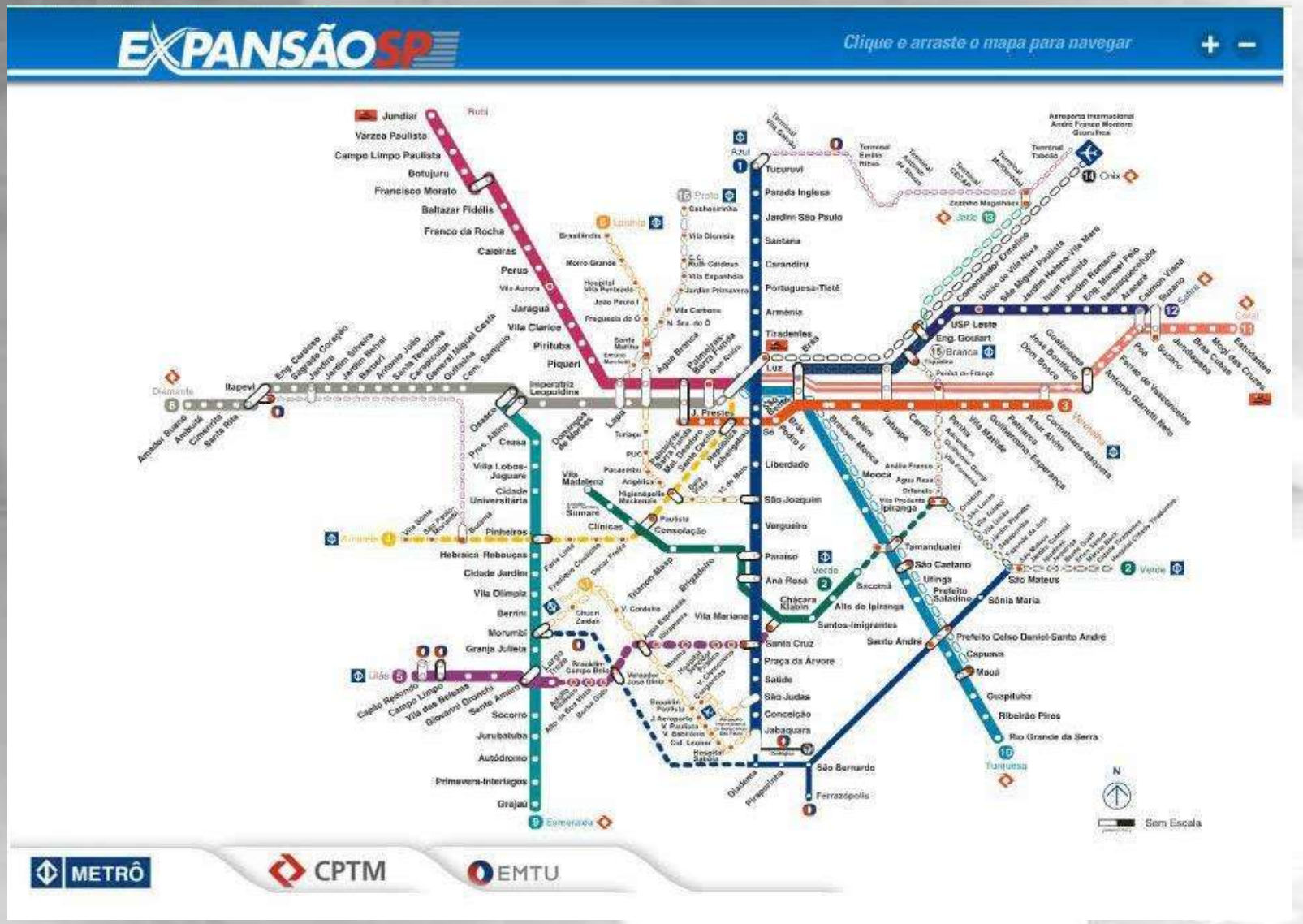
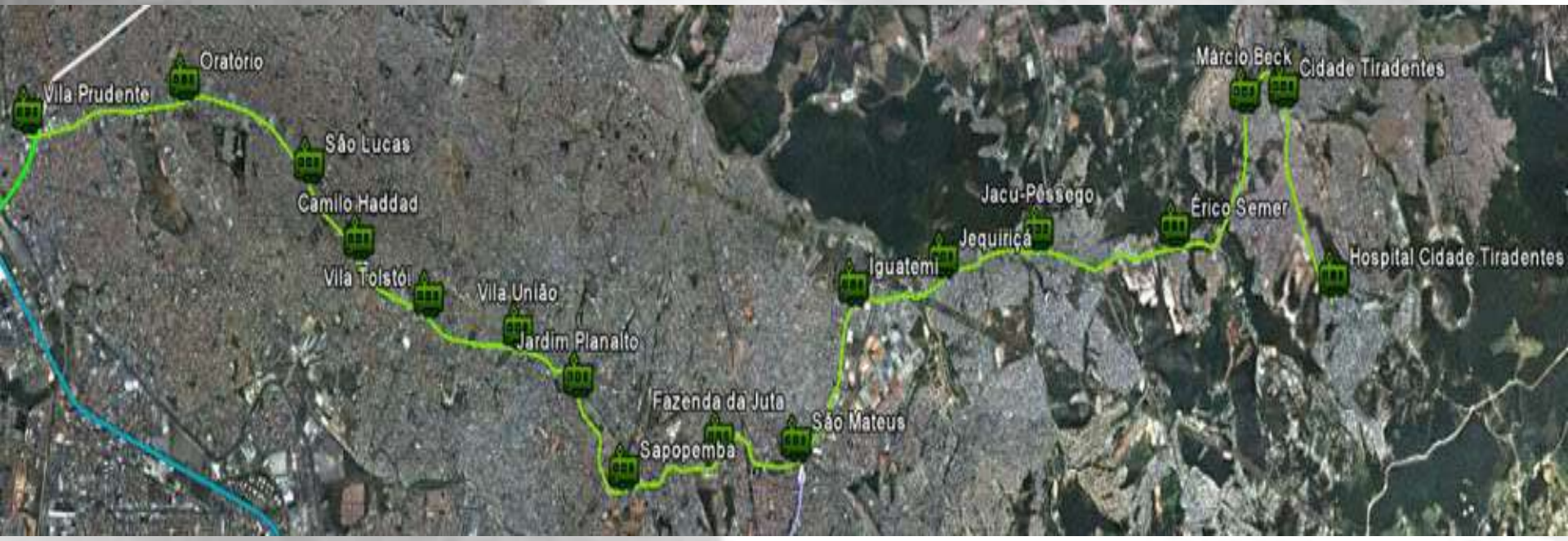
REFORMA DA ESTAÇÃO REPÚBLICA DO METRÔ
DESAFIO NA CONSTRUÇÃO DA LINHA 4 – AMARELA

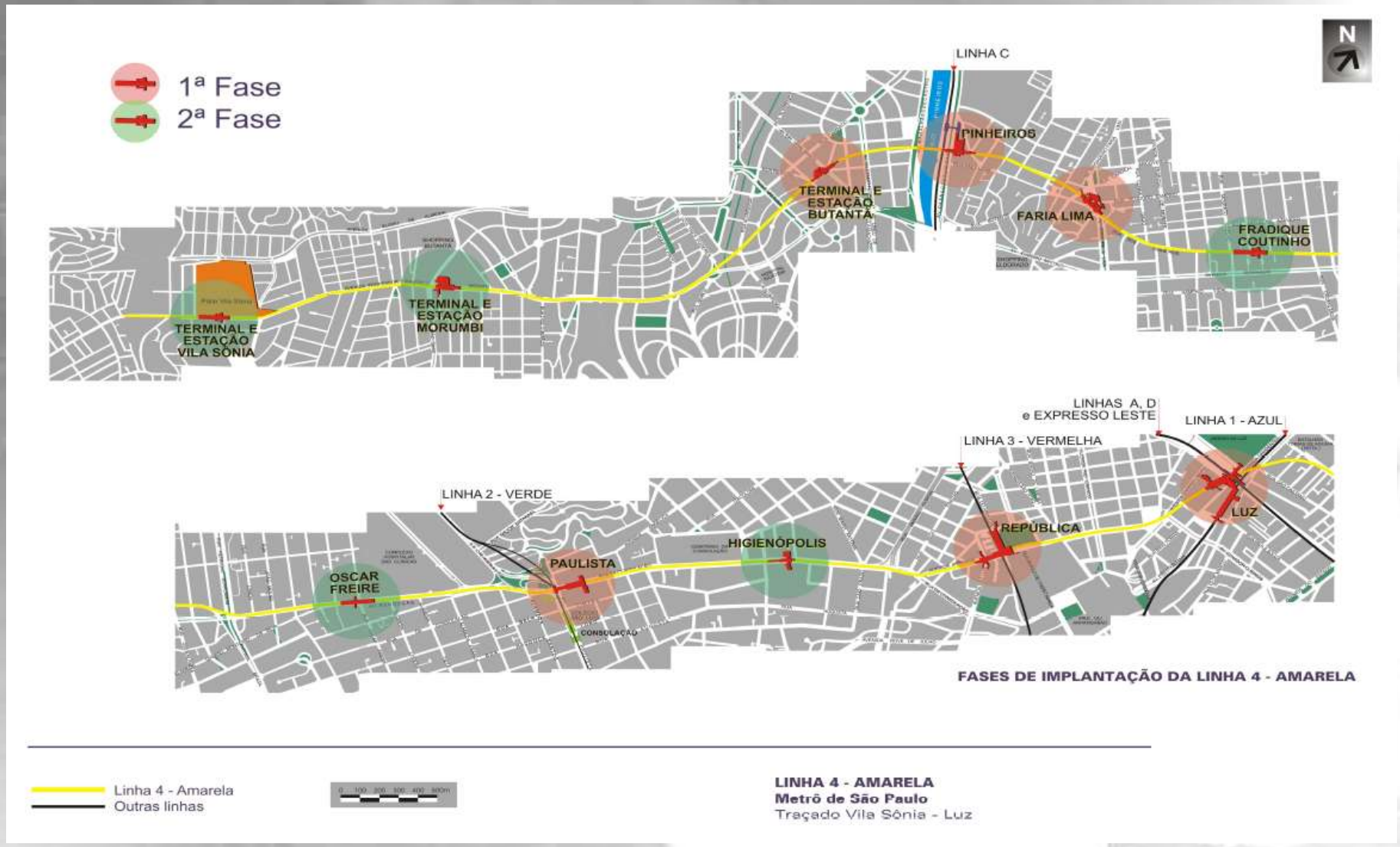
PROENGE ENGENHARIA DE PROJETOS LTDA

A LINHA 4 NO SISTEMA DE TRANSPORTE METROPOLITANO


EXPANSÃO SP
Clique e arraste o mapa para navegar
Jundiaí
Várzea Paulista
Campo Limpo Paulista
Botujuru
Francisco Morato
Baltazar Fidélis
Franco da Rocha
Caieiras
Perus
Jaraguá
Vila Clarice
Pirituba
Piqueri
Itapevi
Imperatriz Leopoldina
Lapa
Barra Funda
Luz
Brás
Tucuruvi
Parada Inglesa
Jardim São Paulo
Santana
Carandiru
Portuguesa-Tietê
Armênia
Tiradentes
Liberdade
São Joaquim
Vergueiro
Paraíso
Ana Rosa
Chácara Klabin
Santa Cruz
Praça da Árvore
Saúde
São Judas
Conceição
Jabaquara
São Bernardo
Ferrazópolis
Vila Madalena
Sumaré
Clínicas
Consolação
Vila Mariana
Pinheiros
Hebraica-Rebouças
Cidade Jardim
Vila Olímpia
Berrini
Morumbi
Granja Julieta
Campo Limpo
Capão Redondo
Vila das Belezas
Giovanni Gronchi
Santo Amaro
Socorro
Jurubatuba
Autódromo
Primavera-Interlagos
Grajaú
Cidade Universitária
Vila Lobos-Jaguaré
Ceasa
Osasco
Prys. Altino
Domingos de Morais
Vila Prudente
Ipiranga
Tamanduateí
São Caetano
Utinga
Prefeito Saladino
Sacomã
Alto do Ipiranga
Santos-Imigrantes
Santo André
Prefeito Celso Daniel-Santo André
Capuava
Mauá
Guapituba
Ribeirão Pires
Rio Grande da Serra
Tamanduateí
Brás
Belém
Tatuapé
Carrão
Penha
Vila Matilde
Guilhermino Esperança
Artur Alvim
Cidade Tiradentes
Corinthians-Itaquera
Brás
Mooca
Vila Prudente
Sacomã
Alto do Ipiranga
Santos-Imigrantes
Santo André
Prefeito Celso Daniel-Santo André
Capuava
Mauá
Guapituba
Ribeirão Pires
Rio Grande da Serra
Sonia Maria
São Mateus
Tiquatira
Vila Ma
Vila Esperança
Carrão
Penha
Vila Matilde
Guilhermino Esperança
Artur Alvim
Cidade Tiradentes
Corinthians-Itaquera
Jardim Helena-Vila Mara
Jardim Romano
Eng. Manoel Feio
Itaquaquecetuba
Aracaré
Calmon Viana
Suzano
Jundiapeba
Brás Cubas
Mogi das Cruzes
Estudantes
Poá
Ferraz de Vasconcelos
Antonio Gianetti Neto
Dom Bosco
José Bonifácio
Guaianazes
USP Leste
Eng. Goulart
Comendador Ermelino
Jardim São Paulo
Jardim Rolinópolis
Jardim Helena-Vila Mara
Jardim Romano
Eng. Manoel Feio
Itaquaquecetuba
Aracaré
Calmon Viana
Suzano
Jundiapeba
Brás Cubas
Mogi das Cruzes
Estudantes
Poá
Ferraz de Vasconcelos
Antonio Gianetti Neto
Dom Bosco
José Bonifácio
Guaianazes
Aeroporto Internacional André Franco Montoro Guarulhos
Terminal Tatuapé
Terminal Cidade Tiradentes
Terminal Itaquera
Terminal Vila Carrão
Terminal Vila Prudente
Terminal Sacomã
Terminal Jardim Angela
Terminal Capelinha
Terminal Santo Amaro
Terminal Pinheiros
Terminal Lapa
Terminal Barra Funda
Terminal Pompeia
Terminal Bandeira
Terminal Ipiranga
Terminal Tatuapé
Terminal Belém
Terminal Brás
Terminal Luz
Terminal Tucuruvi
Terminal Vila Guilherme
Terminal Santana
Terminal Jardim São Paulo
Terminal Parada Inglesa
Terminal Tiradentes
Terminal Armênia
Terminal Portuguesa-Tietê
Terminal Carandiru
Terminal Santana
Terminal Jardim São Paulo
Terminal Parada Inglesa
Terminal Tucuruvi
Terminal Vila Guilherme


Oratório
Vila Prudente
São Lucas
Camilo Haddad
Vila Tolstói
Vila União
Jardim Planalto
Fazenda da Juta
Sapopemba
São Mateus
Iguatemi
Jequiriçá
Jacu-Pêssego
Érico Semer
Márcio Beck
Cidade Tiradentes
Hospital Cidade Tiradentes

Monotrilho



Etapas de construção da Linha 4

A Linha 4 tem extensão de 12,8 km, com 11 estações. Ao funcionar de forma completa, prevê-se o transporte de 900.000 passageiros por dia, com 24 trens de 6 vagões.

