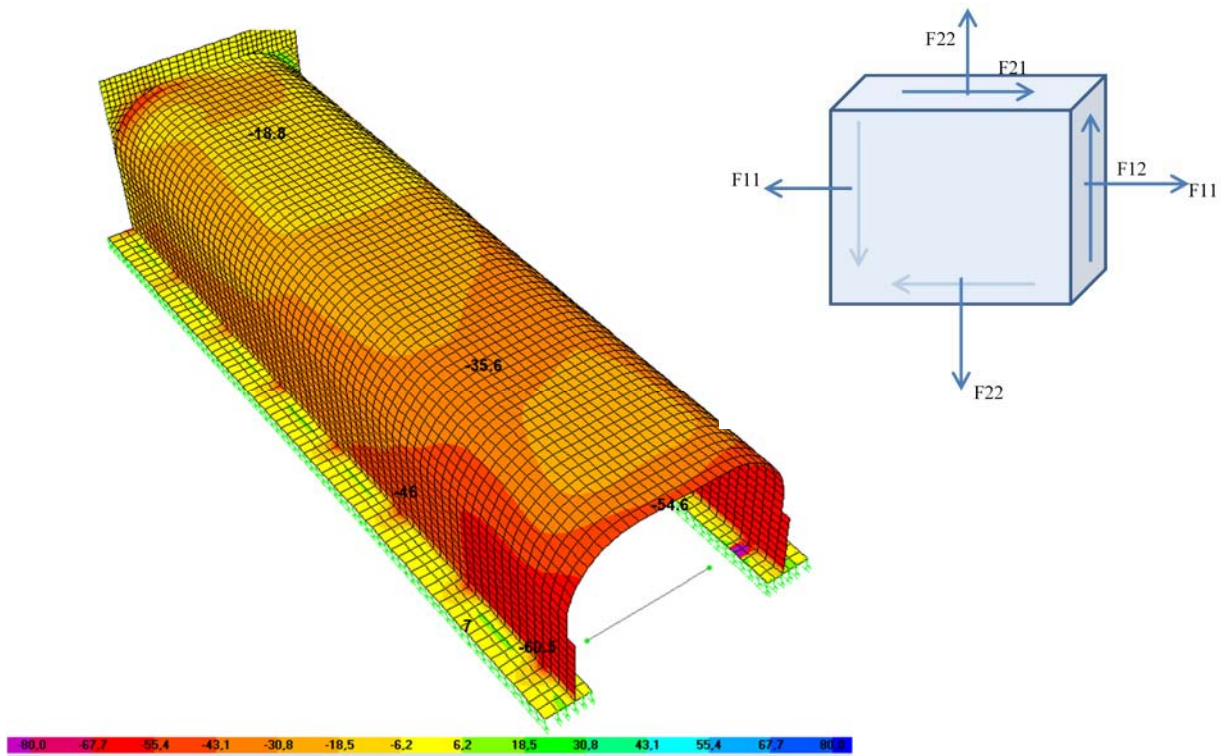


Figura 12. – F_{22} [tn/m] (esfuerzo normal en sentido transv)

