Obra: Linha 2 do Metropolitano de São Paulo – Lote 5.
Proprietário: Companhia do Metropolitano de São Paulo.
Projetista: Maffei Engenharia (GP Consultoria em Projetos de Engenharia Civil Ltda).
Executora: Construções e Comércio Camargo Corrêa S/A.
Categoria: Infraestrutura.

1. Descrição da obra.

Trata-se de obra predominantemente subterrânea, composta por estruturas de contenção provisória e estruturas permanentes, que se estende desde o km 28,3+90,0m ao km 29,3+60,79m, junto ao Pátio Tamanduateí da Linha 2 – Verde do Metropolitano de São Paulo, e é subdividida em três partes, VCA 3x4, NATM singelo e VCA duplo.

A primeira parte da obra, constituída pelo VCA 3x4 é ainda subdividida em cinco trechos. Tal subdivisão foi condicionada por requisitos de funcionalidade da via permanente do Metrô entre os quilômetros supracitados, que deveria comportar:

- Trecho 1: gabarito transversal formado por 3 vias férreas, em rampa e um Aparelho de Mudança de Via (AMV);
- Trecho 2: gabarito transversal formado por 4 vias férreas sendo duas vias em rampa descendente a partir deste trecho;
- Trecho 3: o mesmo gabarito transversal do Trecho 2, porém sendo a estrutura permanente dotada de duas paredes centrais além das paredes externas, e com pequena extensão – 21m;
- Trecho 4: gabarito transversal formado por duas vias subterrâneas laterais singelas e duas vias centrais a céu aberto, com estrutura única parcialmente enterrada, dotada de atenuador de ruído no início;
- Trecho 5: gabarito transversal formado também por duas vias subterrâneas laterais singelas, com grande cobertura de solo, com transição para dois túneis singelos, mais duas vias a céu aberto, com estrutura única acima do nível do terreno natural para acesso a um viaduto;

Nesta primeira parte, apesar do fato da estrutura permanente ser caracterizada por seção celular, os diferentes gabaritos – transversal e longitudinal – que deveriam ser respeitados ao longo dos seus 381m de extensão, conduziram à soluções bastante diferentes para os elementos da seção: laje de fundo, paredes e laje de cobertura.

Particularmente no caso da laje de fundo, um aspecto conceitual foi mantido ao longo de toda a extensão, qual seja a previsão de drenagem para eliminar os efeitos da subpressão. Esse fato conduziu a uma excepcional esbeltez da referida laje, e, aliado à execução em duas camadas, possibilitou o alojamento de uma enorme quantidade de embutidos do sistema da via permanente bem como das canaletas de drenagem longitudinais.

Foram previstas juntas transversais nas transições entre diferentes seções. Tais juntas tiveram como motivação muito mais os diferentes comportamentos estruturais do que a necessidade de acomodar movimentações térmicas, muito embora tenham sido correntemente denominadas juntas de dilatação.

As transições com túneis conduziram a dificuldades adicionais na concepção da estrutura provisória (paredes frontais) tendo sido solucionadas com um sistema de ancoragem não-convencional devido à grande distância entre tirantes provisórios, sendo estes tirantes protendidos com forças bem mais elevadas que o usual. As longarinas também tiveram que merecer atenção especial nestas transições, pelos mesmos motivos.

A segunda parte é formada por dois túneis executados pelo método NATM (New Austrian Tunneling Method) e têm vias singelas.

A terceira parte, VCA duplo, consiste em estrutura celular para duas vias, com eixo curvo em planta e extensão de 197m.

Aspectos técnicos da obra são discutidos com detalhes nos itens a seguir. Antes, porém, é feito breve relato do

perfil geotécnico que se constitui em elemento importante para perfeita compreensão da concepção das estruturas aqui descritas.

2. Perfil geotécnico.

O terreno natural encontra-se aproximadamente na cota 732,00, com pouca variação relativa ao longo do comprimento da obra. É importante que se diga que a maioria das construções existentes nos arredores da obra é de pequeno porte – sobrados e galpões.

Não obstante esse fato, as interferências com instalações tiveram que ser constantemente monitoradas, merecendo especial atenção a interferência com uma adutora de 1200mm de diâmetro, que precisou ser remanejada, e influenciou diretamente no projeto da laje de cobertura do Trecho 2.

O Lote 5 da Linha 2 da CMSP encontra-se totalmente inserido nos solos sedimentares da BSSP (Bacia Sedimentar de São Paulo), a grosso modo, formados por argilas rijas e areias compactas, estas últimas ocorrendo como lentes confinadas. A camada de aluvião formada por argilas siltosas pouco arenosa e areias médias siltosas pouco argilosa atingem a profundidade de cerca de 5,7m. Abaixo desta camada encontra-se uma porção típica de sedimentos da Formação Resende, originários de leques aluviais associados à planície de rios entrelaçados e situados aproximadamente abaixo da cota 730 m. Em geral os solos desta formação apresentam elevada consistência e compacidade, com pré-adensamento pronunciado. As argilas cinza – esverdeadas desta formação são informalmente conhecidas no meio geotécnico como “Taguá”. Apresentam consistência muito rija e são excelentes materiais, tanto para apoio de fundações, como para escavação subterrânea.

O lençol freático ao longo do perfil é encontrado entre 4 e 8 metros.

Complementando os estudos geotécnicos de sondagem à percussão, também foram elaborados estudos adicionais objetivando estabelecer parâmetros de permeabilidade do solo natural bem como do material de reaterro utilizado entre a estrutura de contenção provisória e a estrutura permanente. Tais estudos foram essenciais também para dimensionamento do sistema de drenagem e verificação dos empuxos de água considerando percolação.

Na figura 1 apresenta-se o perfil geológico-geotécnico típico da área.

3. Estrutura de contenção provisória.

A estrutura de contenção foi executada através de uma cortina formada por estacas escavadas de 100cm de diâmetro a cada 2,0m, armadas, com a instalação de 1 nível de escoramento formado por longarinas e tirantes. Entre as colunas, em toda a extensão do aluvião foram executadas colunas de jet-grouting de 80cm de diâmetro secantes às anteriores. Nas áreas desapropriadas, executou-se a escavação dos 2,5m superiores em talude, com inclinação 1H:2V, já na linha situada junto à rua, as estacas foram executadas praticamente até a cota do terreno existente.

Essa cortina de jet-grouting pode ser vista como a “pranchada” executada em sistema de contenção de escavação de valas convencional e foi formada por colunas secantes com 80cm de diâmetro.

As colunas de JG foram previstas com embutimento mínimo de 1,0m na camada de argila do terciário detectada nos estudos preliminares.

Os estacões tinham ficha – profundidade abaixo da cota de escavação – de 3m. Foi previsto um nível de tirantes. Dessa forma, após escavação até profundidade definida em projeto, era implantado o tirante. O tirante foi ancorado diretamente nas longarinas e sua locação era feita entre estacões, o que permitia que os furos fossem feitos apenas na cortina de jet-grouting.

Entre um tirante e outro adjacente, uma longarina metálica funcionava como apoio horizontal para os estacões intermediários. Esse projeto conduziu a espaçamento entre tirantes da ordem de 3,5m.

Foram executados dois septos transversais de colunas de jet-grouting em formas de arco, com embutimento de

1,0m no taguá, de forma a possibilitar a execução do VCA em segmentos estanques. Desta forma, não houve a necessidade da conclusão total da contenção para início das escavações e ainda facilitou o plano de ataque dos túneis NATM.