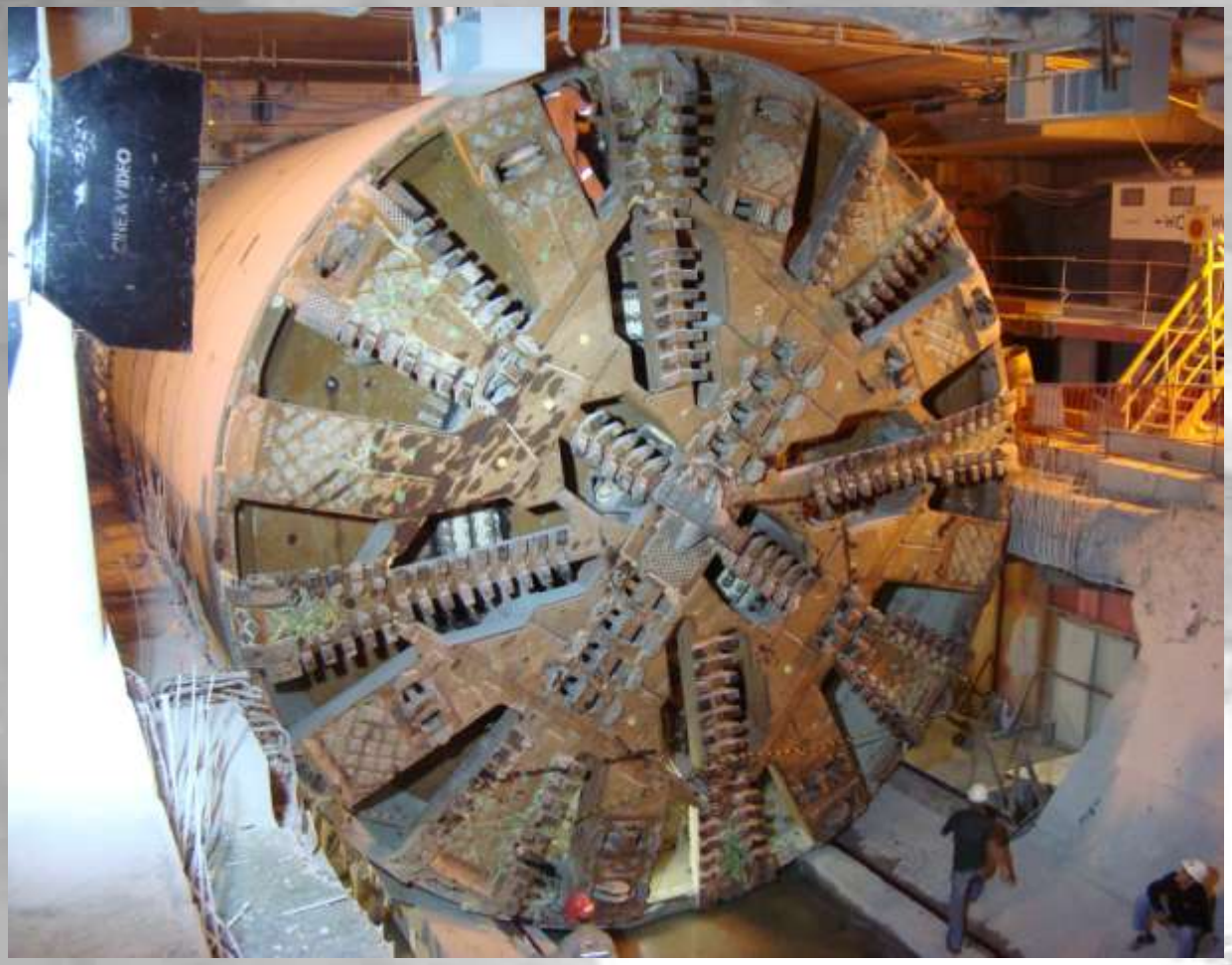
MÉTODOS CONSTRUTIVOS DA LINHA AMARELA

"Cut and cover" ou VCA (vala a céu aberto), que, como o nome está indicando, consiste em realizar a escavação a céu aberto, com a devida contenção do terreno através de paredes de contenção estroncadas ou com tirantes provisórios (podendo ser paredes diafragma ou com estacas metálicas, estacas escavadas, estacas hélice, etc.). Em seguida construir as estruturas projetadas e, depois executar a cobertura de terra até a superfície, restabelecendo o sistema viário local. Com esse método foram construídos 900 metros de túnel (falso túnel) e a estação Faria Lima, estando também previsto para a futura Estação Fradique Coutinho.

"Cut and cover" - Método invertido. : A construção começa pelas paredes de contenção do terreno, como no VCA, e pequena escavação seguida da laje de cobertura, depois a escavação completa por baixo da laje. Este foi o procedimento usado na construção da parte nova da República.

NATM (New Austrian Tunneling Method), que consiste na escavação da seção do túnel por partes (conforme plano estabelecido para cada caso), em geral seguida de concreto projetado em fina camada, cambotas metálicas (entreliçadas), nova camada de concreto projetado e finalmente o revestimento secundário. Com esse método foram construídos 5,5km de túneis e as estações Butantã, Pinheiros, Paulista e Luz, estando também previsto para as estações Oscar Freire e Higienópolis.

Escavação com equipamento denominado TBM (Tunnel Boring Machine), composto de um segmento principal, pesando mais de 1.000 toneladas e com cerca de 11 metros de comprimento (Shield), que realiza a perfuração, e uma série de dispositivos auxiliares, ficando o total com aproximadamente 73 metros. No presente caso, o Shield tinha 9,46m de diâmetro e construiu 6,4km de túneis, comportando as duas vias.



Vista frontal do Shield

- Peso aproximado do shield: 1.050tf
- Peso aproximado do backup: 800tf
- Diâmetro de escavação: 9,5m
- Velocidade de avanço: 30m / dia
- Tempo de montagem de um anel: ~25min

Vista lateral do TBM (com o Back up)

No Back up do TBM existem vários dispositivos para serviços diversos, entre eles:

- **tubos de ar comprimido;**
- **tubos de graute de cimento;**
- **tubos de espuma para estabilizar a frente;**
- **transformadores;**
- **rosca sem fim para retirar o material escavado pela roda de corte;**
- **correias transportadoras do material escavado até o poço de retirada;**
- **tubos de ventilação;**
- **sala com medidores de dados instrumentais;**
- **dispositivo de montagem das aduelas;**

O trenzinho que traz as aduelas premoldadas encaixa-se dentro do back up. Ele corre sobre trilhos que vão sendo montados à medida que o Shield avança. Os trilhos montados para o Back up são retirados e reaproveitados, assim que se tornam desnecessários.

Para completar um segmento de 1,50m de túnel são colocadas 7 aduelas iguais , mais uma de fecho. O tempo gasto é de aproximadamente 25 minutos.

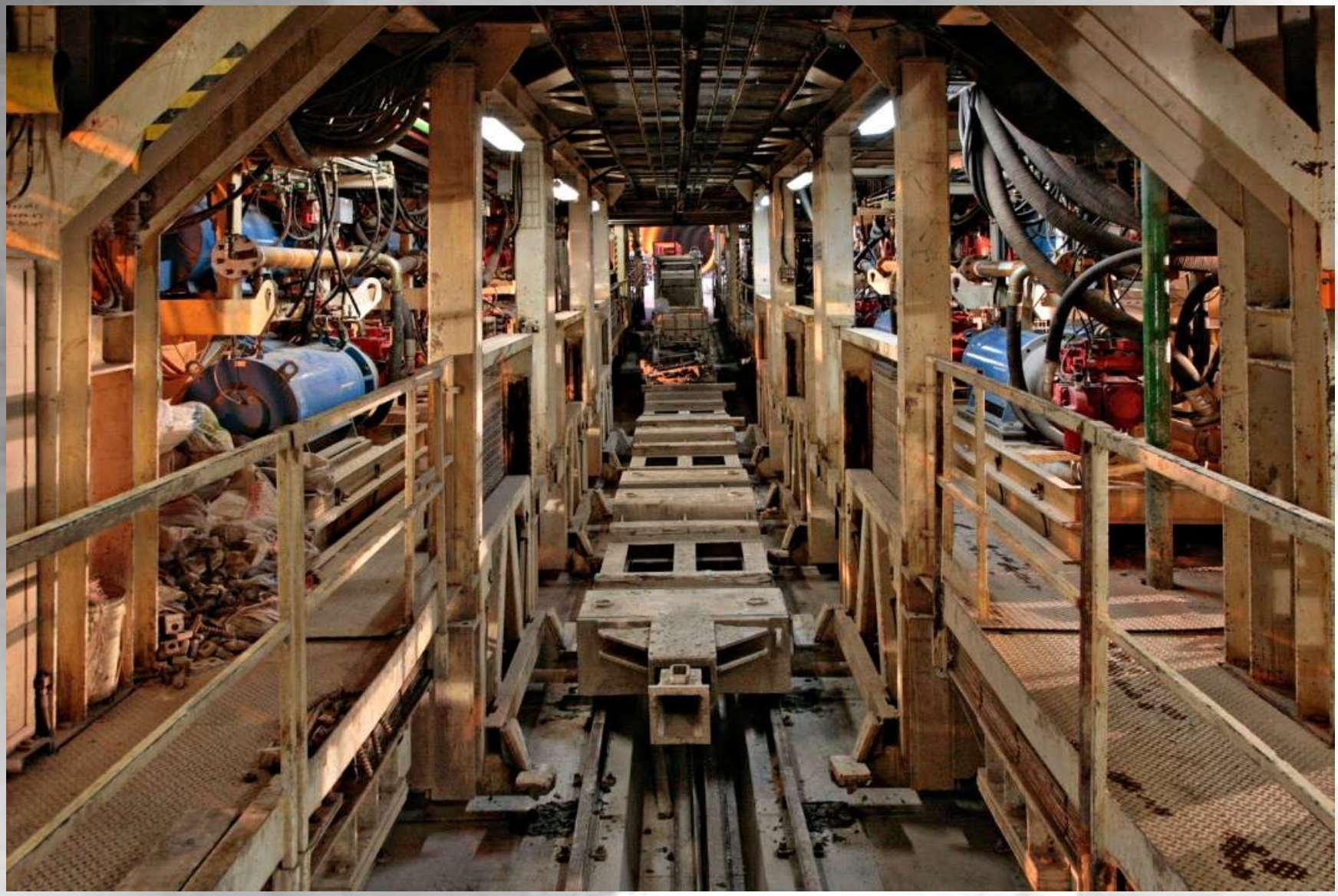
Colocação de uma aduela para deslocamento do TBM

Ligação entre aduelas

Sapatas que reagem contra as aduelas

O deslocamento do TBM se faz pela ação de pistões reagindo contra as aduelas já colocadas. O Shield possui na parte de trás 15 sapatas com dois pistões em cada.