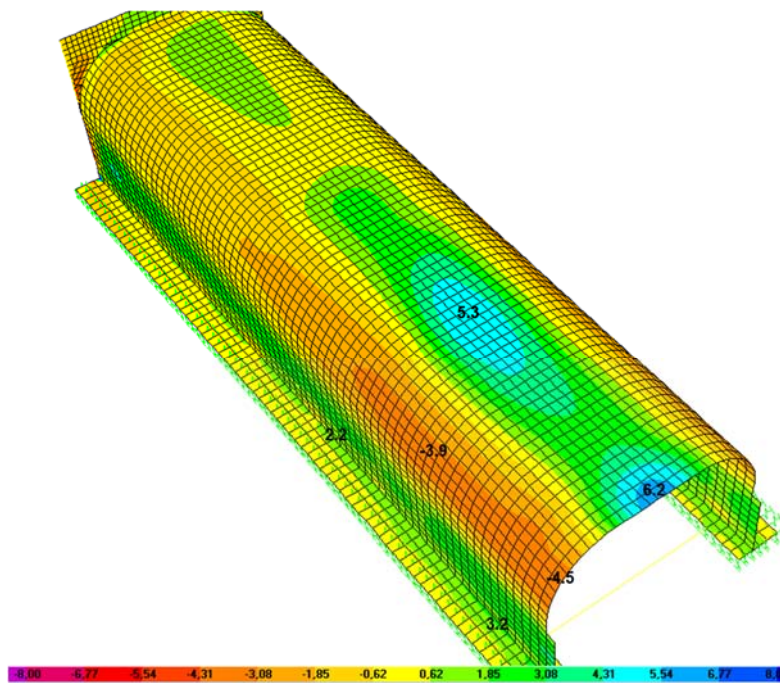


Figura 13. – M_{11} [tm/m] (momento en sentido long)

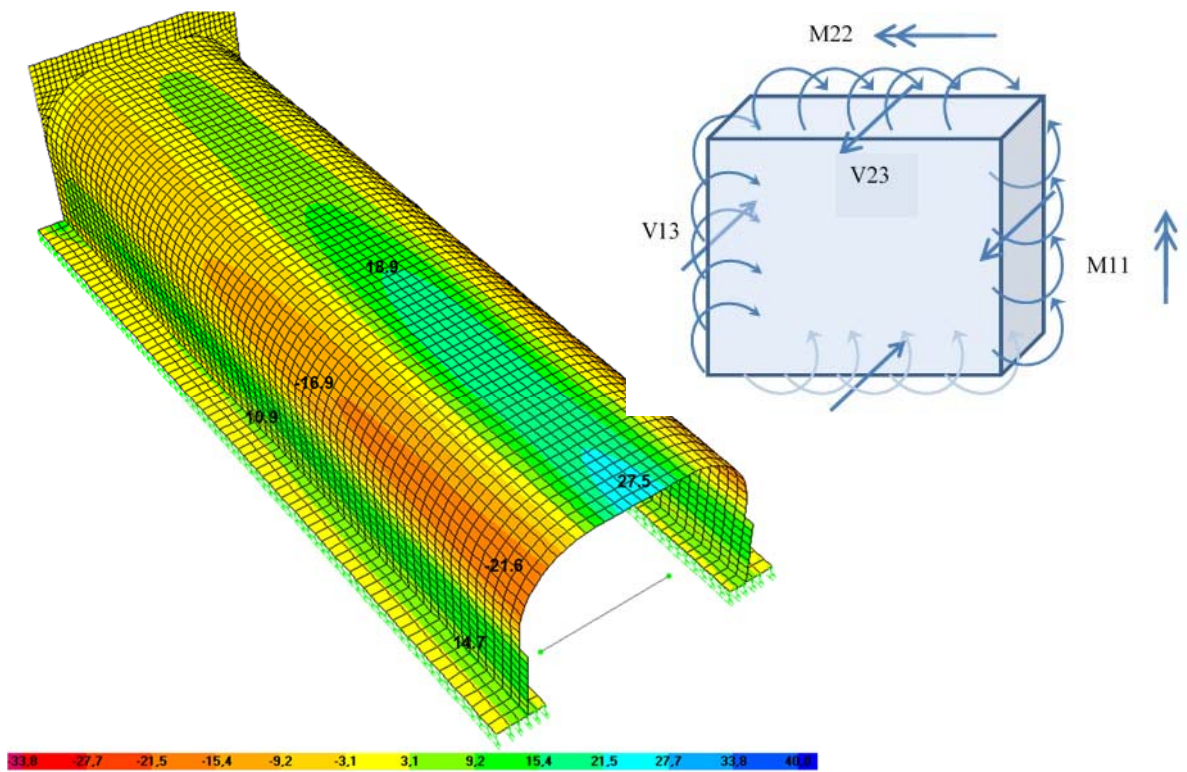


Figura 14. – M22 [tm/m] (momento en sentido transv)