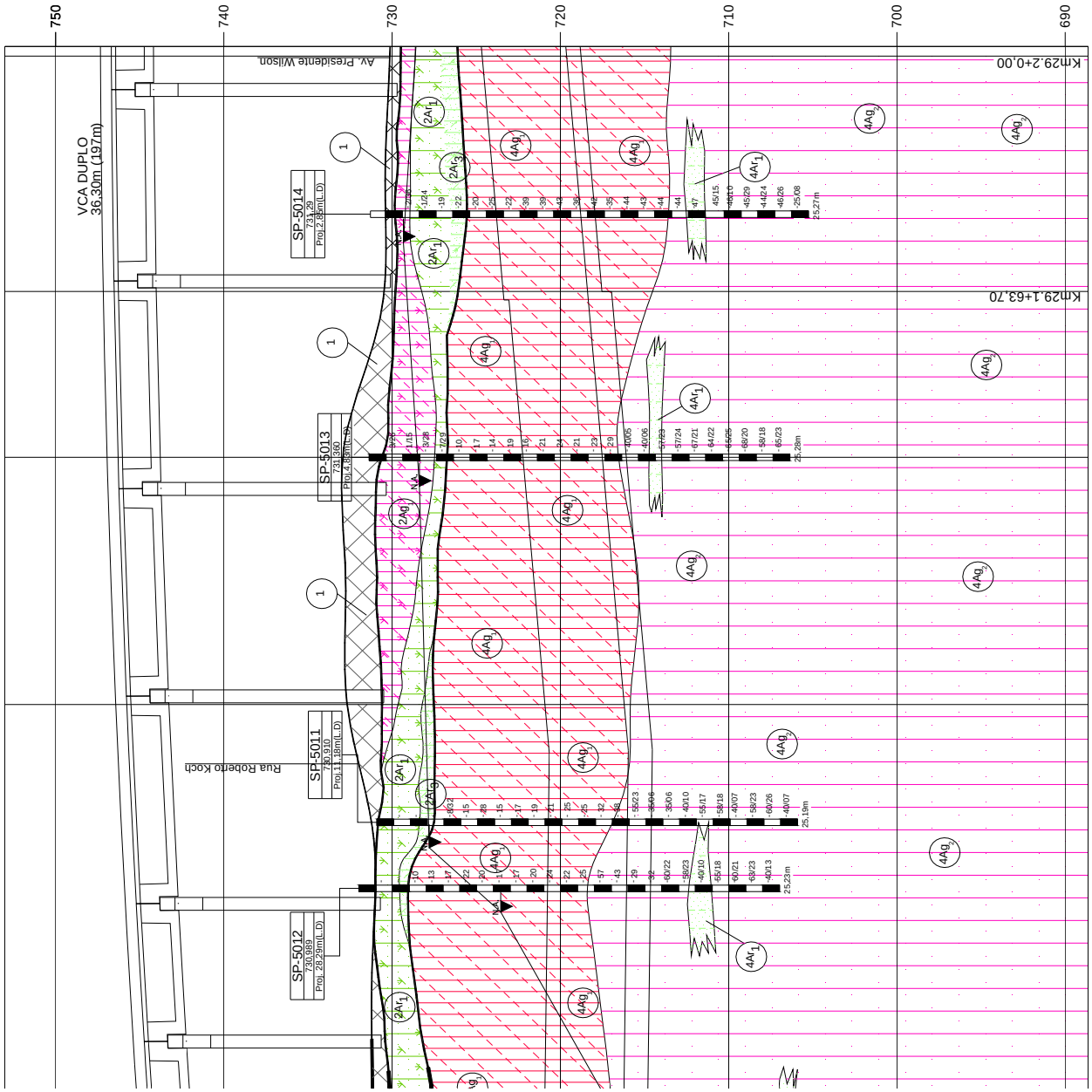


Figura 1 – Perfil geológico -geotécnico

A verificação da estrutura de contenção foi feita seguindo-se a norma do Companhia do Metropolitano de São Paulo, Cálculo das obras executas pelo método da Trincheira (DS.9.00.00.00/6H9-001). Os parâmetros do solo foram adotados em geral por correlação a partir dos resultados de sondagem à percussão, dada a grande experiência local acumulada sobre o assunto.

Os esforços solicitantes e os deslocamentos são determinados a partir das ações, aplicadas à estrutura, constituída de materiais que apresentam uma certa reologia. Em vista da impossibilidade de se conhecer tais elementos, adotam-se hipóteses simplificadoras de modo a representá-los de forma adequada, sem descaracterizar o comportamento. Assim, no cálculo da contenção, adotou-se um modelo derivado, representando o carregamento, a

estrutura e a reologia da maneira descrita adiante, adotando-se, sempre, teoria de 1ª ordem.

Como o maciço apresenta materiais com coesão elevada (taguá), o empuxo ativo calculado era muito pequeno; neste caso adotou-se o empuxo ativo mínimo ($\sigma_{h,mín} = 0,20\gamma h$).

Os tirantes tiveram comprimentos previstos entre 15m a 19m, sendo o trecho livre entre 7m e 9m. O "bulbo" – região do tirante ancorada no solo foi previsto com comprimento entre 8m e 10m. Os tirantes foram confeccionados com cordoalhas de aço tipo CP-190RB, com sete fios de 12,7mm, variando entre 6 e 7 cordoalhas, conforme a força a ser aplicada entre 600kN e 700kN, respectivamente.

No trecho de transição entre o VCA e os túneis NATM, não havia possibilidade de implantação de muitos tirantes pois haveria interferência com os referidos túneis. Dessa forma, previu-se uma estrutura diferenciada, com longarinas de grande inércia e tirantes com cargas de até 1400kN. Os comprimentos desses tirantes especiais, sobretudo os comprimentos ancorados – correspondentes ao "bulbo" – também foram previstos maiores, alcançando-se comprimentos totais da ordem de 30m. Além disso, na transição VCA-NATM foram usadas duas linhas de tirantes.

Durante a execução da obra, houve monitoramento do comportamento da estrutura de contenção provisória bem como de eventuais efeitos da escavação nas adjacências. Não foram registradas ocorrências.

As figuras abaixo ilustram o que se disse.

(a) (b)

(c)

Figura 2 – Detalhes da estrutura de contenção provisória: (a) frente de escavação reforçada com septo formada por colunas de jet grouting; (b) detalhe da ancoragem dos tirantes; (c) transição VCA-NATM, com dois níveis de tirantes.

(a) (b)

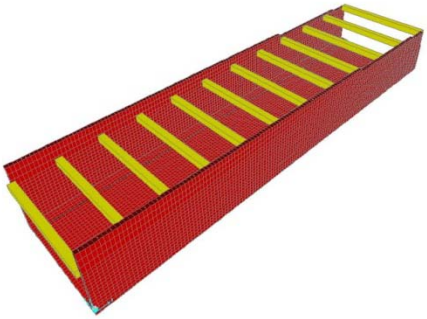
(c)

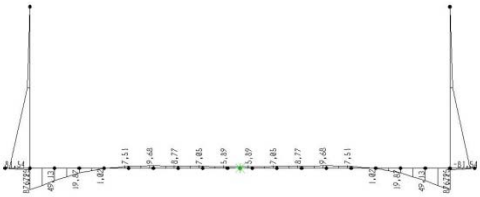
Figura 3 – Estrutura de contenção provisória do VCA duplo;
(a) e (b) Vista geral;(c) Execução das paredes laterais e frontal .

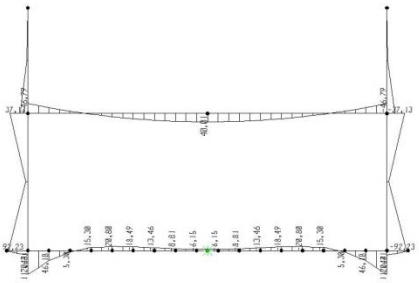
4. Estrutura permanente da primeira parte.

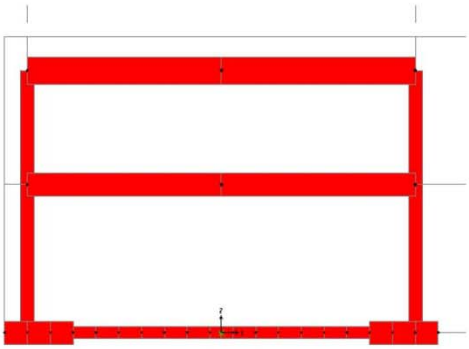
4.1. Trecho 1.

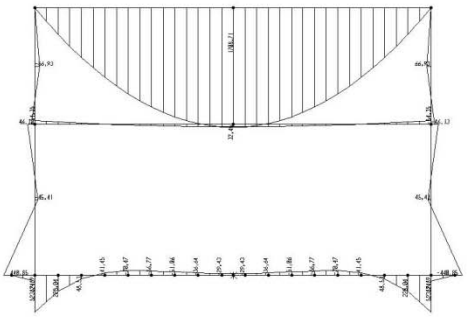
No Trecho 1, a profundidade da escavação alcançou valores da ordem de 14m. A largura livre exigida pelo gabarito transversal era da ordem de 16m. A solução adotada foi de uma parede de grande altura travada em nível intermediário, compatível com as exigências de gabarito, com pergolado – barras de concreto armado com 16m de vão, seção de 100cmx100cm, espaçados cada 6m na direção longitudinal. A grande seção dos elementos do pergolado auxiliou na redução das tensões de cisalhamento na parede, reduzindo o problema de punção, devido ao carregamento horizontal decorrente de empuxo de terra.