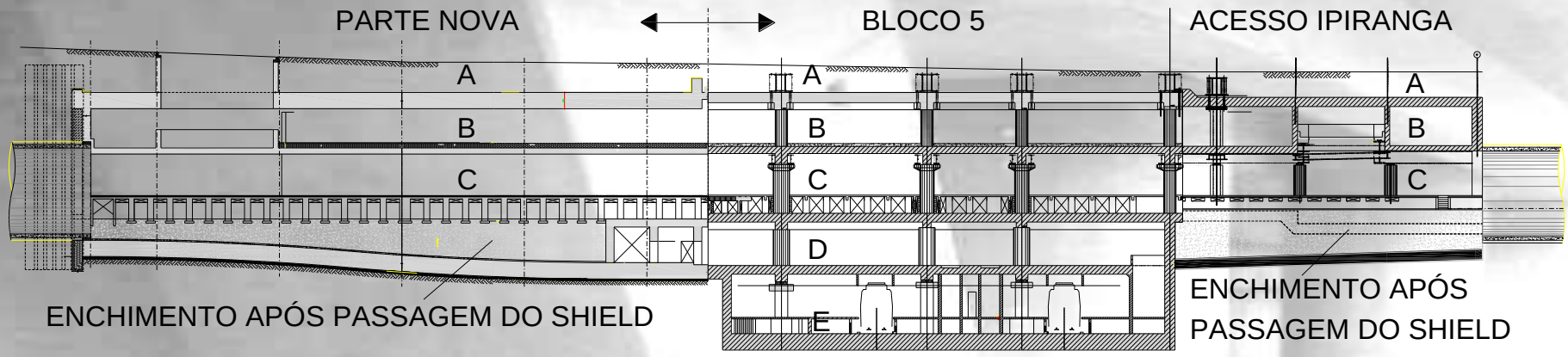
Trenzinho para transporte das aduelas



Trenzinho encaixado no Back up

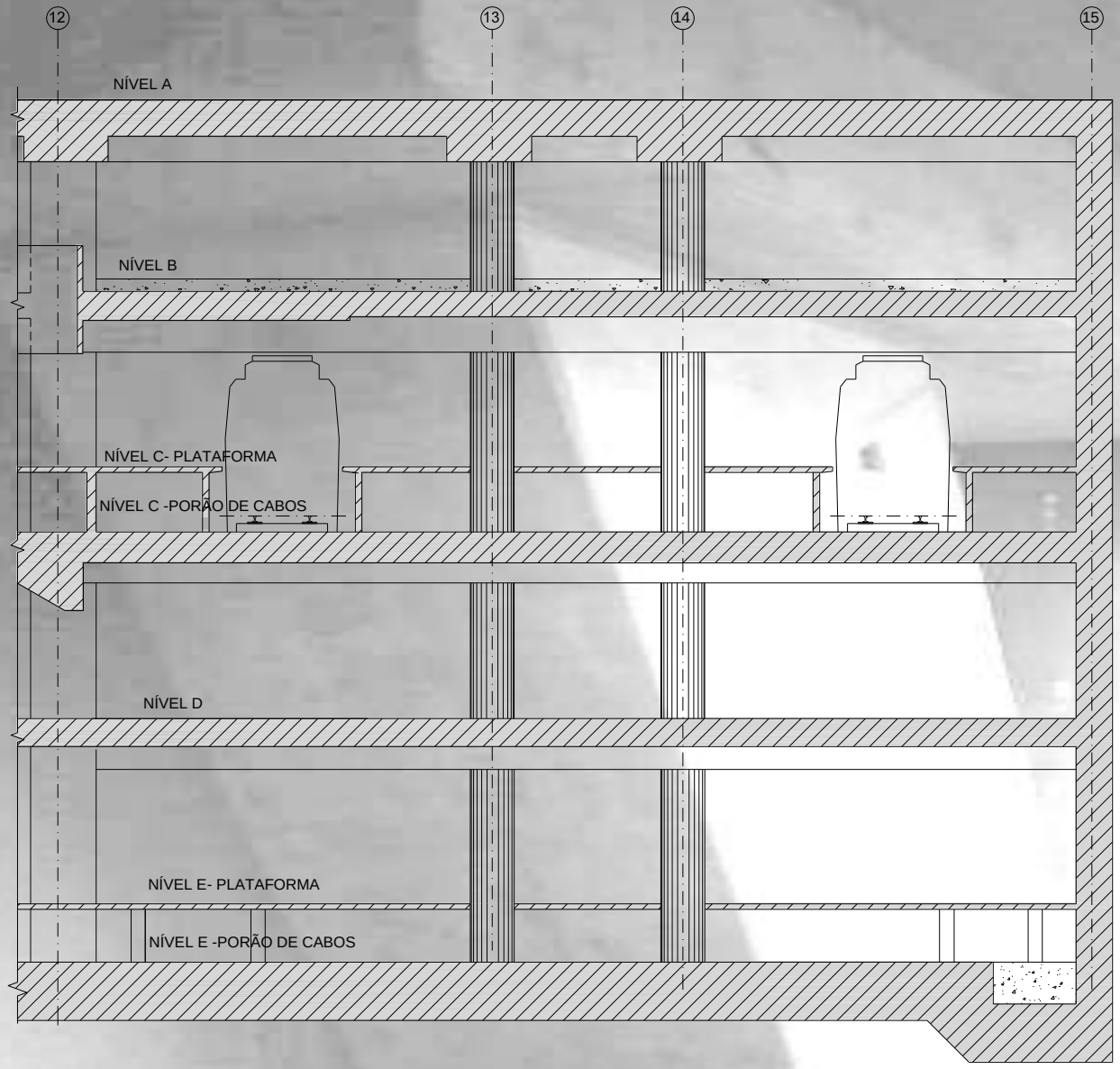
ESTAÇÃO REPÚBLICA

Planta esquemática da Estação República



Estação atual - Corte longitudinal na direção da Linha 4

A parte nova possui três niveis (A, B e C), com funções de completar a plataforma de embarque da linha 4 e abrigar tudo que é necessário para operação dessa linha (salas técnicas, cabos de alimentação, bloqueios, etc.).



A estação antiga já previa a passagem da Linha 4, no nível C, porém com plataforma central, ao longo da qual foram localizados pilares e paredes estruturais. Com a decisão de passar com o TBM por dentro da estação, foi necessário construir novos pilares em futuras plataformas laterais, transferir para eles as cargas e demolir todos os elementos estruturais no caminho do TBM.

Bloco 5 da estação antiga, com plataforma central no nível C

MODIFICAÇÕES NAS ESTRUTURAS EXISTENTES

METODOLOGIA PARA A TRANSFERÊNCIA DE CARGAS

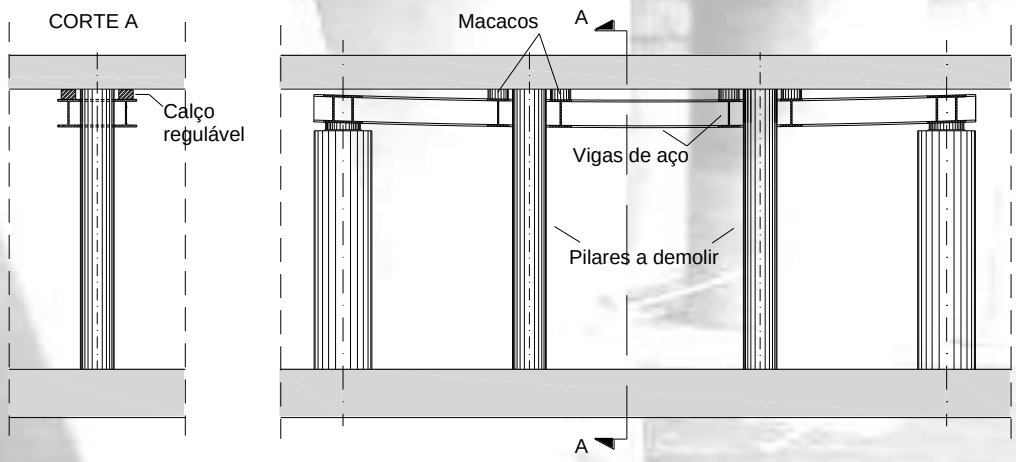
Para transferir as cargas que estavam sobre as estruturas a demolir para novas estruturas, foram estudadas duas alternativas:

a) alterar as estruturas existentes a elas incorporando novos elementos estruturais, tais como: engrossamentos, armaduras de reforço, protensões, etc., de modo a adequá-las à nova situação de apoios e vãos; ou

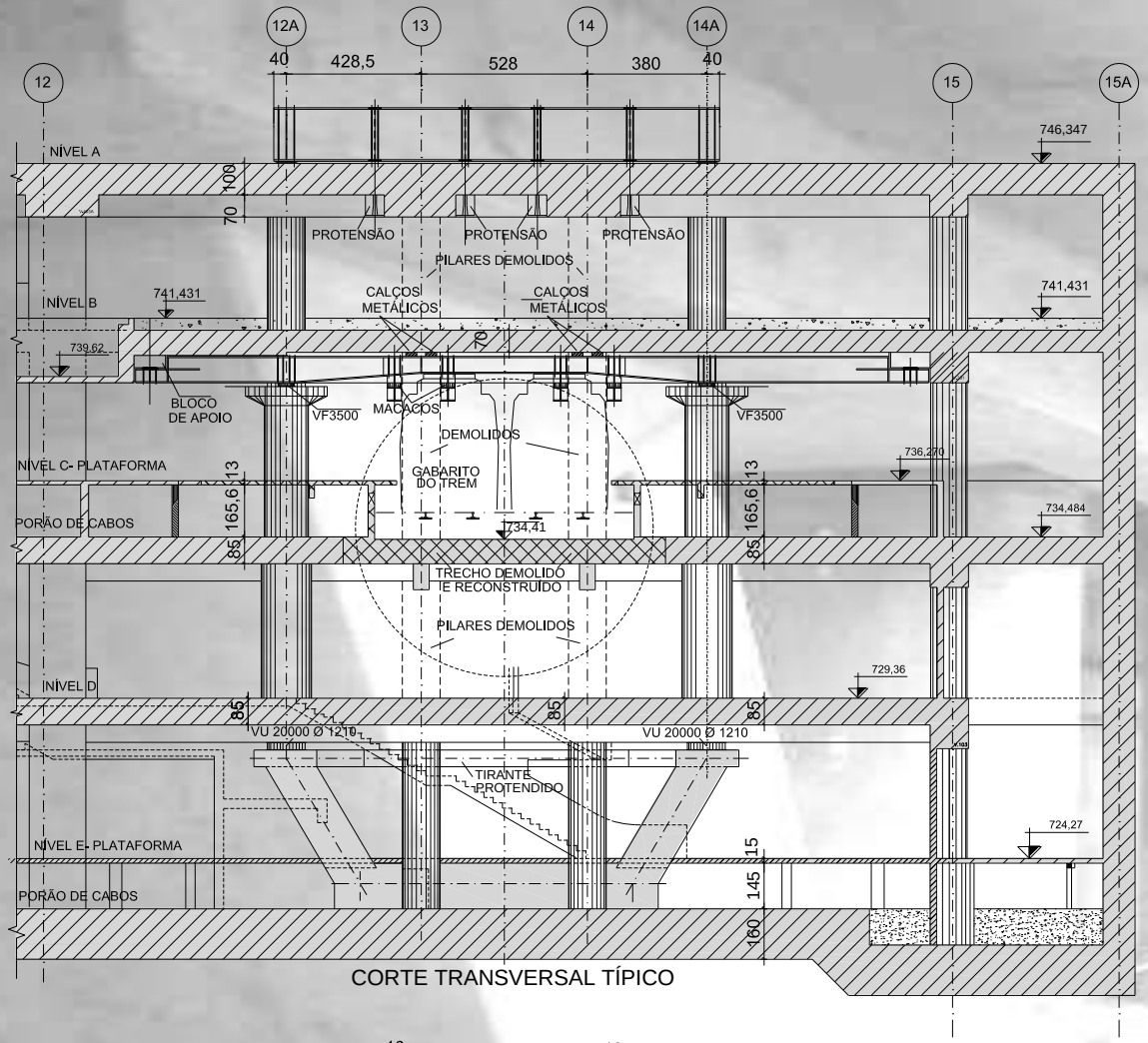
b) construir estruturas independentes das existentes, capazes de receber delas as cargas atuais e transferi-las para os novos apoios.