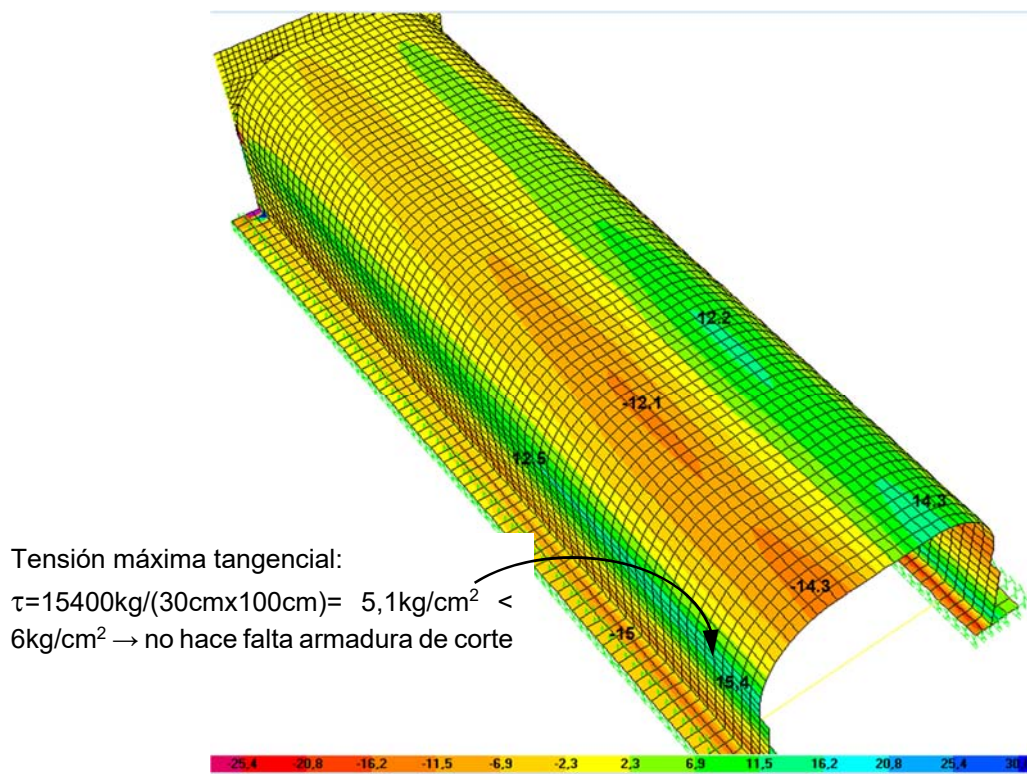


Figura 15. – V23 [tn/m] (corte)



6.4- Armaduras y verificaciones en el hormigón.

La calidad de los materiales utilizados son: Hormigón H-30 y Acero ADN420.

En las zapatas la armadura de flexión principal alcanza a un valor máximo de $12.02\text{cm}^2/\text{m}$ (cuantía de 0,2%). Respecto al corte, no fue necesario colocar armadura, las tensiones eran inferiores a la tensión límite $\tau_{011} = 6.0\text{kg}/\text{cm}^2$

En el resto de la cáscara, los sectores que requirieron mayor cuantía de armadura para la flexión transversal, fueron los ubicados en la sección central (tracción interior) del techo ($31.79\text{cm}^2/\text{m}$, 0.82% y $23.72\text{cm}^2/\text{m}$, 0.6%). Allí la losa tenía un espesor de 39cm y disminuía hasta 35cm en los laterales. Además de mayor brazo de palanca para las armaduras, se logra la pendiente transversal necesaria para el escurrimiento del agua infiltrada luego de las precipitaciones.

El otro sector con mayor demanda de acero fue el de curvas de empalme pared-techo, allí la armadura requerida resultó $23.44\text{cm}^2/\text{m}$ (0.67%).

En cuanto a la flexión en sentido longitudinal, solo es relevante en los extremos del túnel, en la zona de adyacente a los tímpanos de entrada y salida. La armadura necesaria en la cara externa es de $14.9\text{cm}^2/\text{m}$ (0.43%).

Para la verificación al corte de la cáscara del túnel, se estudian los sectores más solicitados que se dan entre las paredes verticales y el sector curvo de 35cm de espesor. Se determina el valor de corte para el cual no se requiere armadura, y se calcula lo que resulta necesario para las zonas en que se supera ese corte. Así es que se disponen **ganchos $\phi 10$** con separación vertical 60cm y separación horizontal 40 en la unión de tabiques verticales y sector curvo. En la unión de losa horizontal de techo y sector curvo las separaciones son más pequeñas, 30cm y 40cm, las solicitudes exigen más armadura de corte.

