

Artigo

As causas do acidente da Estação Pinheiros da Linha 4 do Metrô de São Paulo



Edição 138 - Setembro/2008

I - Introdução

Imediatamente após o acidente, ocorrido em 12/01/2007, na Estação Pinheiros da Linha 4 do Metrô de São Paulo, o CVA (Consórcio Via Amarela) concentrou seus esforços e recursos no restabelecimento da segurança da área escombrada, nas atividades conjuntas de busca das vítimas fatais, e no atendimento imediato às demais vítimas. Na sequência entendeu como imperativo determinar causas do acidente. O presente corpo de consultores foi agregado ao grupo de trabalho interno do CVA dada a sua reconhecida experiência nos temas atinentes à obra.

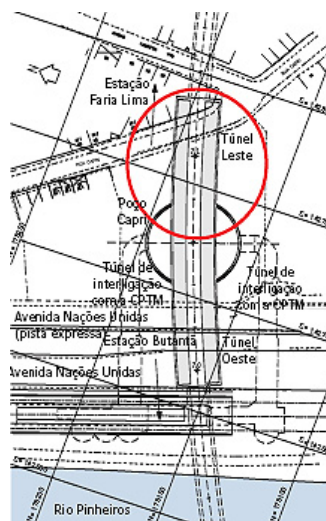


Figura 1 - Indicação da estação e do trecho afetado (interior do círculo)

II - Síntese do evento

A Estação Pinheiros da Linha 4 do Metrô de São Paulo era basicamente composta por dois túneis (figuras 1 e 2), túnel leste (Lado Faria Lima) e túnel oeste (Lado Butantã), separados pelo poço de acesso Capri.

Nos primeiros dias de 2007 os trabalhos haviam transcorrido normalmente nas obras. Na sexta-feira 12/01 as equipes trabalhavam na implantação de tratamento adicional em chumbadores no rebaixo dos túneis, definidos no dia anterior (figura 3), atendendo rotineiramente às imposições implícitas às medidas de instrumentação até aquela data.

No túnel do lado Butantã, as equipes estavam escavando o rebaixo, em avanços de aproximadamente 2,0 m, com detonações conforme prescrito nos planos de fogo, também em sua rotina.

As perfurações foram concebidas para serem instaladas em três níveis (figura 3): a 1,0 m de altura do piso de trabalho, a 2,75 m e a 3,75 m. A primeira linha não necessitava de equipamento de elevação para atingir sua altura de instalação, tendo sido concluída durante a noite. Para a execução das linhas seguintes preparou-se uma detonação menor no centro do túnel, para execução de uma rampa de acesso para colocar o equipamento de elevação.



Figura 2 - Vista aérea antes do colapso

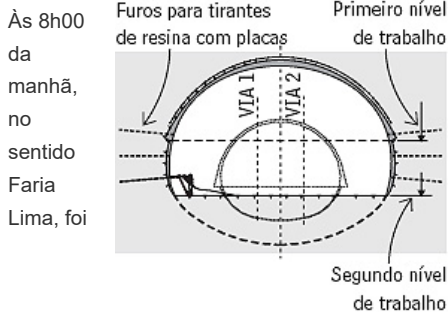


Figura 3 - Chumbadores nos rebaxos do túnel

executado o fogo menor necessário para a execução da rampa de acesso ao equipamento de elevação, e às 8h22 foi detonado um fogo no rebaxo do túnel lado Butantã, ou seja, do outro lado do Poço, a mais de 50 m de distância, fora da região acidentada.

Pelo fato do túnel estar completamente limpo (figura 5), sem disponibilidade de material resultante de desmontes anteriores, a formação da rampa de acesso permitira a obtenção do material para a transição em plano inclinado (figura 4a).

Ainda no período da manhã foi feita uma leitura pelas equipes de instrumentação dos túneis. Esses dados, após processamento, não puderam ser interpretados e utilizados no processo decisório, na medida em que o túnel colapsou antes de sua distribuição para os técnicos e engenheiros da obra.