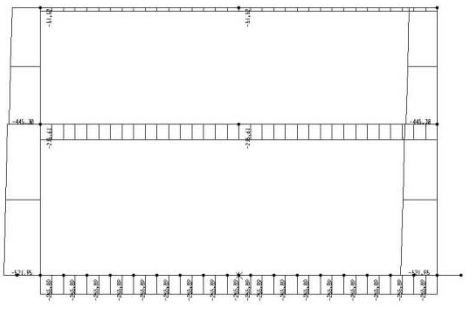




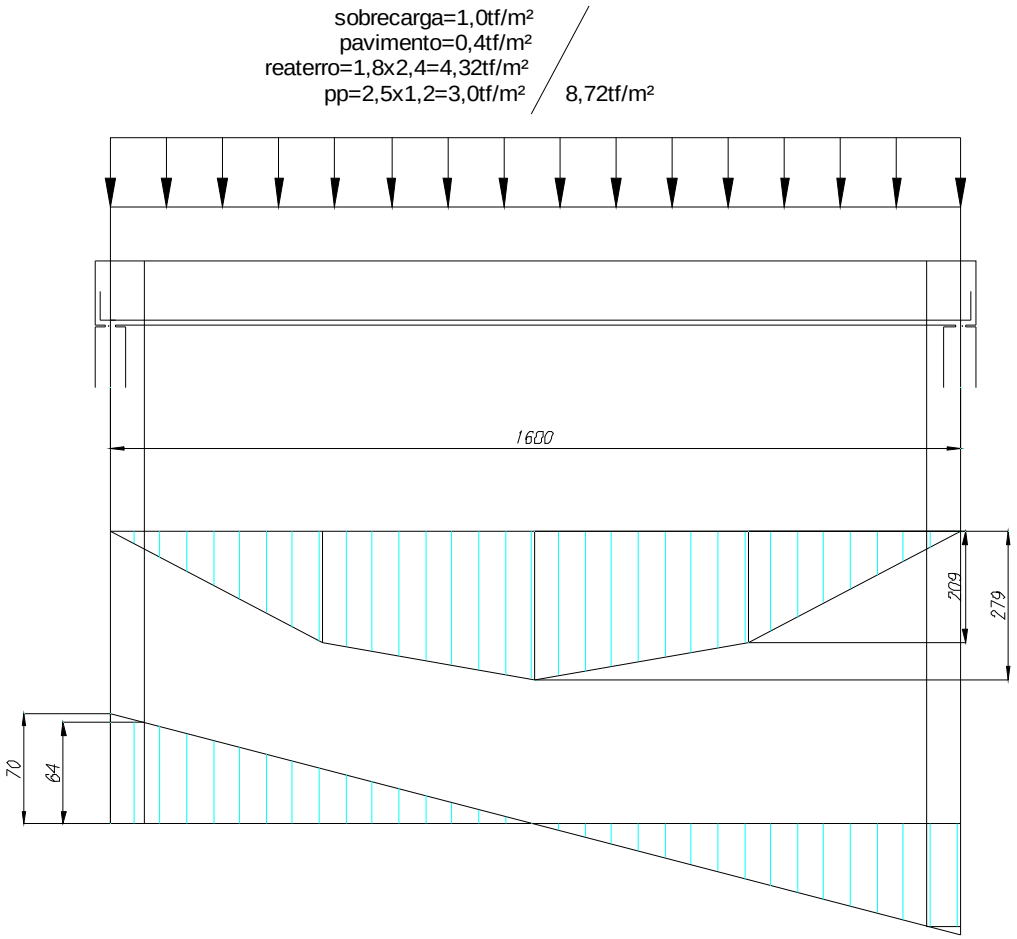


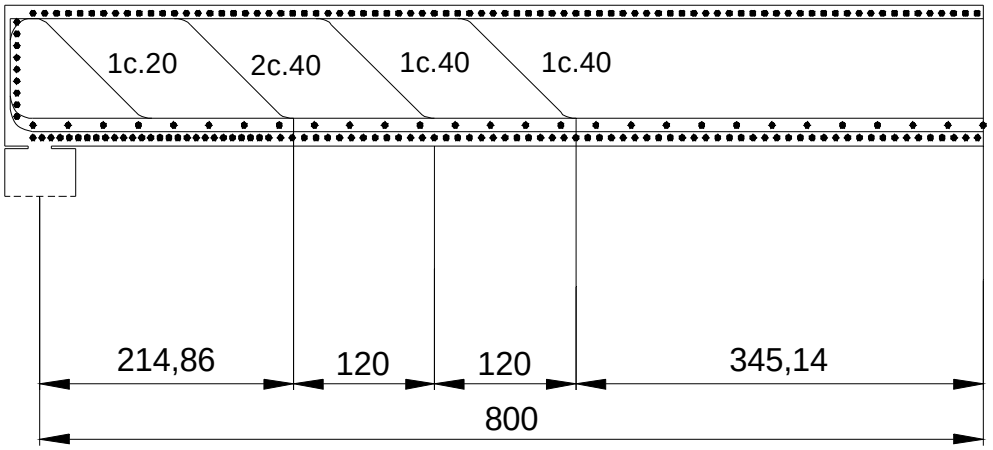


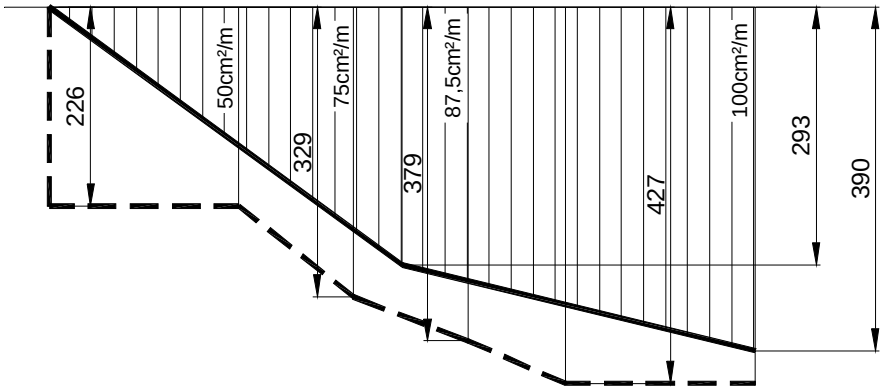




A laje de cobertura é maciça com 1,20m de espessura e suporta carga de 2,5m de altura de aterro. Na ligação da laje com a parede foi feita uma articulação o que possibilitou a execução de parede com 60cm de espessura.







A laje de fundo foi feita com espessura variável, alcançando 1m sob a parede e 22cm de espessura em sua maior extensão. Essa solução somente foi possível devido à previsão da drenagem sob a laje, com alívio da subpressão. A grande esbeltez da laje de fundo proporcionou bom resultado também do ponto de vista executivo o que contribuiu para economia da obra, não apenas por redução do volume de material. Ocorre que a laje com 22cm traria menor prazo de execução e menos problemas com retração do concreto. Além disso, foi feita uma capa de concreto sobre a laje para acomodar as canaletas de drenagem e os embutidos do sistema da via permanente.

Nas figuras a seguir apresentam-se detalhes da execução do Trecho 1. A fim de melhorar as condições de execução das paredes, foram previstas ancoragens com luvas embutidas nas fôrmas que posteriormente foram emendadas às barras da armação do pergolado. Isso foi possível somente porque o pergolado seria necessário apenas depois da mobilização do empuxo de terra.

Figura 4 – Execução da estrutura permanente do Trecho 1.

Figura 5 – Vista interna da estrutura permanente do Trecho 1 concluída.

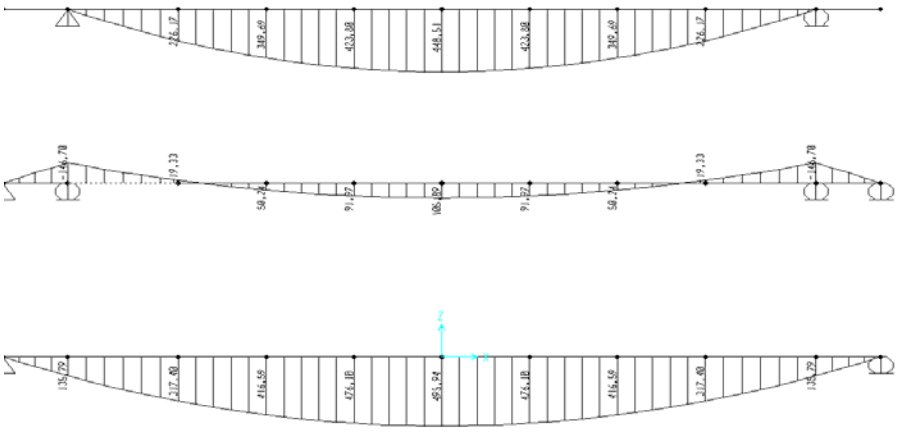
4.1. Trecho 2.

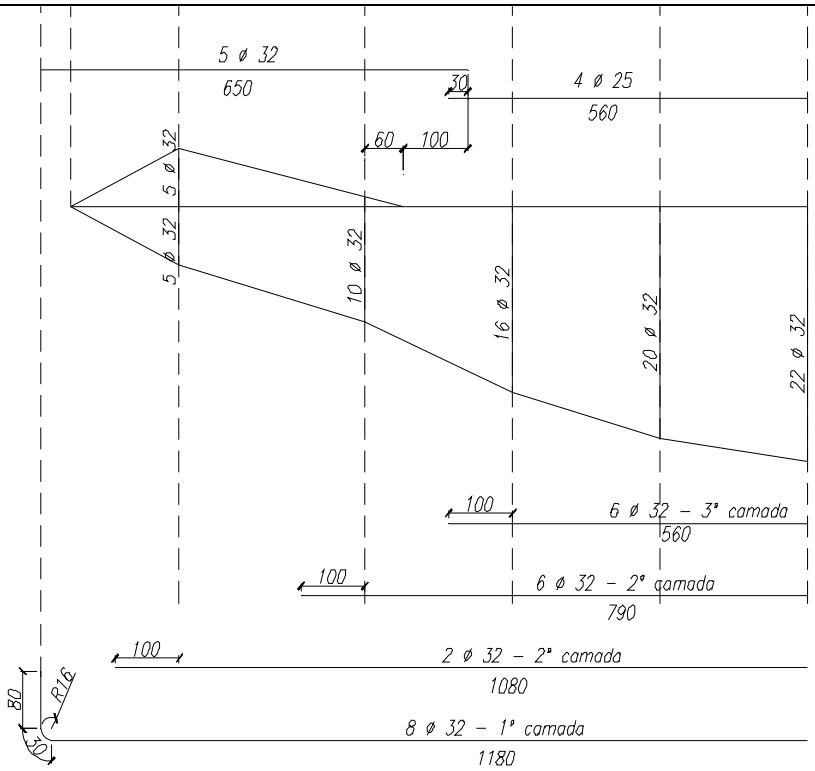
No Trecho 2, a largura da seção é variável, alcançando cerca de 21m no final. A solução em laje de cobertura maciça seria muito pesada, então foi concebida uma laje nervurada – nervuras somente na direção transversal. A presença de uma adutora de 1200mm obstruindo o gabarito obrigou a execução de duas nervuras antes das demais para que a adutora fosse mudada de local (Figura 5).