En el resto de los tabiques y del sector curvo se colocan 4 ganchos $\phi 8$ por m^2 como armadura constructiva típica.

El dimensionamiento de las armaduras de los puntales inferiores se realizó como un elemento tomado en forma aislada con los efectos locales del tránsito de cargas circulando sobre ellos. Estos elementos tienen una luz libre de 8,8m, una sección de 40cm x 60cm y se ubican a 90cm por debajo de la cota de rasante.

El esfuerzo normal de compresión (como elemento de conexión entre las zapatas) es diferente en cada puntal según su ubicación a lo largo del túnel. La peor condición para el dimensionamiento a flexión sería con el menor esfuerzo normal de compresión, (-26tn) en el extremo del túnel. Suponiendo la peor situación, en que los empujes reales fueran menores a los estimados, se toma $N=0$. No se considera el pandeo debido a su imposibilidad de ocurrencia dadas las condiciones de arriostamiento que le confiere el suelo compactado que lo rodea.



Estos puntales son vigas apoyadas sobre un medio elástico, pero con criterio conservador, se toma como viga simplemente apoyada en sus extremos, con luz de cálculo de 9,6m, y soportando la carga de dos aplanadoras A-30. Esta carga se distribuye sobre la viga teniendo en cuenta la disipación a lo largo del espesor de calzada y tapada (ver Fig. 15).