Foi adotada a segunda alternativa, utilizando-se vigas de aço (bastante flexíveis se comparadas com a estrutura existente), a qual possibilitou as condições desejáveis indicadas a seguir (ilustradas na figura)

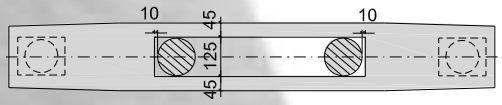
- **Melhor conhecimento dos esforços introduzidos na estrutura existente bem como sua distribuição.**
- **Aplicação dos esforços para transferência o mais próximo possível do elemento a ser descarregado e posteriormente demolido.**
- **Mínimas deformações nas estruturas existentes (da ordem de milímetro) durante a transferência, não somente evitando nelas causar anomalias como também permitindo a continuidade de funcionamento da estação para a Linha 3**



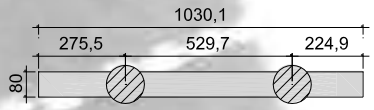
- **Graças aos deslocamentos grandes nas vigas de aço, minimização do percentual de eventuais perdas por recuperação elástica, por exemplo na colocação das cunhas, para retirada dos macacos.**



CORTE TRANSVERSAL TÍPICO



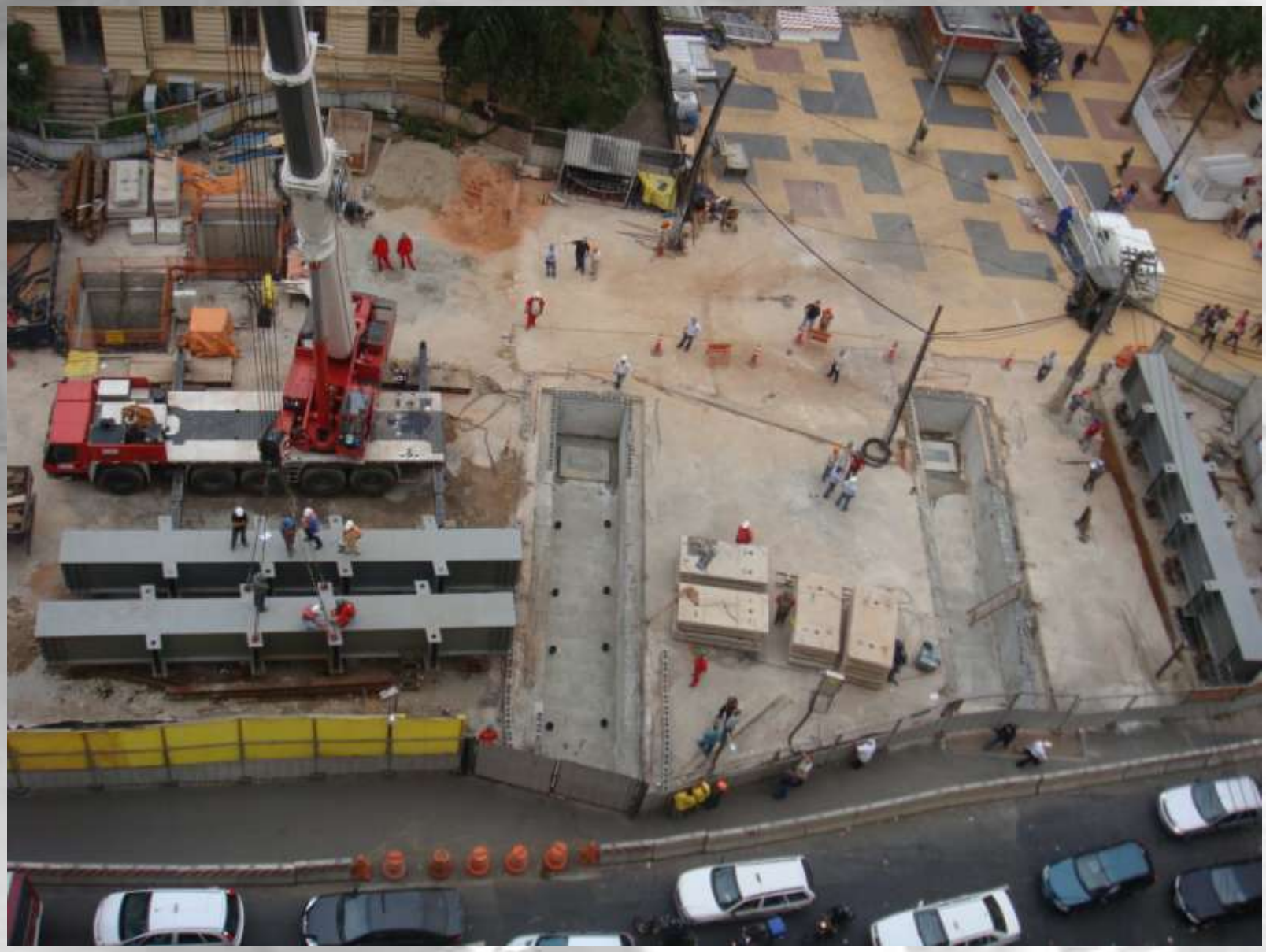
CORTE HORIZONTAL DOS TIRANTES



CORTE HORIZONTAL DA ESCORA

Modificações no Bloco 5

Vigas de aço para o nível A, armazenadas no canteiro de obras



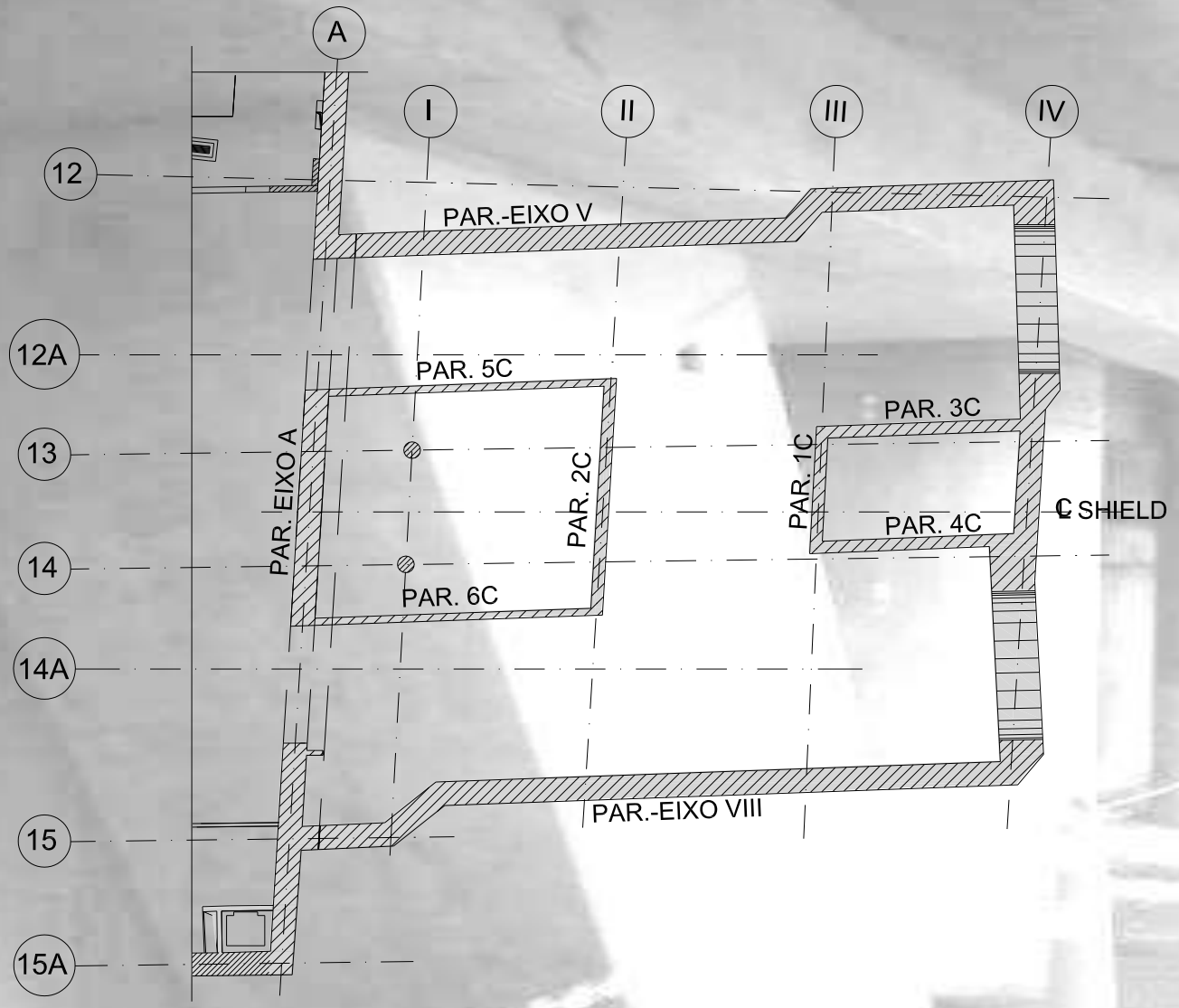
Berços de concreto para assentamento das vigas de aço

Viga no berço, vendo-se duas das oito ancoragens superiores e a manta asfáltica.

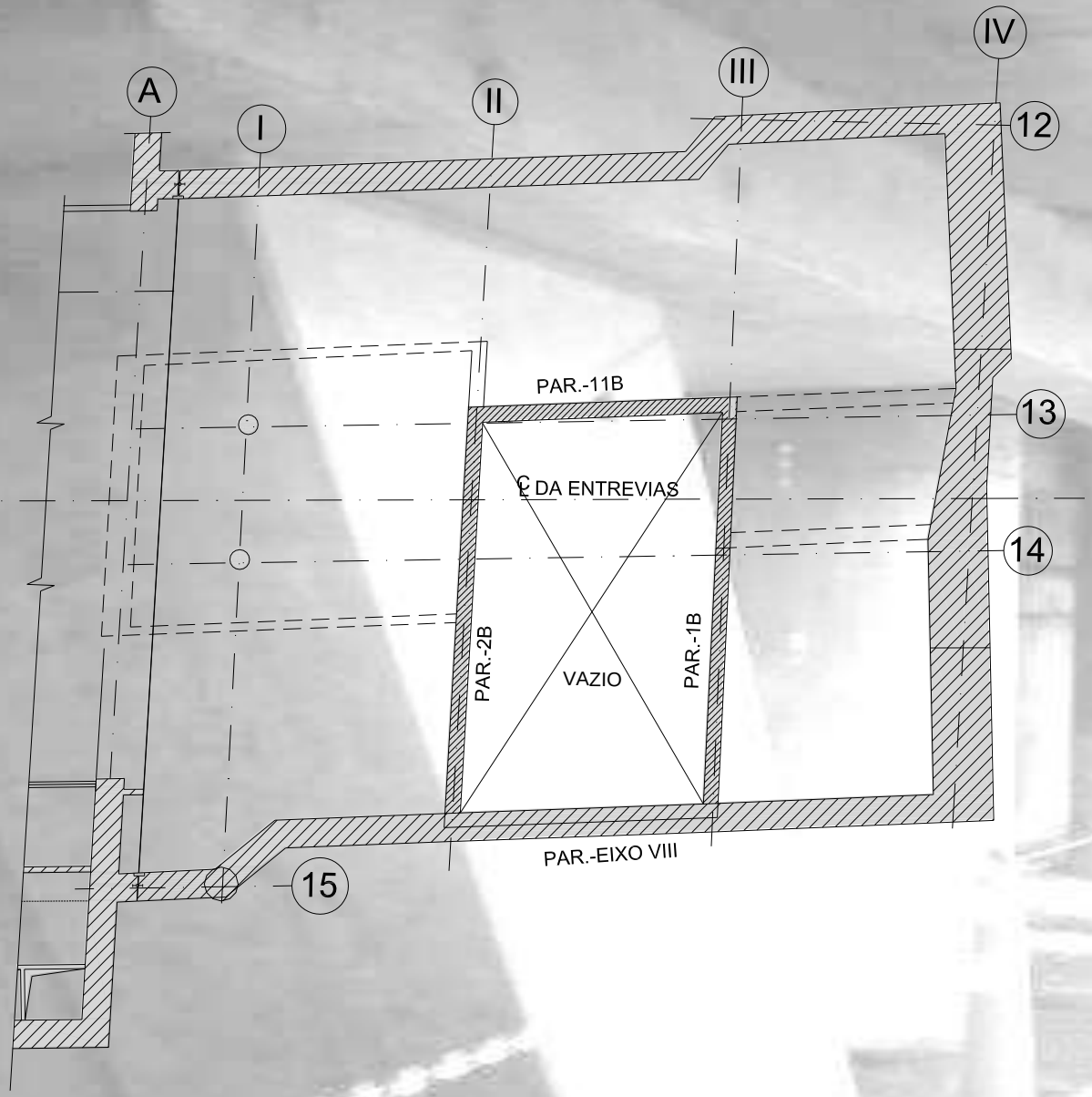
Vigas de aço sobre os capitéis, com a viga de concreto no meio