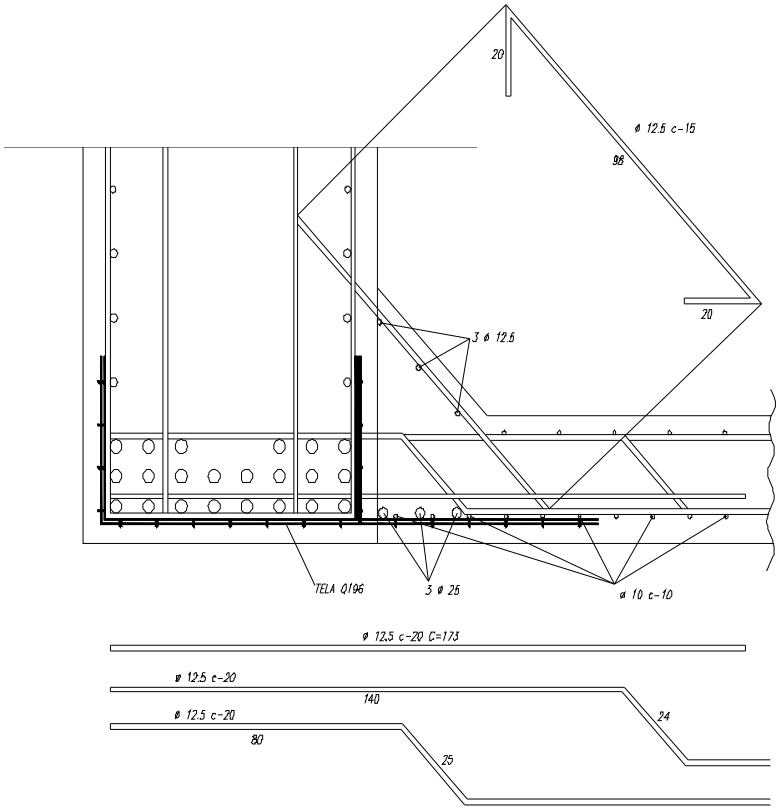
(a) (b)

Figura 6 – Adutora existente no Trecho 2: as duas nervuras indicadas foram executadas antes das demais para servirem de suporte para a adutora.

Figura 7 – Vista interna do Trecho 2, concluído, com implantação dos elementos da via permanente.







Um aspecto interessante da execução da laje de cobertura foi a utilização de pré-lajes que reduziu sobremaneira a necessidade de cimbramento e de fôrmas.

4.1. Trecho 3.

O Trecho 3 faz a transição entre as estruturas de célula única para as estruturas multicelulares, apresentando portanto, duas paredes centrais. Apresenta extensão de apenas 21m, entre duas juntas transversais. A célula central abriga duas vias, tendo 10m de largura livre, e dá início à estrutura a céu aberto.

.**Figura 8 –** Final do Trecho 3, observando-se o início da célula central a céu aberto, do Trecho 4, com execução da laje de enchimento.

4.1. Trecho 4.

No Trecho 4, a laje de cobertura deixa de ser contínua na direção transversal visto que a célula central apresenta-se a céu aberto. Esse fato conduziu a uma consideração importante na concepção da estrutura, relacionado à previsão de juntas longitudinais entre a laje de fundo da célula central e as paredes centrais. O objetivo foi eliminar efeitos de torção na parede que ocorreriam caso a mesma encontrasse apoio rígido na laje de fundo, que apresenta altura variável, quando da atuação dos empuxos de terra.

(a) (b)

Figura 9 – Detalhes da célula central (a) e de uma das células laterais do Trecho 4.

Após conclusão da estrutura do Trecho 4, verificou-se a necessidade de executar duas novas lajes para suporte e cobertura de um atenuador de ruídos. Cada laje deveria ter vão de 10m, extensão de 12m (área de 120m²). A solução constituiu-se em uma complexa estrutura, com lajes alveolares protendidas, fixadas à estrutura existentes por meio de consolos metálicos, conforme figura abaixo.

Figura 10 – Apoios para atenuador de ruído executados após conclusão da estrutura.

4.5. Trecho 5.

Finalizando a estrutura, o Trecho 5 apresenta-se com duas células laterais isoladas, com vias singelas, que chegam em dois túneis singelos no km 28,7+71,0. O trecho central tem reaterro com altura que alcança cerca de 17m. As lajes de cobertura das células dos VCA´s singelos foram ligadas entre si por um pergolado, com seção de 60cmx60cm, cada 4m. Para facilitar a execução das fôrmas das paredes o pergolado foi feito em etapa posterior, tendo para isso sido previstas luvas de ancoragem embutidas nas fôrmas das paredes.

Além disso, as lajes de cobertura dos VCA´s singelos foram executadas com elementos pré-moldados de seção parcial – pré-lajes – que proporcionaram redução do escoramento interno. O uso das pré-lajes auxilia também na redução dos efeitos de retração, visto que a concretagem da laje é executada em duas etapas.

Na figura a seguir apresenta-se foto de uma maquete física executada para auxiliar na concepção e detalhamento do projeto desse trecho, sobretudo na transição com os túneis, onde a seção tem mudança brusca de forma retangular para forma curva. As fotos da maquete são interessantes para que se tenha visão adequada da estrutura, visto que devido à proximidade com a estrutura de contenção provisória frontal, tornava-se impossível ângulo de visão apropriado para uma fotografia geral.

No topo da estrutura foi previsto um elemento de transição em viga-parede para receber a laje de transição do elevado bem como conter o aterro frontalmente. Na parte inferior foram previstas vigas portais curvas para transição da seção retangular para a seção do túnel.

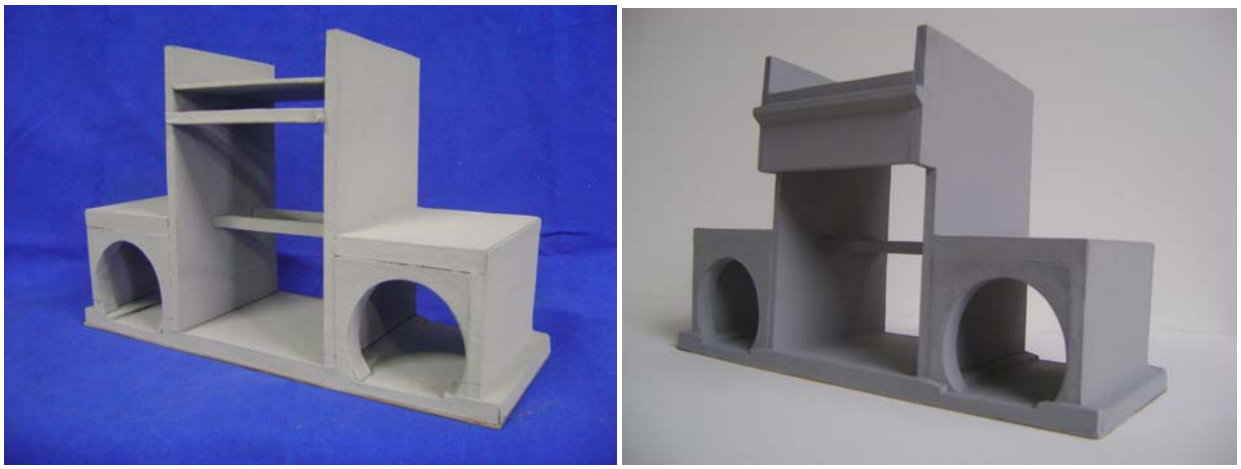


Figura 11 – Maquete física elaborada durante o projeto para auxiliar no detalhamento do projeto.
Em seguida apresentam-se fotos da obra durante a execução e após conclusão.

Figura 12 – Vista do Trecho 5 em execução, observando-se a camada de drenagem sob a laje de fundo e Trecho 5 concluído.

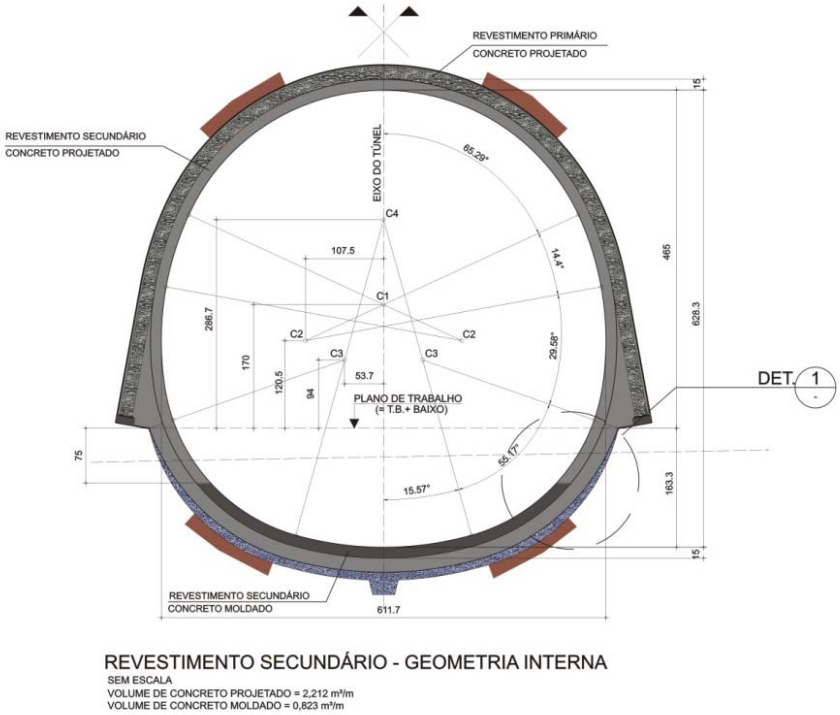
5. NATM singelo.