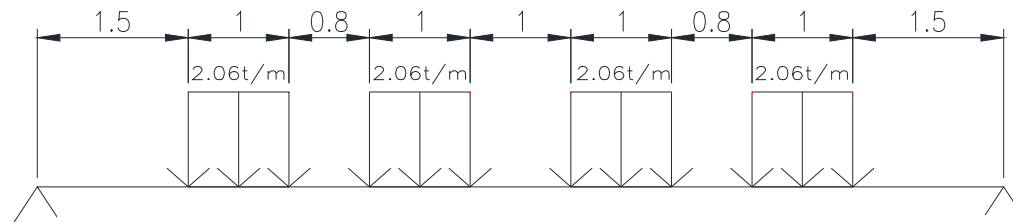


Figura 16. – Esquema de cargas sobre puntales inferiores

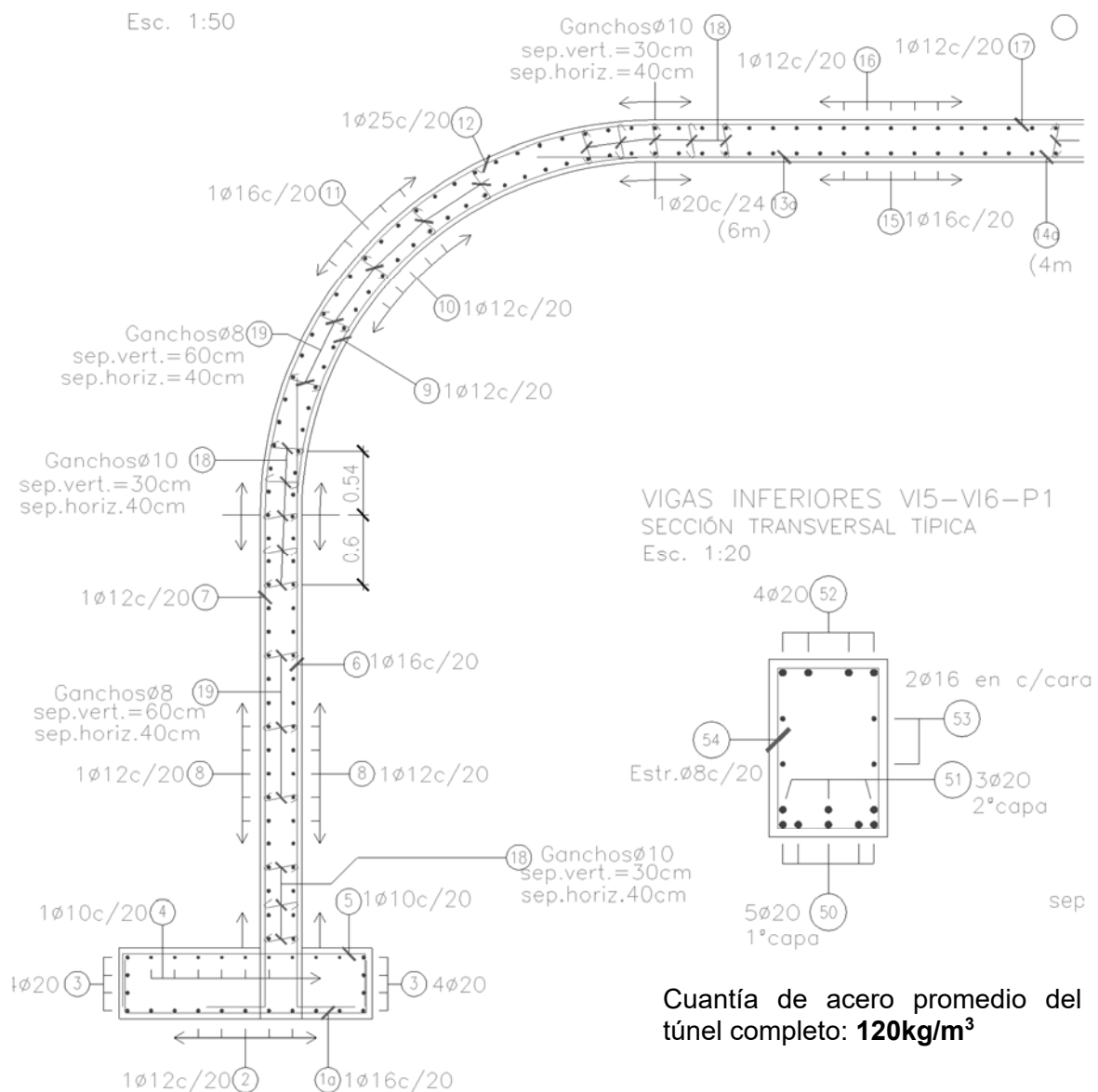


Figura 17. – Esquema de armaduras

7.- MUROS DE SOSTENIMIENTO.

La extensión de los muros a la entrada y a la salida del túnel es notoriamente diferente dadas las condiciones del relieve, que obligan a distintas alturas de contención de terreno. A la entrada del túnel (Prgr 22500) la longitud de muros es de 20m, con altura máxima de 5.6m y 3,8m de altura mínima desde rasante. Tanto el muro de entrada (Fig. 22) margen izquierda y margen derecha comienzan en Prgr. 22.480 hasta Prgr. 22.500 donde comienza el túnel.

El muro a la salida del túnel (Prgr 22560) margen izquierda (Fig. 20 y 21), tiene una longitud de 65m, con 7,1m de altura máxima y 2,10m de mínima, y el muro salida margen derecha tiene 55m de largo con 7,1m de altura máxima y 2,14 m de altura mínima respecto al nivel de rasante.



Figura 18. – Muros y tímpano Entrada Túnel

Se analizó la posibilidad de realizar un muro de contención en ménsula pero la magnitud de las solicitaciones obligaban a la utilización de espesores muy importantes y el desarrollo de la solera dorsal involucraba un movimiento de suelos de gran envergadura. Por este motivo se optó por la tipología de **muro con contrafuertes**.

Se proyecta una pantalla vertical de 30cm de espesor soportada por contrafuertes cada 5m, y en su borde inferior por una solera dorsal de 1.65m de longitud y 30 cm de espesor.

Los contrafuertes de sección constante (50cm x 170cm), transmiten sus esfuerzos mediante una zapata de 3.7m de largo, 2m de ancho y 0.6m de profundidad.

A nivel inferior, se dispone de un puntal que vincula los contrafuertes enfrentados a un lado y otro de la calzada para tender a autoequilibrar las acciones horizontales y evitar el deslizamiento.

En el sector donde los muros tienen su máxima altura, y por consiguiente los empujes más importantes, se coloca un puntal superior que disminuye el valor de solicitaciones en los contrafuertes en forma muy significativa y limita las deformaciones en el



coronamiento de los muros. Así se transforman en pórticos que sujetan a las losas de los muros de contención.