Escoramento da parede do lado sudeste devido à descontinuidade da laje

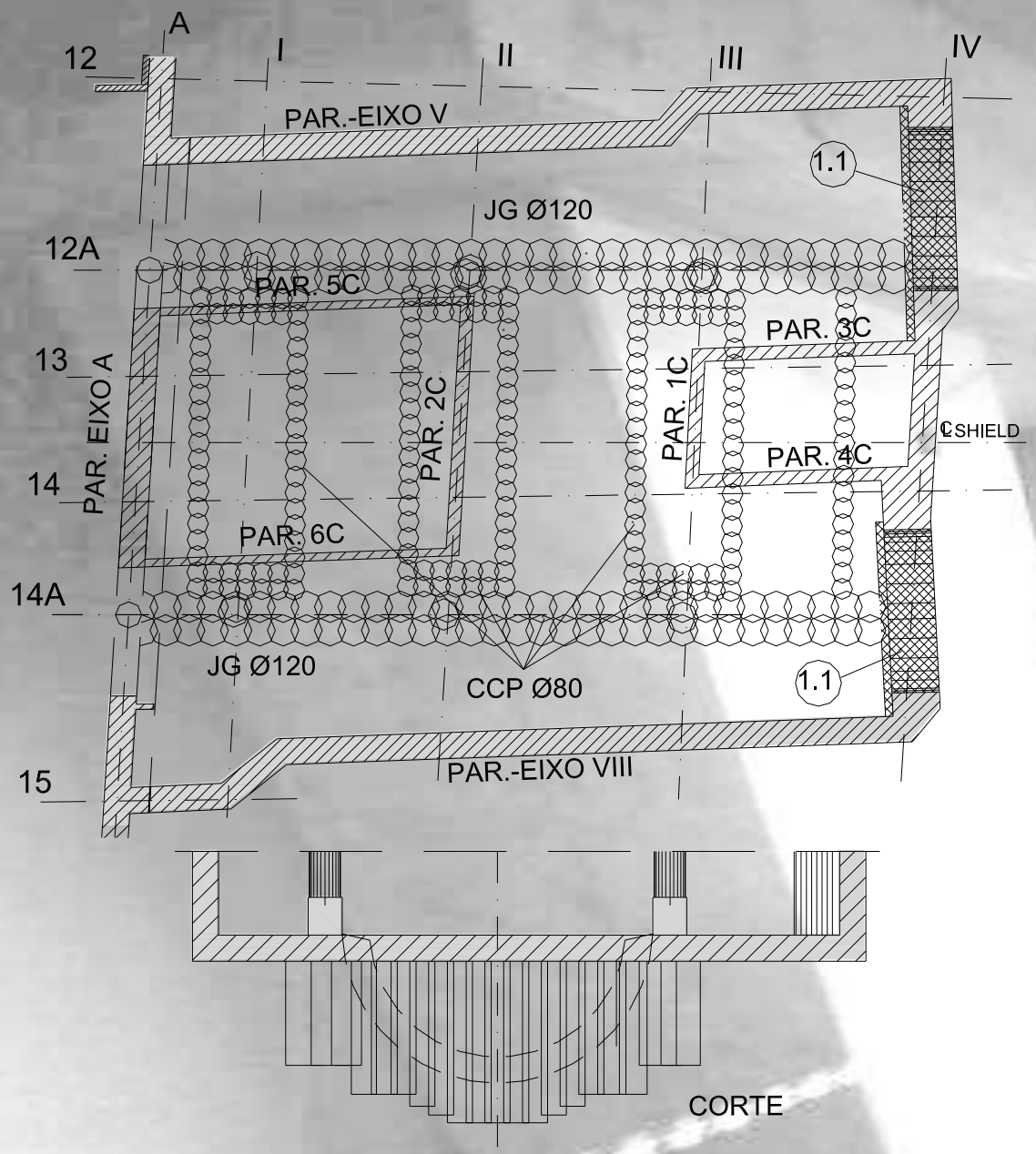
ACESSO IPIRANGA



Pilares e paredes internas a demolir existentes no nível C



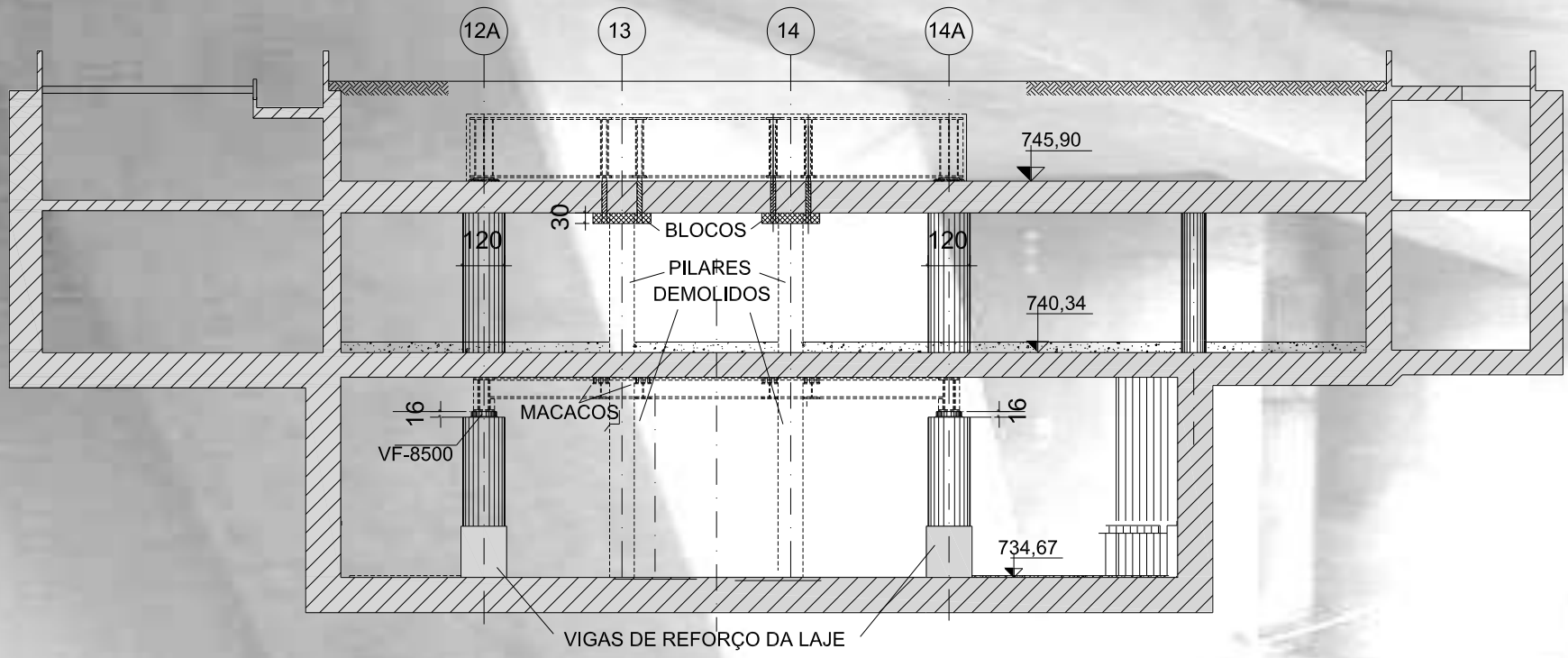
Pilares e paredes estruturais no nível B



Antes de construir os novos pilares e tendo em vista a escavação para construção da abóbada invertida, foi feito um reforço do terreno sob a laje do nível C. Note-se que nessa ocasião o lençol já estava rebaixado.

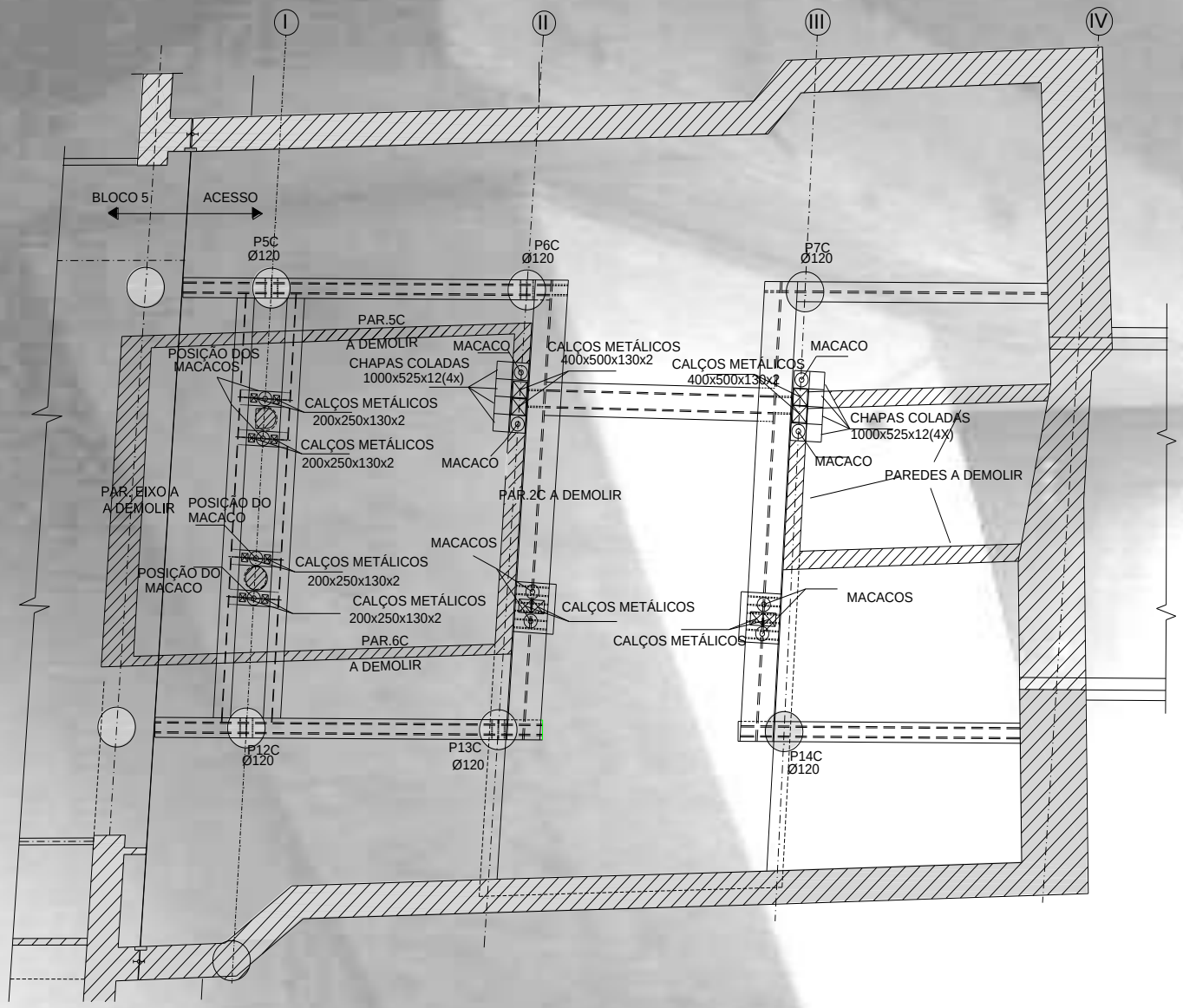
Reforço do solo de fundação, sob a laje do nível C

Como as paredes estruturais acima do nível B continuaram dando apoio à laje de cobertura, a transferência de cargas no nível A foi necessária apenas no eixo I, para permitir a demolição dos pilares existentes. O procedimento de transferência foi o mesmo utilizado no Bloco 5.



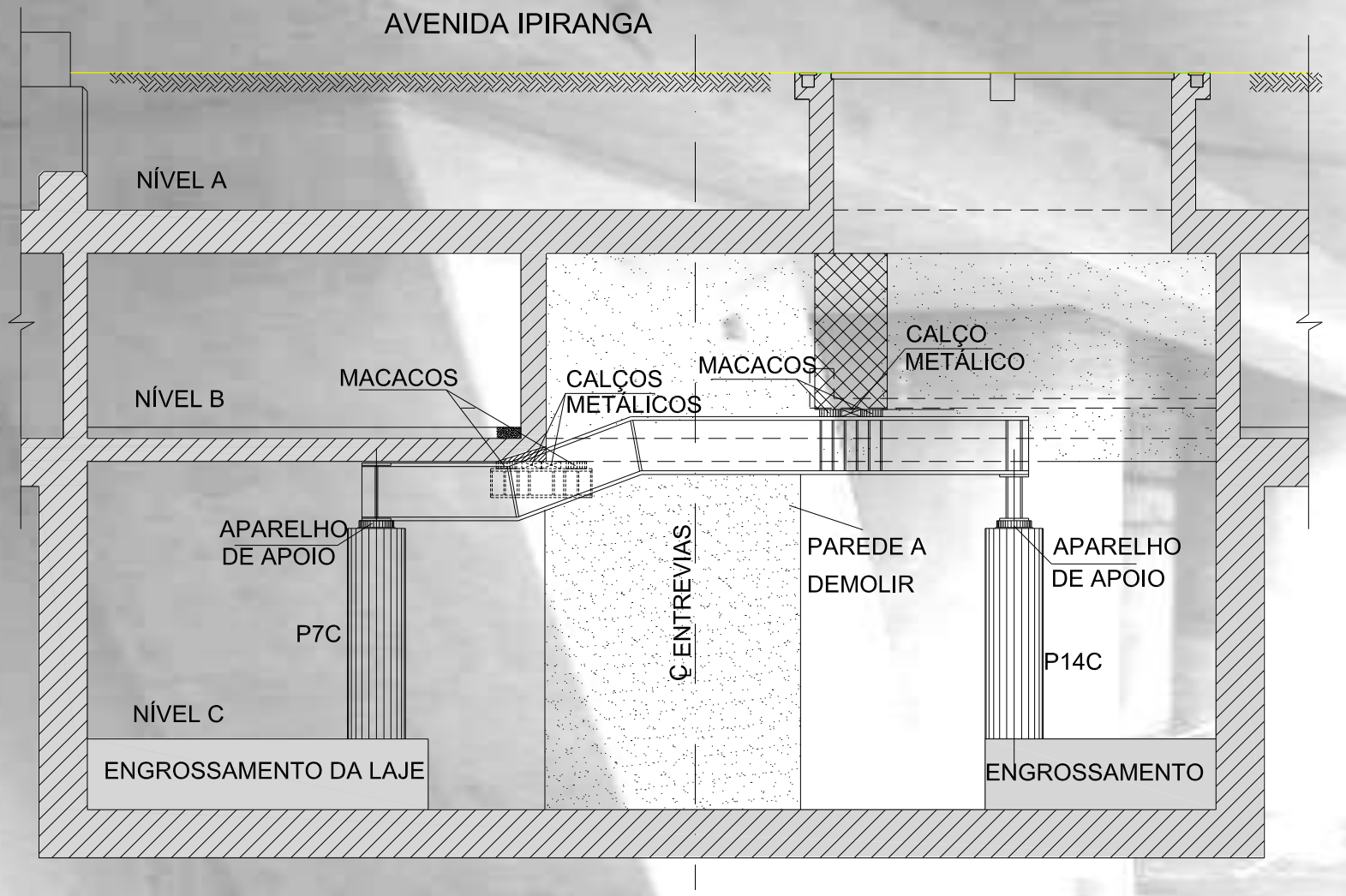
Acesso Ipiranga - Seção no eixo I

A transferência de cargas no nível B foi feita através de um conjunto de vigas de aço posicionadas no teto do nível C e apoiadas nos novos pilares, como mostra a figura a seguir.