Os túneis foram executados pelo método NATM, com duas fases distintas de revestimento. A primeira fase do revestimento foi executada em concreto projetado, cimbrado através de cambotas metálicas treliçadas. A segunda fase foi executada em concreto projetado desempenado, armado com telas metálicas.

Com relação ao maciço, trata-se de um material de baixa permeabilidade, composto predominantemente por uma argila siltosa variegada e por algumas lentes de areia fina e média argilosa.

Devido ao túnel ter sido escavado totalmente na camada de argila siltosa variegada rija (taguá), não houve necessidade de tratamento e controle do lençol freático, não tendo ocorrido nenhum ocorrência significativa.

Figura 13 – NATM Singelo.



REVESTIMENTO SECUNDÁRIO - GEOMETRIA INTERNA
SEM ESCALA
VOLUME DE CONCRETO PROJETADO = 2,212 m³/m
VOLUME DE CONCRETO MOLDADO = 0,823 m³/m

6. VCA Duplo.

O VCA duplo compreende o trecho entre o km 29,1 + 64m ao km 29,3 + 61m, perfazendo 197m de extensão, une o trecho em túnel até o Pátio de Manobras Tamanduateí.

Trata-se de uma estrutura unicelular de concreto armado, com largura interna variável entre 12,23m e 10,20m e altura interna variável entre, aproximadamente, 9,43m e 5,85m.

A declividade da laje de fundo é positiva no valor de +34,25%o.

As paredes possuem 0,60m de espessura. A laje de cobertura tem espessura de 1,00m.

A laje de fundo tem espessura variável, sendo que as abas e os trechos laterais tem1,00m de espessura e o trecho central 0,22m.

7. Dados adicionais.

7.1. Relação dos profissionais envolvidos com a elaboração do projeto.

Engenheiros Civis:

Responsável Técnico: Carlos Eduardo Moreira Maffei.

Coordenação Técnica: Maria Cecília Guazzelli.

Acompanhamento Técnico de Obra (ATO): Alaor Coelho Júnior

Willian Carreira

Colaborador: Pedro Wellington G. N. Teixeira.

Paulo Eduardo Moreira Maffei

Técnicos:

Augusto Freire (In memoriam)

Celso Souza

Esmeralda Sberosky

Fernando Jorge Oliveira Cruz

Gaby Cantu Tavares

João Júlio Campelo de Castro

Leonardo Barbosa da Silva

Manoel J. Neto.

7.2. Principais materiais estruturais empregados.

a) Estrutura de contenção provisória.

Concreto estrutural Classe C-25 para as estacas.

Solo tratado das colunas de jet grouting com resistência à compressão simples de 3,0MPa.

Aço CP-190-RB (tirantes da estrutura de contenção provisória);

Aço tipo ASTM A592 (longarinas da estrutura de contenção provisória);

b) Estrutura permanente.

Concreto estrutural Classe C-30 a C-35;

Aço CA-50A;

Aço CA-60;

7.3. Principais elementos de acabamento e proteção da estrutura.

Manta de PVC (impermeabilização);

Juntas tipo Fungenband;

8. Conclusão.

O projeto foi concebido de modo a atender à boa técnica e de modo a atender os prazos e custos, sempre atendendo a segurança. Para tanto existem três pontos fundamentais a salientar para atingir tais metas:

- A contenção dos VCA´s foi dimensionada, devido às características do subsolo da região com empuxo ativo mínimo, sendo executada, com a instalação de 1 nível de escoramento formado por longarinas e tirantes, muito mais econômico que as soluções adotadas nos projetos dos lotes adjacentes, conforme pode ser observado na foto abaixo.

(a) (b)

Figura 14 – (a) Escoramento no lote adjacente (4 níveis); (b) Escoramento no Lote 5

- A laje de fundo foi feita com espessura variável, alcançando 1m sob a parede e 22cm de espessura em sua maior extensão. Essa solução somente foi possível devido à previsão da drenagem sob a laje, com alívio da subpressão. A grande esbeltez da laje de fundo proporcionou bom resultado também do ponto de vista executivo o que contribuiu para economia da obra, não apenas por redução do volume de material. Ocorre que a laje com 22cm traria menor prazo de execução e menos problemas com retração do concreto. Além disso, foi feita uma capa de concreto sobre a laje para acomodar as canaletas de drenagem e os embutidos do sistema da via permanente.
- A solução de drenagem da estrutura permanente também possibilitou a execução de paredes mais esbeltas, tendo sido necessários estudos adicionais objetivando estabelecer parâmetros de permeabilidade do solo natural bem como do material de reaterro utilizado entre a estrutura de contenção provisória e a estrutura permanente.

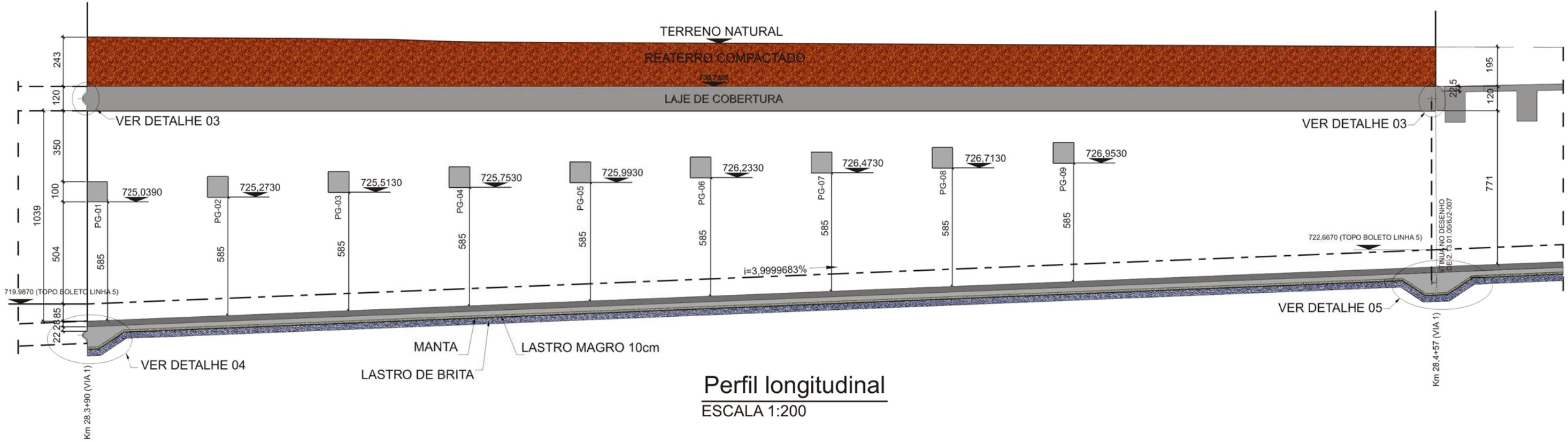
Figura 1 – Estrutura de contenção provisória concluída.

Figura 2 – Detalhe do pergolado e da articulação entre a parede e a laje de cobertura no Trecho 1.

Figura 3 – Nervuras da laje de cobertura do Trecho 2.

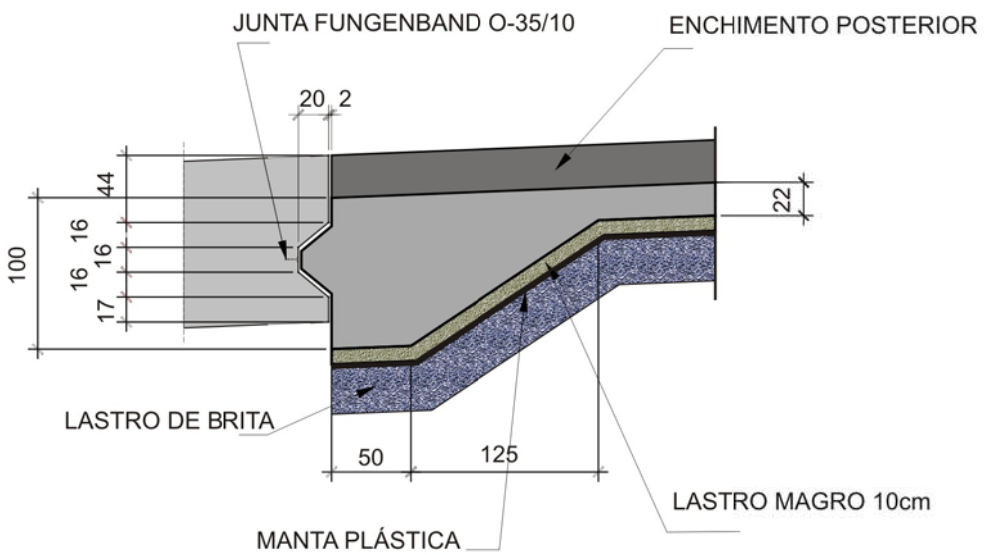
Figura 4 – Viga portal na transição VCA duplo – NATM singelos.