Figura 19. – Muros y pórticos Entrada Túnel

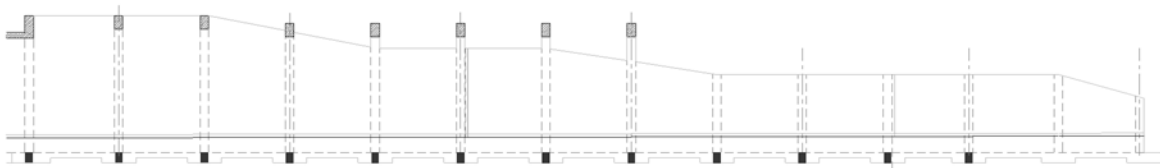


Figura 20. – Vista Muros margen izquierda Salida Túnel

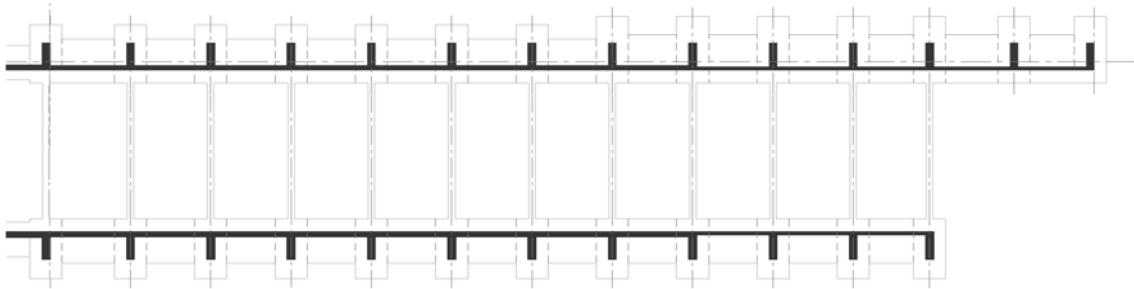


Figura 21. – Planta Muros Salida Túnel

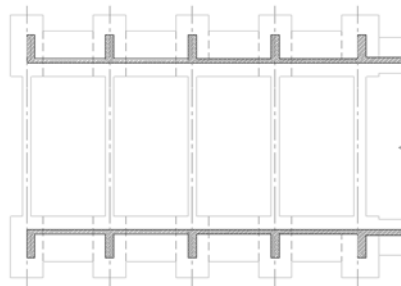


Figura 22. – Planta Muros Entrada Túnel



Para el cálculo de solicitaciones, se realizó un modelo espacial que abarcaba tanto la parte de muros con pórticos como la de muros con contrafuertes.

El conjunto estructural que compone el sistema de contención del terreno está conformado por:

+la pared propiamente dicha de 30cm de espesor para la parte más alta y 20cm en los paños más bajos.

+los contrafuertes de sección constante 50cm x 170cm

+zapata corrida de 30cm de espesor con ensanchamientos en coincidencia con los contrafuertes y columnas de pórticos de 60cm de espesor

+puntales inferiores de conexión entre las zapatas internas de 40cm x 60cm.

+travesaños superiores de los pórticos de 50cm x 80cm.

El diseño de los muros de contención comprendió la verificación y dimensionamiento de armaduras de muchos sectores diferentes conforme variaban las solicitaciones para realizar adopciones de armaduras en forma racional con criterio de economía en los materiales y a la vez sencillo en el aspecto de la ejecución.

La cuantía de acero promedio de estos muros con sus contrafuertes alcanzó un valor de **115kg/m³**.

8.- Comentarios finales

La estructura del túnel requirió **676m³** de hormigón y **81tn** de acero, mientras que las para las estructuras correspondientes a los muros de contención se emplearon **321m³** de hormigón y **37tn** de acero.

La obra de túnel y muros comenzó su ejecución en 2018 y concluyó en 2019. Forma parte del proyecto abordado por Vialidad Nacional de un nuevo trazado de la ruta nacional N° 51 en su paso por San Antonio de los Cobres rodeando a la población a manera de una circunvalación.

Este proyecto apunta a llevar mayor seguridad vial y mejorar las condiciones de transitabilidad y beneficia a los emprendimientos mineros de la región, potencia el comercio internacional y mejora las condiciones de circulación turística.

El desarrollo del proyecto vial ejecutivo estuvo a cargo de CADIA S.A. y la construcción fue realizada por GREEN S.A.