Planta do nível C, com as vigas de aço em seu teto

Para demolição dos pilares existentes no eixo I, já sem as cargas da cobertura, foram utilizadas duas vigas isostáticas, ladeando os respectivos pilares, com alturas compatíveis com o espaço disponível. As vigas dos eixos II e III, muito solicitadas, principalmente devido às cargas provenientes da cobertura, necessitavam de grande altura, interferindo com os gabaritos do TBM e dos trens. Para resolver o problema, foi aproveitado o vazio na laje do nível B entre as paredes existentes a partir desse nível.

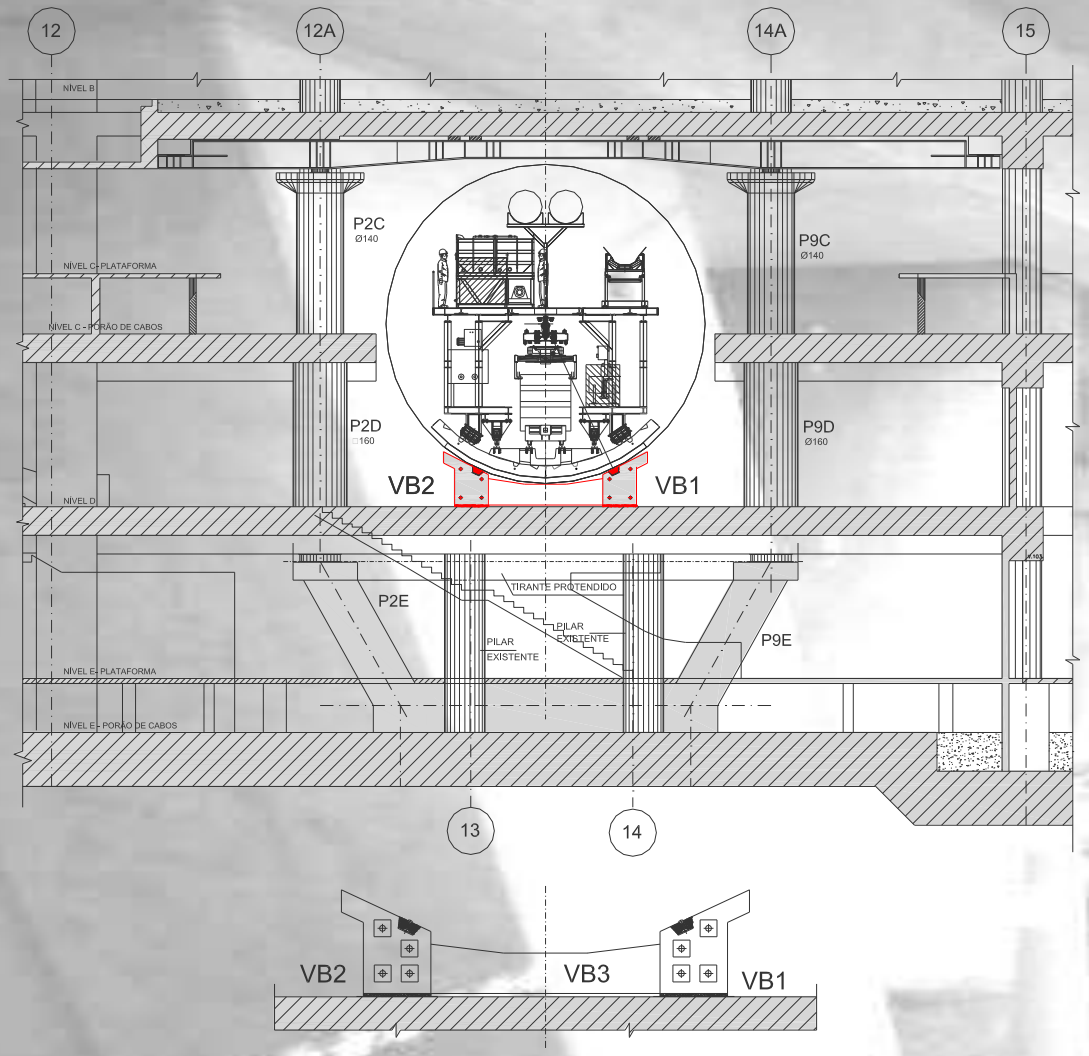


Corte no eixo III (no eixo II a situação é semelhante)

ESTRUTURAS PROVISÓRIAS PARA PASSAGEM DO TBM

BLOCO 5

Tendo sido demolidos os pilares antigos e feita a demolição parcial da laje do nível C, foi construído um berço para o arrasto do Shield ao longo do Bloco 5.



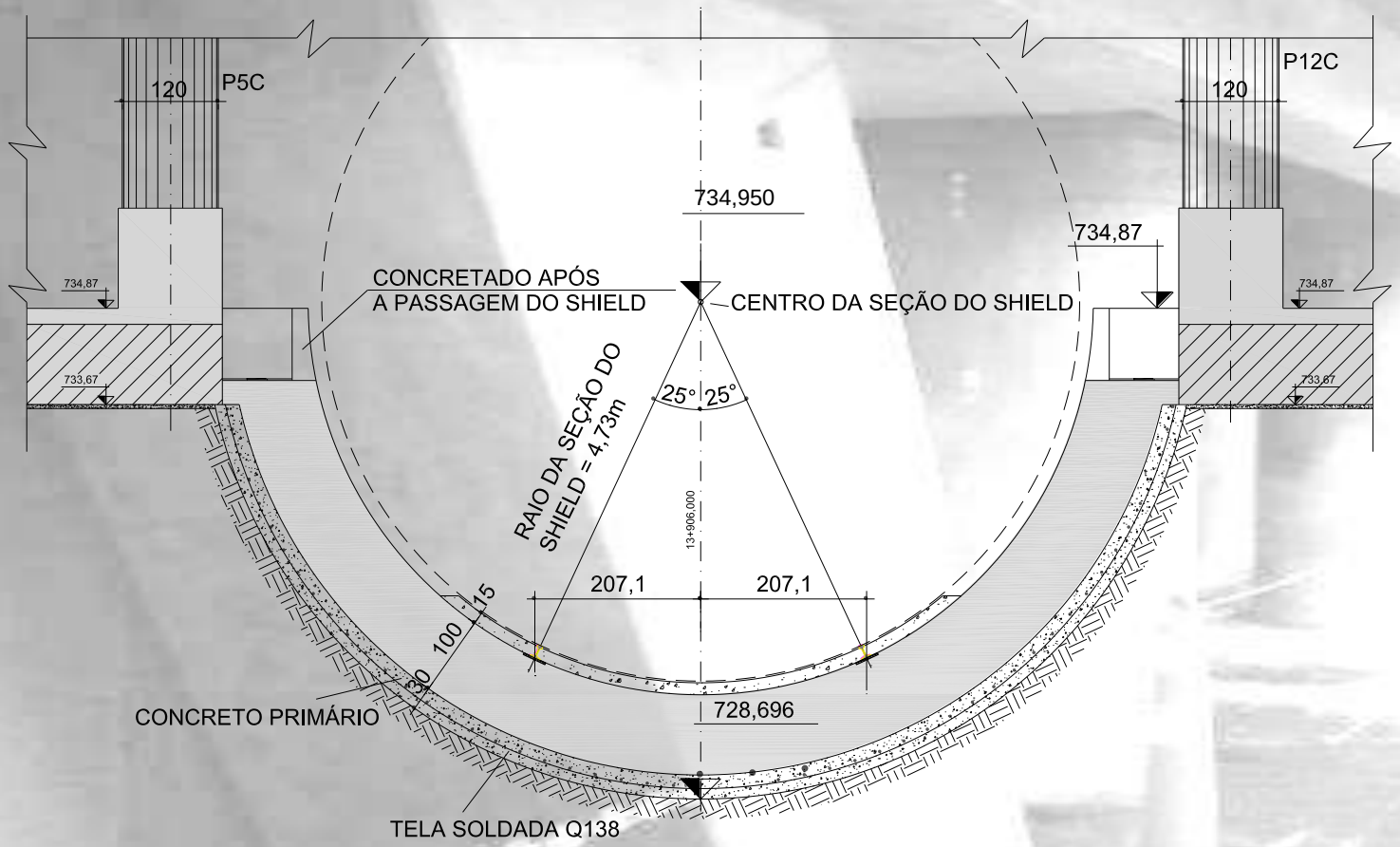
Berço para passagem do TBM no Bloco 5

Berço para passagem do TBM

Escoramento no nível E para auxiliar a sustentação do berço

ACESSO IPIRANGA

No Acesso Ipiranga foi necessário construir uma abóbada invertida para completar o gabarito do Shield. A demolição da laje do nível C, a escavação e construção da abóbada foram feitos por setores, contornados pelas colunas de CCP.