Figura 5 – Túnel NATM singelo.



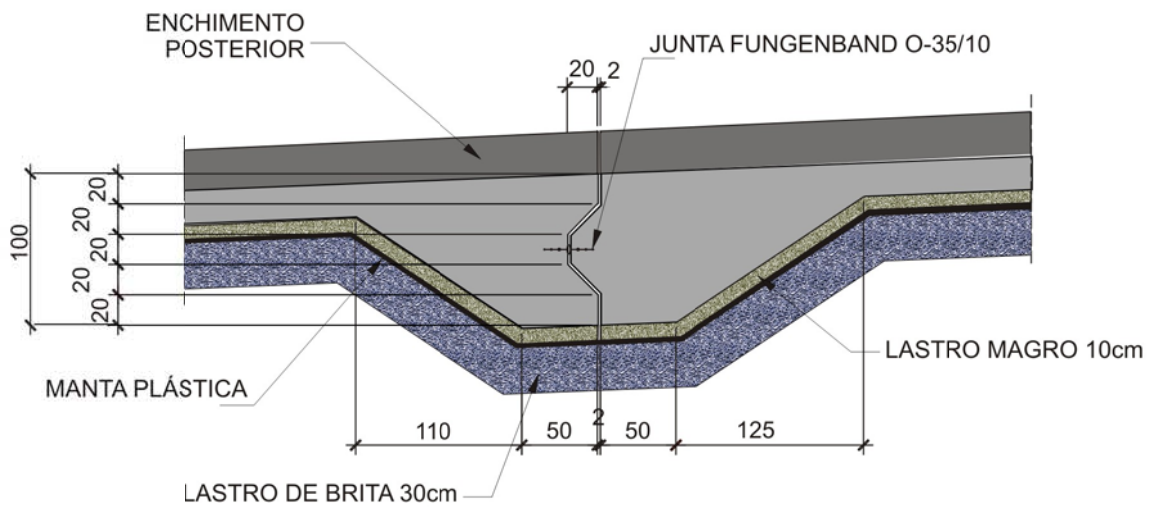
Perfil longitudinal

ESCALA 1:200



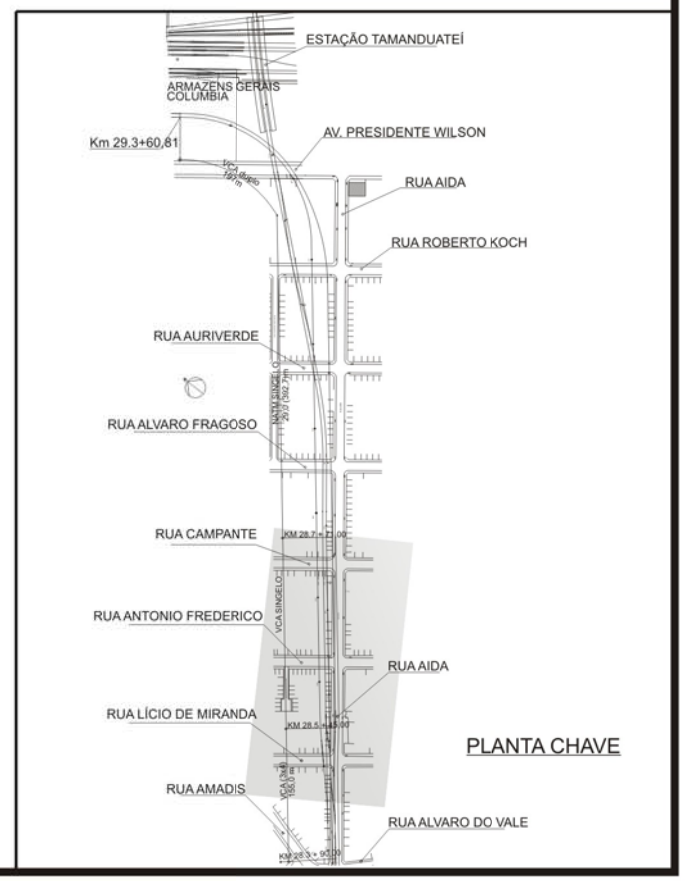
Detalhe 04

ESCALA 1:50

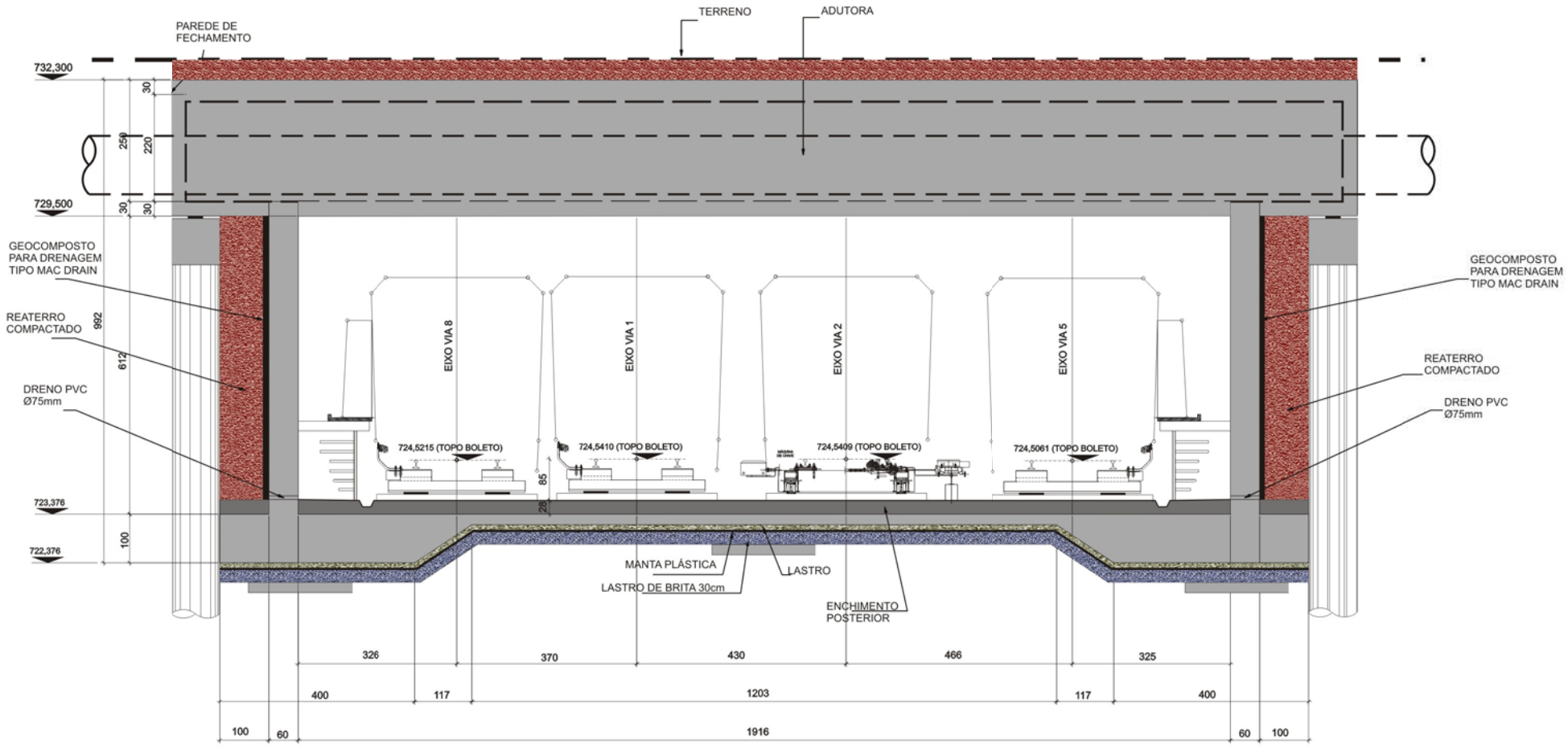


Detalhe 05

ESCALA 1:50

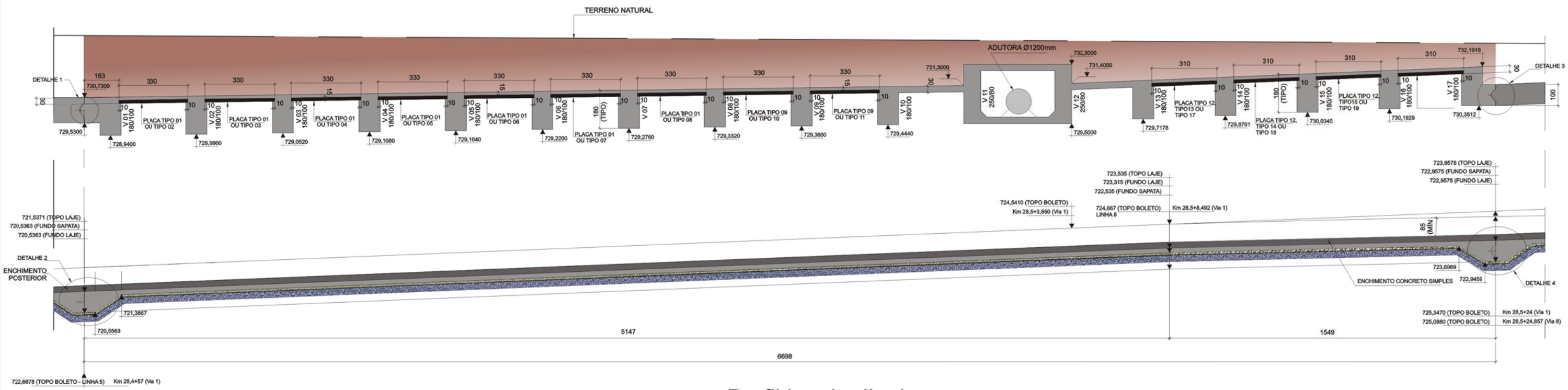


PLANTA CHAVE



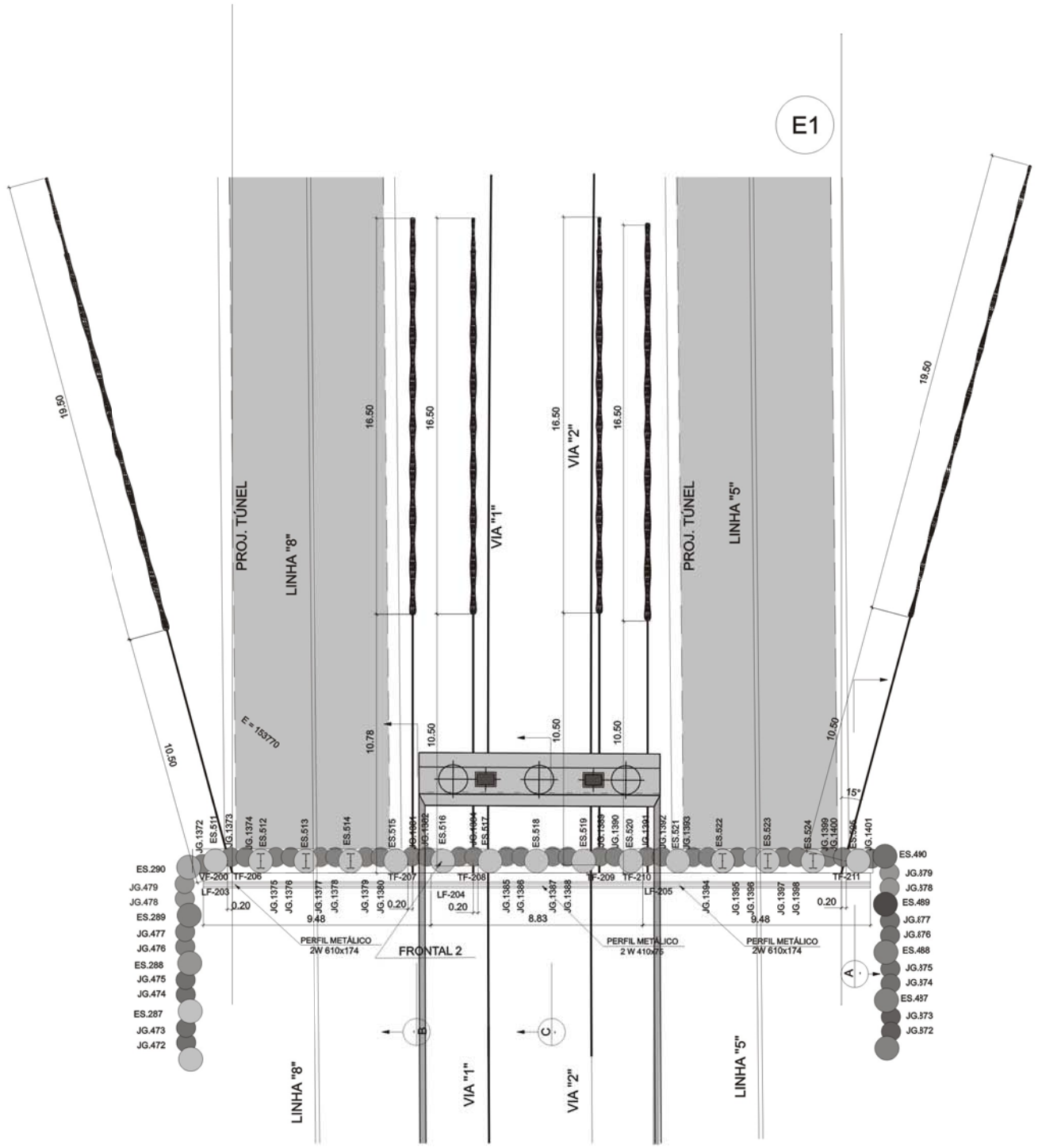
Seção transversal - viga da adutora

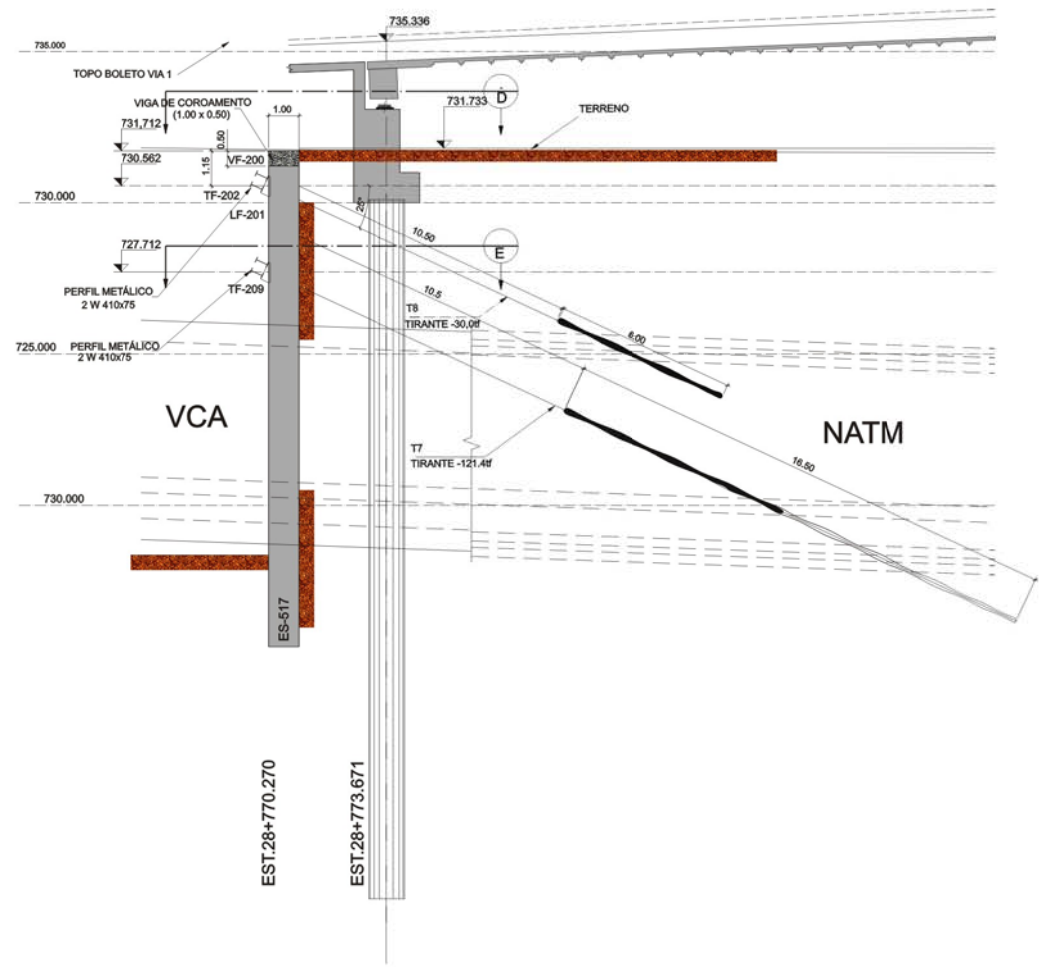
Escala 1:125



Perfil longitudinal

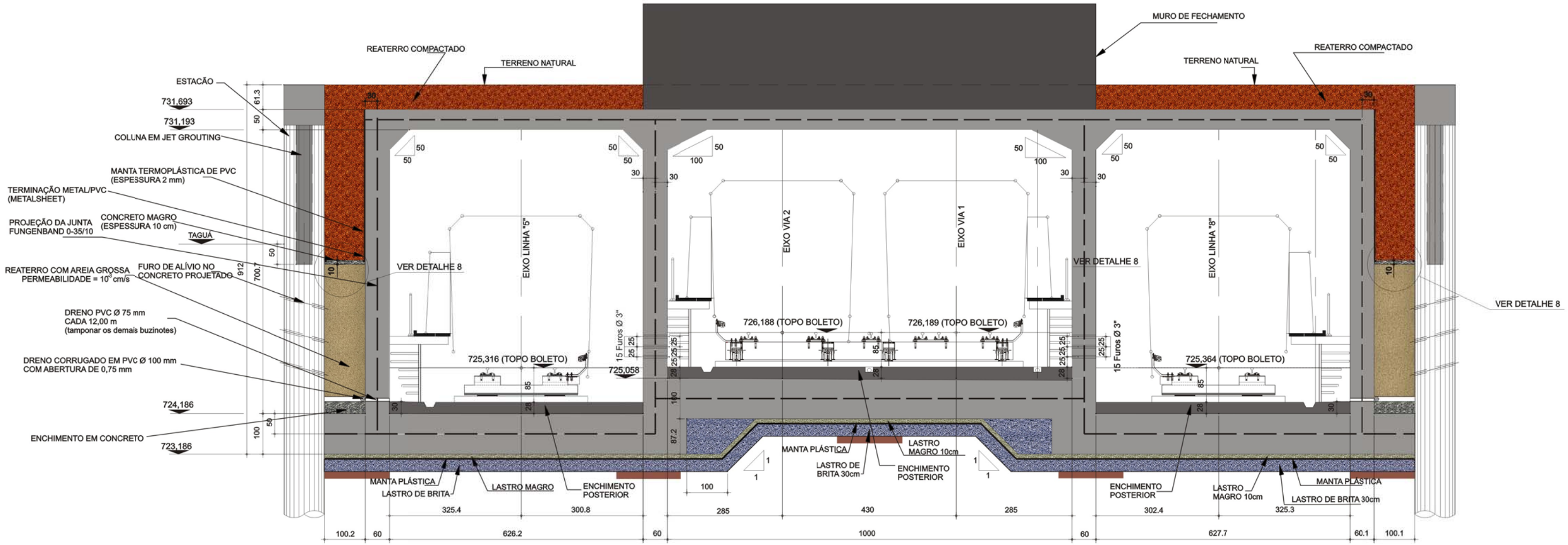
ESCALA 1:200





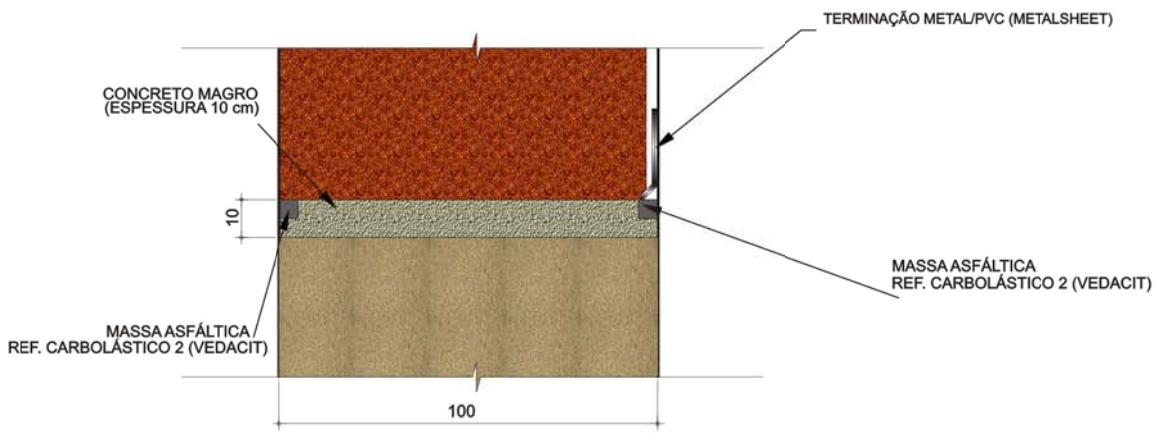
LONGARINA - N 727.712
CORTE E
ESCALA 1:250 -