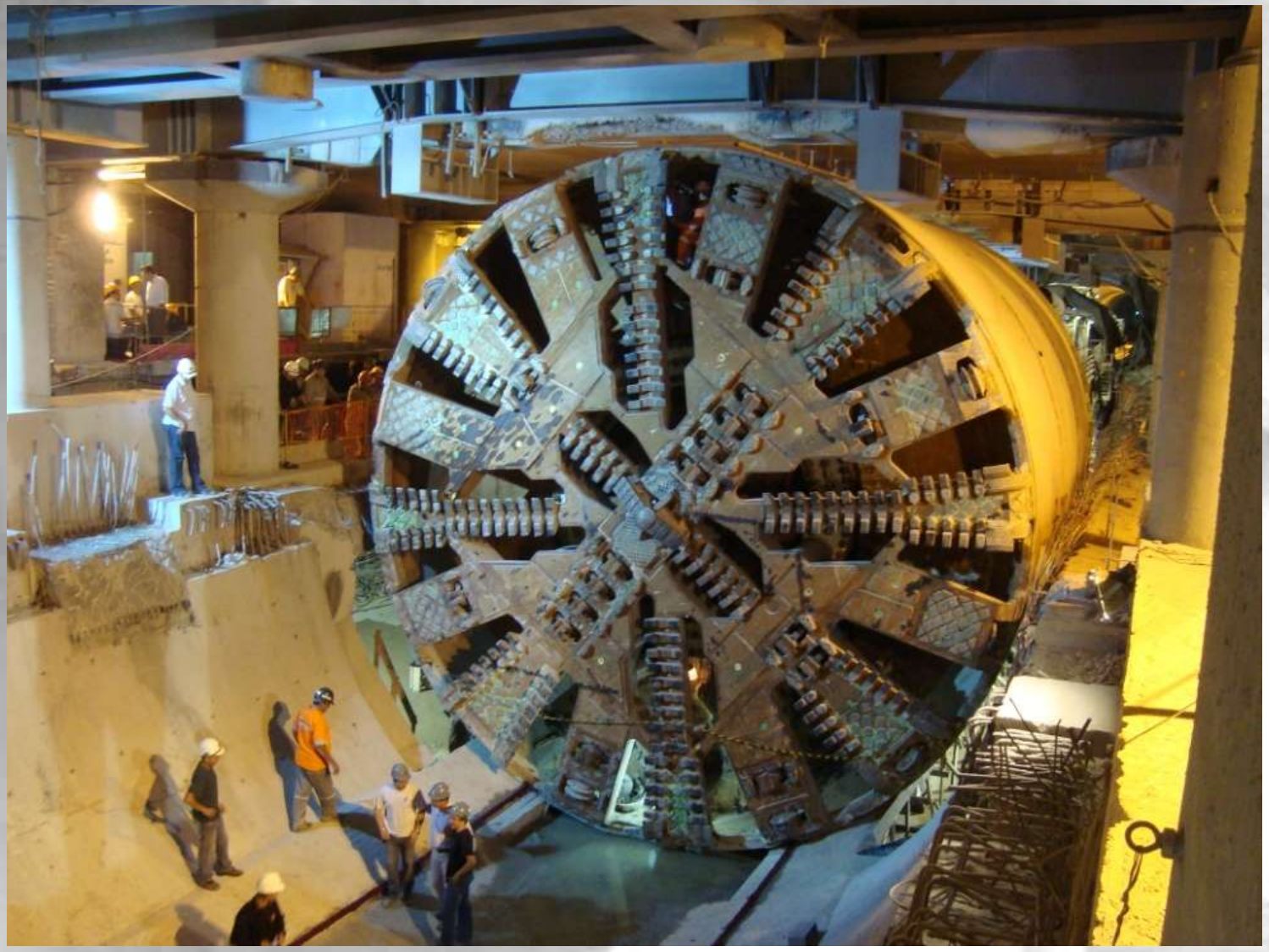


Abóbada invertida

Construção da abóbada invertida

PASSAGEM DO TBM

Passagem do TBM pelo Bloco 5

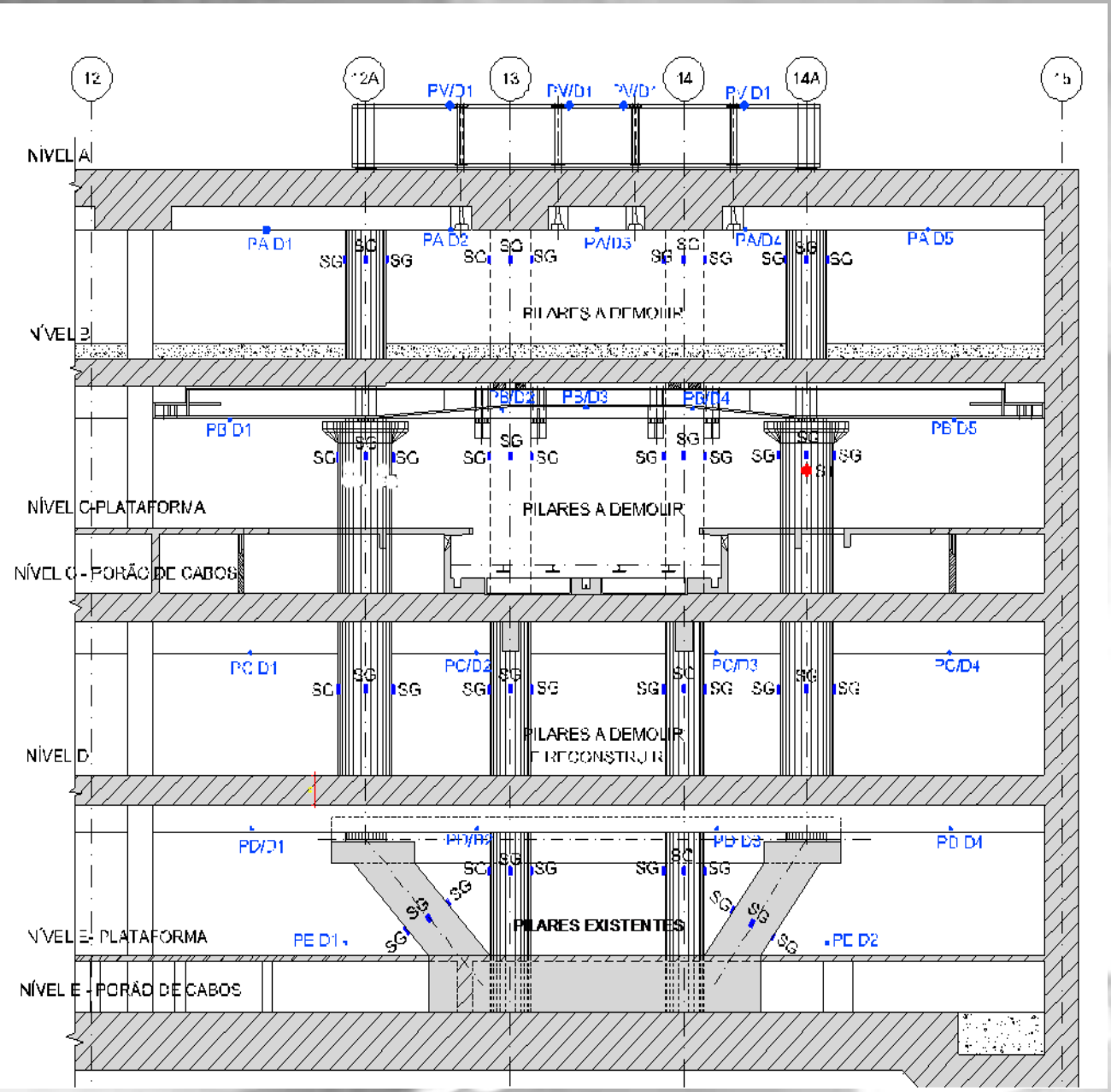


Passagem do TBM pelo Acesso Ipiranga

Foi aberto um túnel NATM com 40 metros, a partir da saída da estação, de onde o TBM continuou escavando em direção à Estação Luz.

Saída doTBM da Estação República

INSTRUMENTAÇÃO



SG "STRAIN GAUGE" A SER INSTALADO, P/ MEDIR ALÍVIO E ACRÉSCIMO DE CARGA NOS PILARES

P PINO DE RECALQUE / CONVERGÊNCIA

CC CÉLULA DE CARGA

ST SENSOR DE TEMPERATURA

Instrumentação:
LPC LATINA (Brasil)

Equipamentos:
GEOKON, Inc. (New Hampshire – USA)

Software:
Vista Data Vision database - Vista Engineering (Islândia)

PARTICULARIDAES DO CÁLCULO ESTRUTURAL

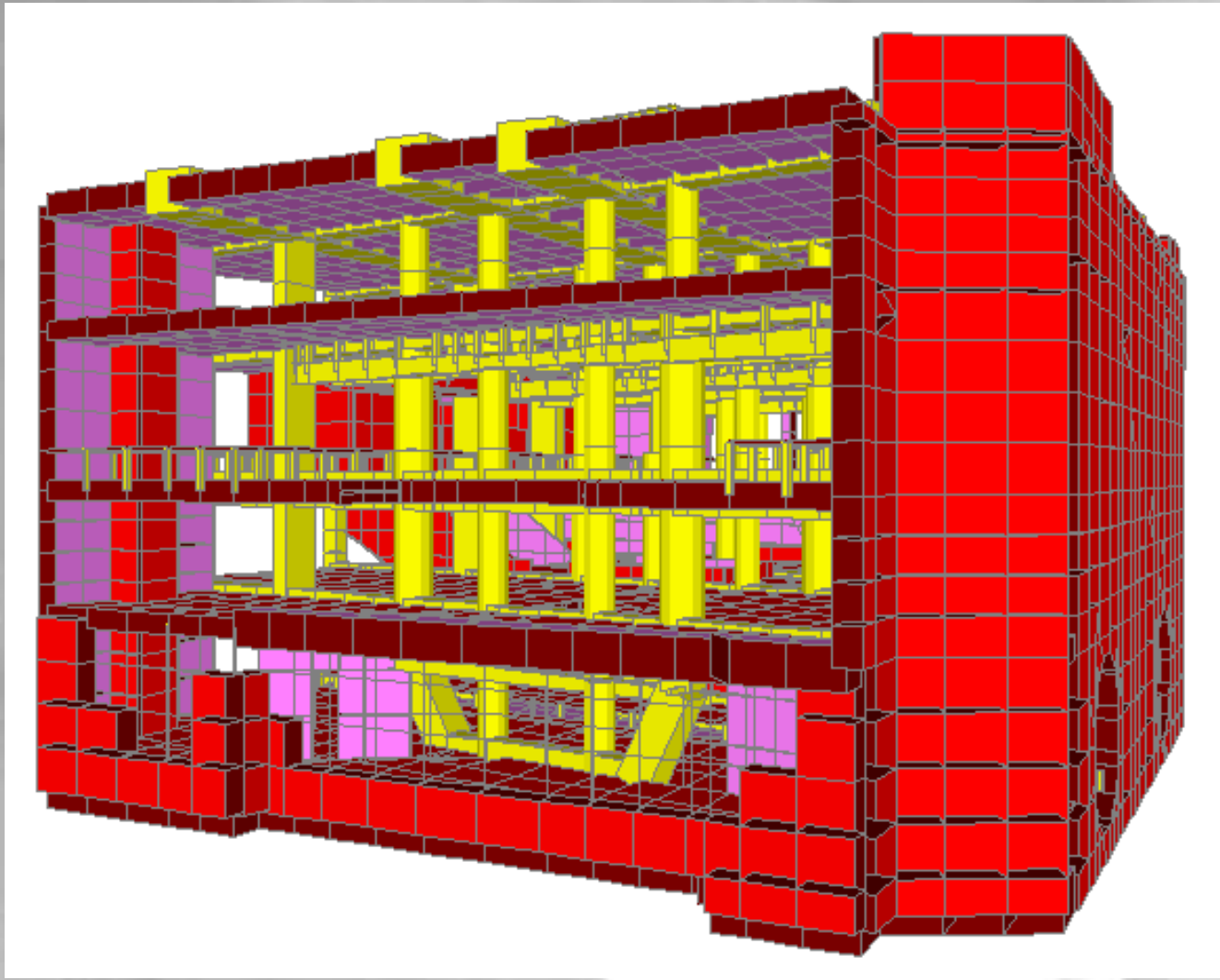
Metodologia

Existindo juntas de dilatação entre o Bloco 5 e as estruturas adjacentes (Bloco 4, parte nova da estação e Acesso Ipiranga), o cálculo foi feito de forma independente para cada uma das estruturas onde foram introduzidas as modificações e as transferências de cargas.

Os modelos eletrônicos e os processamentos foram desenvolvidos através do programa SAP2000, da empresa Computers and Structures Inc. Foi utilizado o procedimento denominado “Staged Construction”, através do qual os resultados do processamento vão sendo automaticamente acumulados, à medida que ocorrem as modificações na estrutura.

Os modelos foram criados com elementos finitos de placas e lâminas (“shells”) e de barras (“frames”). Para utilização do procedimento indicado, todos os elementos estruturais têm que ser, desde o início, introduzidos no modelo, isto é, aqueles que serão demolidos, os que serão acrescentados e os que permanecerão inalterados. As condições estabelecidas para o processamento (“Analysis cases”) é que definem os elementos e carregamentos que serão considerados em cada estágio.

BLOCO 5



Modelo eletrônico do Bloco 5, com todos os elementos estruturais
(A parede existente entre os níveis E e C foi retirada para visualização do interior)

O apoio no terreno de fundação foi simulado através de molas representativas dos coeficientes de reação.

As modificações do Bloco 5 compreenderam nove estágios, considerando-se a estrutura existente como o Estágio 1. A partir dela, com acréscimos e demolições de elementos estruturais e aplicação de cargas distribuídas e concentradas, existiram:

Estágio 2 Demolições localizadas (executadas sem repercussão no restante da estrutura), seguidas da introdução das novas estruturas, constituídas por novos pilares, pórticos de sustentação dos novos pilares no nível E (inclusive protensão dos cabos dos respectivos tirantes) e montagem das vigas metálicas nos níveis A e B. Nesse estágio, as alterações nos carregamentos corresponderam apenas ao peso das estruturas acrescentadas.

Estágio 3 Transferência parcial de cargas para os novos pilares, por meio de protensão dos 8 cabos verticais ligados às vigas metálicas no nível A e à estrutura de concreto. Os cabos foram protendidos aos pares, conforme detalhado adiante. Note-se que se trata de carregamentos externamente nulos, isto é, cada força aplicada na viga metálica pela protensão foi anulada por outra igual e de sentido contrário, aplicada na laje, junto ao pilar a ser demolido.

Estágio 4 Corte e demolição do lance entre B e A dos pilares a serem eliminados. Provocou-se inicialmente um enfraquecimento da seção desses pilares, incluindo o corte das armaduras, o que ocasionou pequenos recalques (da ordem de milímetro), terminando por eliminar a carga sobre eles.

Estágio 5 Continuação da transferência de cargas para as estruturas novas por meio de macacos e calços localizados no nível B (teto do nível C), constituindo, outra vez, um carregamento externamente nulo.

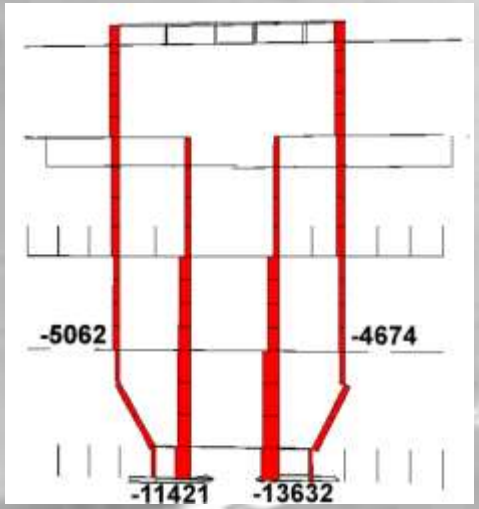
Estágio 6 Corte dos pilares a serem eliminados, entre os níveis D e B, e demolição parcial da estrutura do nível C (para passagem do Shield). Foi preenchido com graute o espaço entre as vigas metálicas e as lajes, antes do corte dos pilares.

Estágio 7 Reconstrução das estruturas do nível C no trecho demolido, após a passagem do Shield.

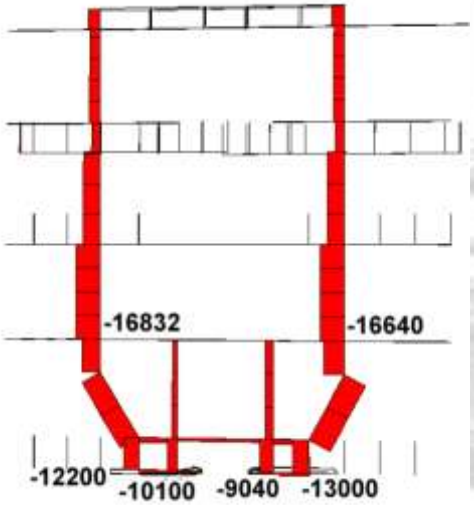
Estágio 8 Acréscimo das sobrecargas permanentes e variáveis, bem como das cargas móveis do trem-tipo da Linha 4 e da Linha 3.

Estágio 9 Consideração da presença de água em seu nível máximo, aumentando o empuxo horizontal, com a interrupção do rebaixamento do lençol freático na região do Acesso Ipiranga.

Feito o processamento, todos os esforços e deformações ficaram conhecidos, tanto os da fase de construção como os finais. A figura a seguir mostra, como exemplo, os esforços normais em pilares do Eixo C, nos estágios 4 e 9.