CORTE C
ESCALA 1:250 -



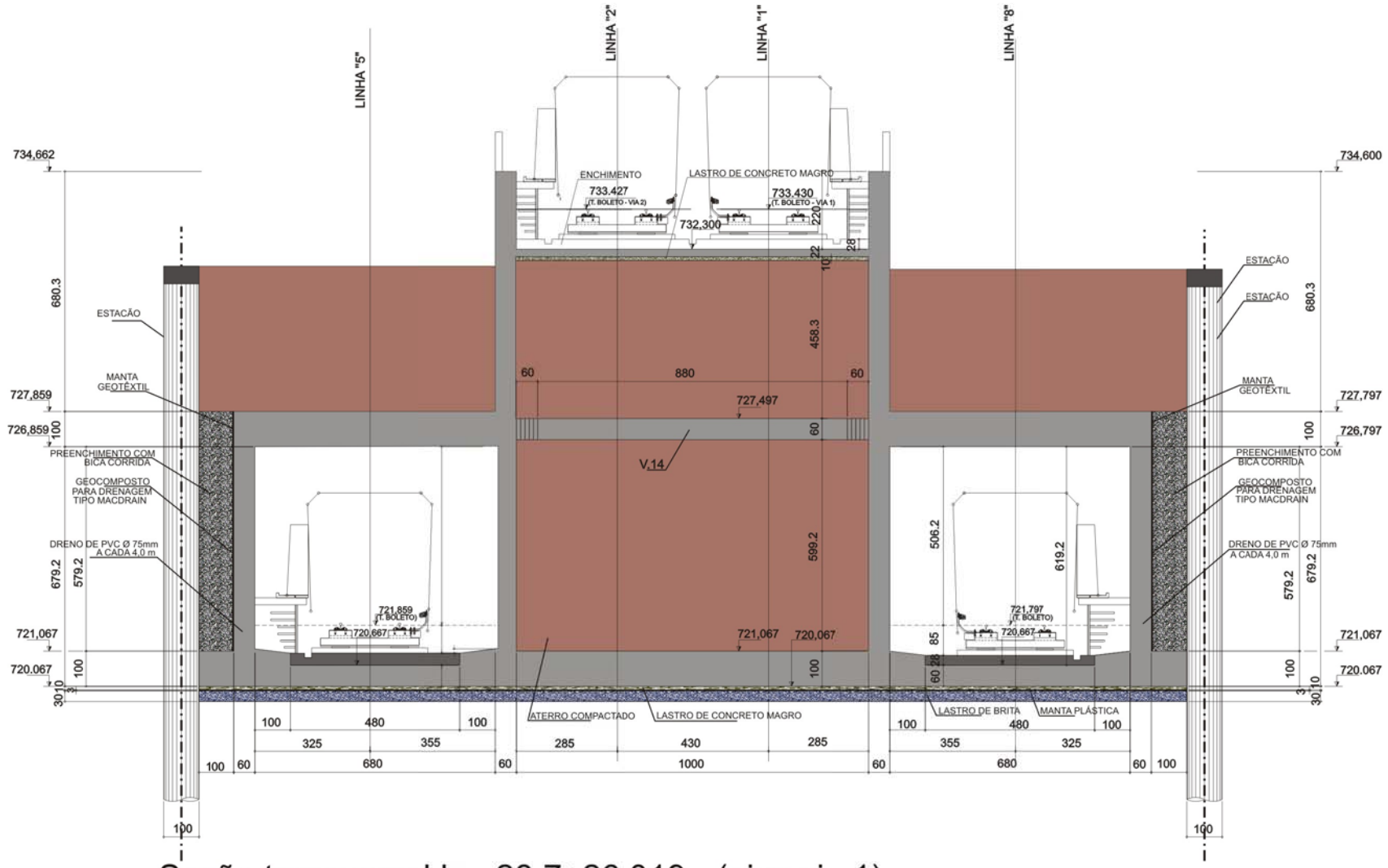
Corte c-c -seção transversal - km 28,5+45

ESCALA 1:100



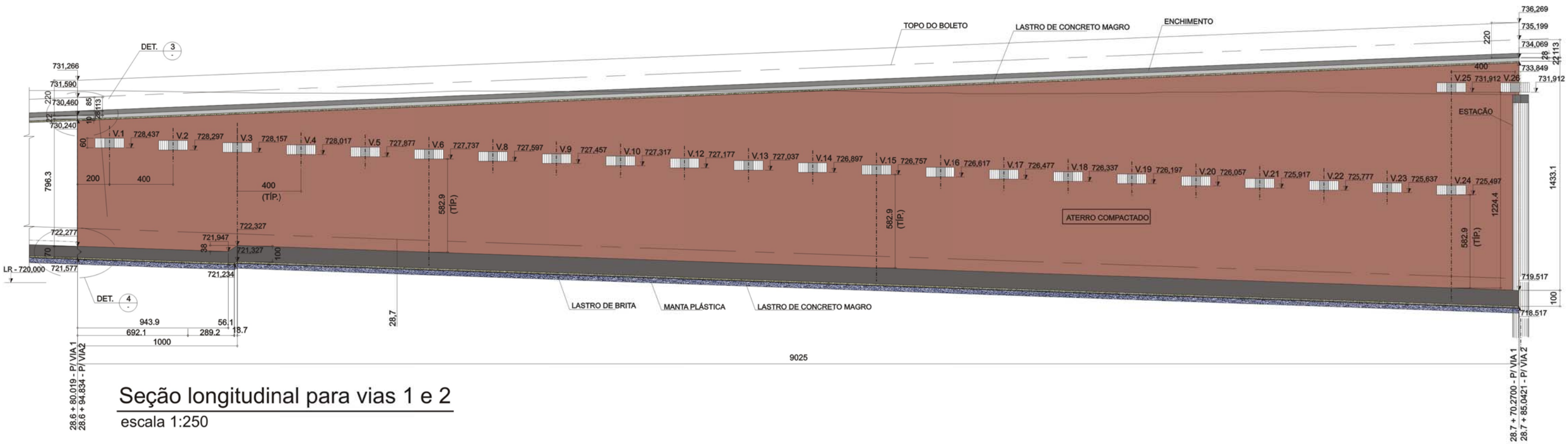
Detalhe 08

SEM ESCALA



Seção transversal km 28.7+26,019 - (eixo via 1)

SEM ESCALA



Seção longitudinal para vias 1 e 2

escala 1:250