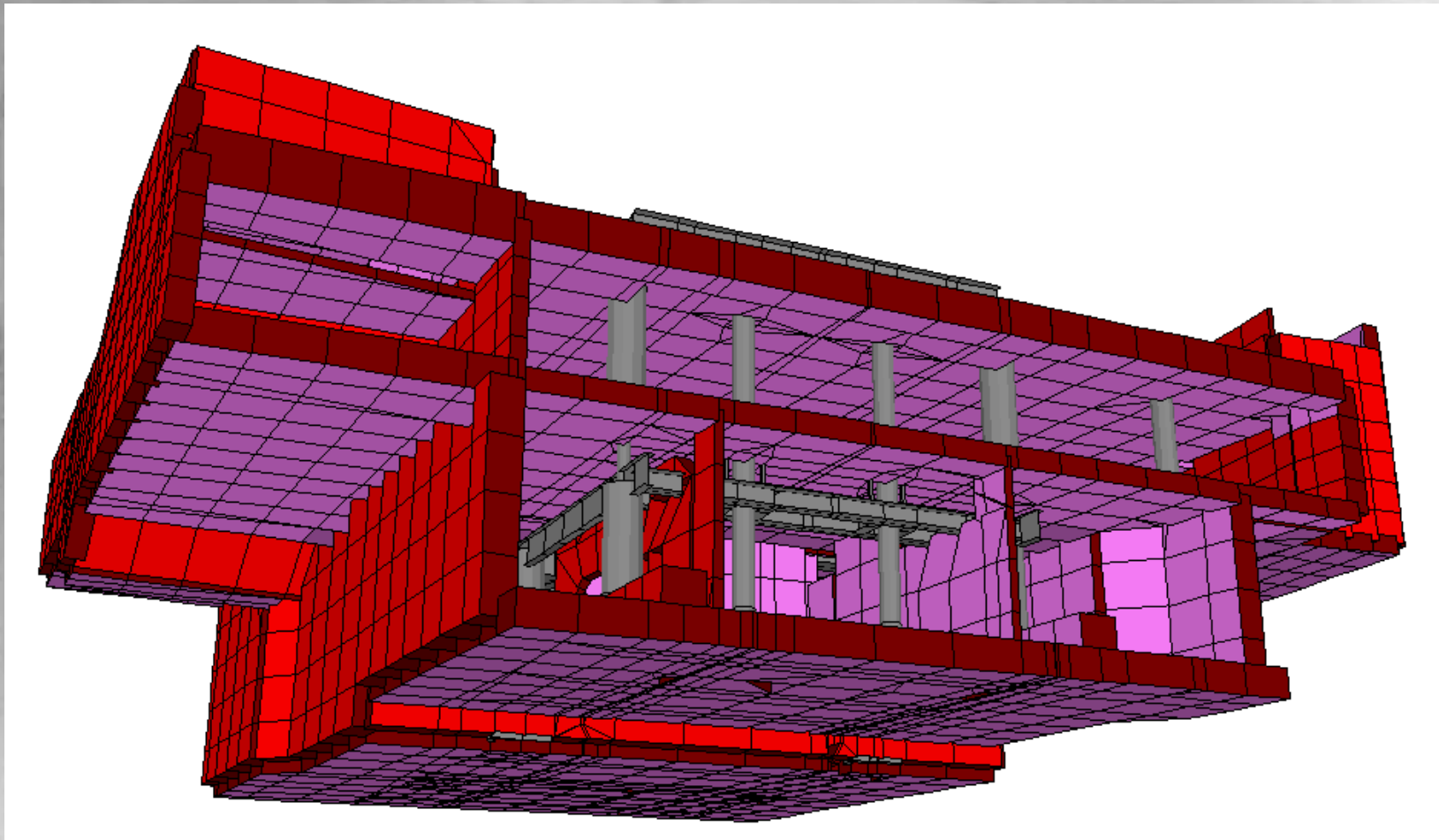


Estágio 4



Estágio 9

Acesso Ipiranga – Modelo para cálculo da transferência de cargas

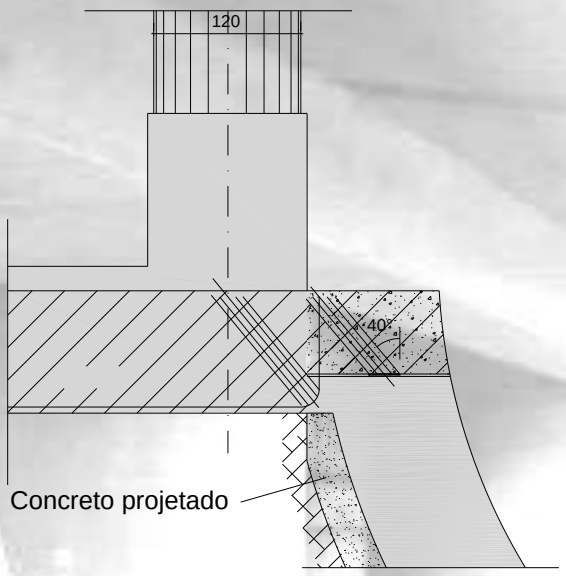


O procedimento de cálculo foi semelhante ao utilizado para o Bloco 5, resultando 6 estágios até a transferência de cargas e demolição das estruturas no caminho do TBM.
A interrupção do rebaixamento do lençol somente ocorreu após a construção da abóbada, passagem do TBM, preenchimento da abóbada e construção da plataforma do nível C.

ABÓBADA INVERTIDA

A abóbada foi calculada com elementos finitos de casca, através do programa SAP2000.

Para não introduzir esforços desnecessários no restante da estrutura do Acesso Ipiranga na passagem do Shield, ela foi construída desligada, na direção vertical, das partes remanescentes da laje do nível C e apenas apoiada no solo. Por outro lado, prevendo-se a possibilidade de que as cargas sobre os novos pilares não se transferissem totalmente para níveis mais profundos, através das colunas de JG g, foram deixados dentes Gerber capazes de se apoiar sobre a abóbada, com armadura de espera nos espaços entre eles, para futura ligação com a laje.



Dentes sem ligação vertical a tração

Assim, os carregamentos considerados no cálculo foram:

Cargas permanentes.

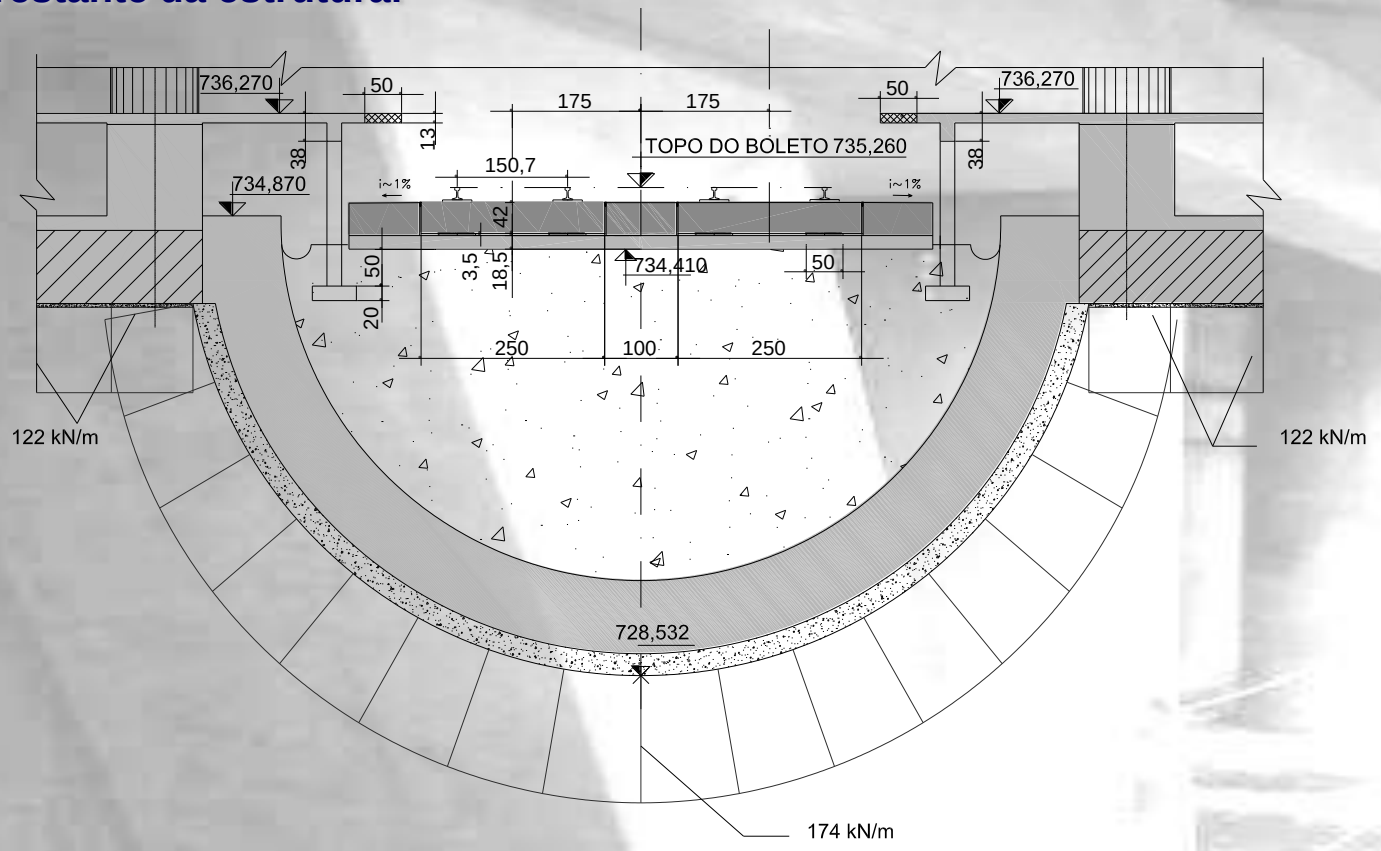
Esforços horizontais nas bordas, devidos a empuxos de terra que antes estavam contraventados pela laje.

Cargas verticais devidas ao Shield, nas posições mais desfavoráveis.

Carga vertical eventual, proveniente dos pilares novos.

A passagem do TBM foi instrumentada, mostrando recalque máximo de 8mm.

Após a passagem do TBM, a abóbada foi ligada à laje, preenchida com concreto simples e sobre ela foi construída a via permanente. Ao ser interrompido o rebaixamento do lençol freático, a abóbada seria levantada (apesar do peso total), se não estivesse já ligada ao restante da estrutura.

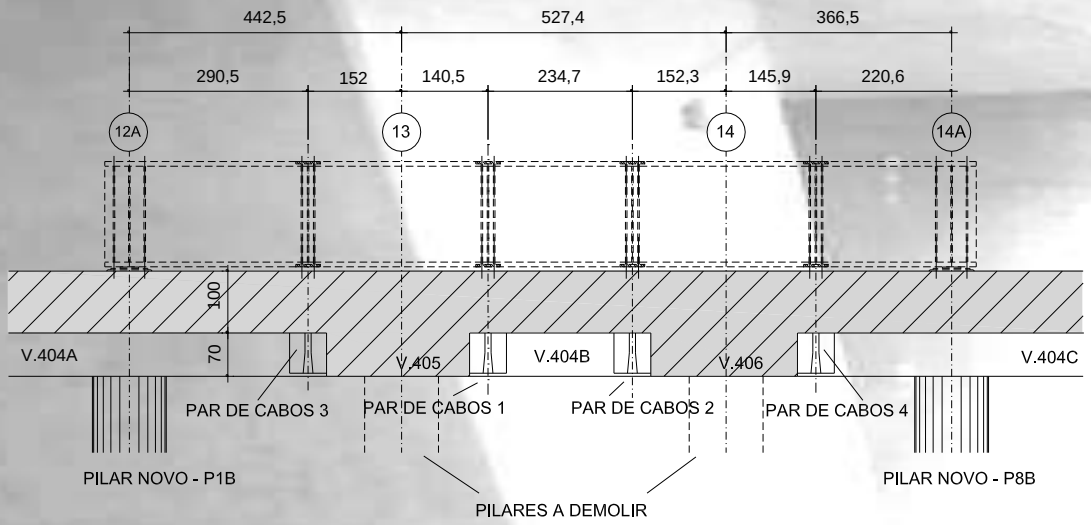


Subpressão na abóbada

Resultante das cargas permanentes:	**+1.554 kN/m**
Resultante vertical da subpressão:	**-2.090 kN/m**

PROTENSÃO DO NÍVEL A – BLOCO 5 E ACESSO IPIRANGA

Assunto: protensões na cobertura, para transferência de cargas através das vigas de aço, foram feitas nos eixos A, B, C e D do Bloco 5 e no eixo I do Acesso Ipiranga. Em cada eixo foram protendidos 4 pares de cabos. A força resultante (diferente em cada eixo) tinha que ser igual à necessária para descarregar os pilares a demolir do respectivo eixo, conforme valores obtidos no processamento dos modelos eletrônicos. Os cabos foram protendidos sempre aos pares, de forma a não provocar torção na viga metálica.



Esquema dos pares de cabos - Eixo D como exemplo

A flexibilidade das vigas de aço trouxe vantagens no controle das forças e deslocamentos, durante a transferência de cargas, ao mesmo tempo minimizando o percentual de perdas por recuperação elástica. Em contrapartida, exigiu um procedimento especial na protensão dos cabos, no nível A. Como acontece quando vários cabos do mesmo elemento estrutural são protendidos em seqüência, cada cabo provoca perdas nos cabos protendidos anteriormente. Essas perdas, denominadas perdas imediatas por deformação elástica, normalmente são pequenas e calculadas através de fórmula aproximada, prevista na norma NBR 6118. No presente caso, porém, devido à grande flexibilidade das vigas metálicas, os deslocamentos que se somavam aos alongamentos dos cabos eram muito grandes, não sendo aplicável a fórmula simplificada. Foi necessário desenvolver um programa específico.

FIM