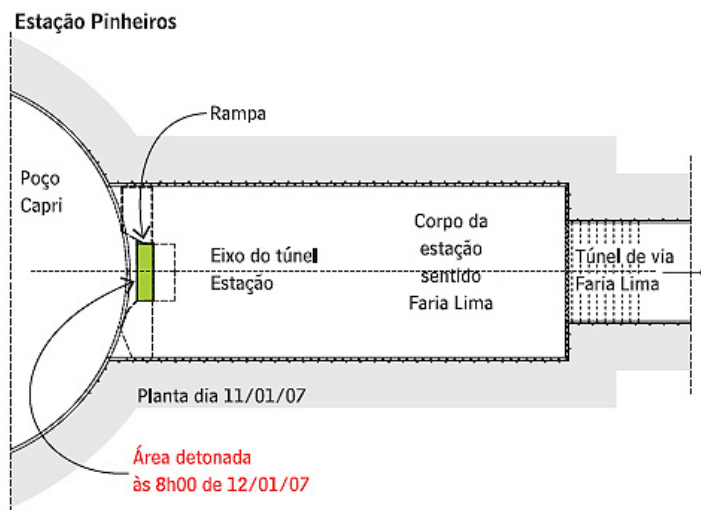


Figura 4 - Local do fogo da rampa

Seqüência do colapso

Por volta das 14h05, a equipe de instrumentação volta ao túnel, para uma nova campanha de leituras e "lá permaneceu por cerca de 20 minutos, aguardando a liberação do local. Durante esse período nada de anormal notou ou visualizou", conforme declaração de um depoente.

As 14h25, iniciou-se a leitura da primeira seção, levando cerca de 15 minutos para encerrá-la. Quando se preparava para iniciar a segunda seção de leitura, percebeu que no topo dianteiro do túnel haviam surgido trincas e fissuras e, em seguida, pediu que o seu operador de nível deixasse o local, pois estava perigoso.

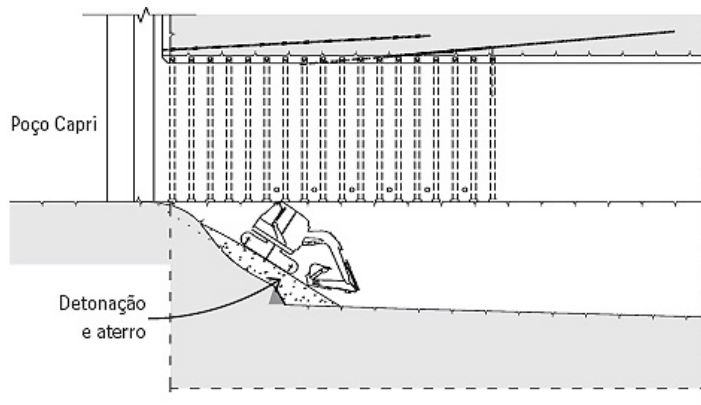


Figura 4a - Estação Pinheiros Corpo da estação sentido Faria Lima. Rampa para descida de equipamento

Deixou o local pela escada, subindo os 35 m em dois a três minutos. Já na superfície, ao nível da rua, ouviu o primeiro estalo e saiu em desabalada carreira pela lateral do canteiro, como informou o depoente, e em seguida viu tudo desmoronar. Afirma que do momento em que gritou para o colega e o desmoronamento deva ter transcorrido cerca de cinco minutos.

Às 14h30, também esteve presente ao local do acidente a Fiscalização da CMSP, que "constatou que estavam sendo realizados os trabalhos de reforço das paredes do túnel, não anotando nenhum aspecto anormal, apesar da ausência de tirantes na obra para efetiva realização dessas intervenções".

Interpreta-se que vários sinais apareceram no túnel, praticamente ao mesmo tempo, como citados pelos diversos depoentes, sem que houvesse ocorrido qualquer sinal prévio. A queda de pequenos pedaços de concreto de revestimento, seguidos de estalos e surgimento de trincas no teto do túnel no lado Abril, caracterizou o início da instabilidade do túnel, sem qualquer evidência de um colapso generalizado.



Figura 5 - Imagem capturada do vídeo encaminhado pelo Metrô ao IPT. A filmagem foi feita pela equipe de fiscalização do Metrô no dia 11/01/2007, no túnel da Estação Pinheiros, portanto, na véspera do acidente. A seta indica equipe realizando medidas de instrumentação interna no túnel (1- túnel de via sentido Faria Lima; 2- calota com as marcas das cambotas, e 3- parede do 1º rebaixo). Notar que

Outra evidência importante é declarada por testemunhos presentes no interior do túnel, que relata que viu no meio do túnel, "um espaço de seis a oito cambotas caídas no chão e em seu lugar ficou na pedra", e segue em seu depoimento dizendo que "não era um espaço grande, era um espaço pequeno. Por isso eu achei que não ia nem cair o túnel".

Essas declarações caracterizam um deslocamento seguido de caída de blocos localizado do revestimento na zona da parede e do teto junto à parede ao lado do Edifício Abril, denominado de "capela", no meio técnico para o caso de túneis em rocha, e sem reflexo na superfície.



Figura 6 - Registro das câmeras do Edifício Passarelli. Às 14:53:59 - não há sinais de perigo eminente (câmera 1 do Passarelli). Às 14:54:00 - movimento brusco do transeunte mostra o momento da tragédia

A permanência do encarregado na frente de serviço, juntamente com outros técnicos, dava aos mesmos a autoconfiança de que não estavam diante de um colapso generalizado e sim de uma instabilidade localizada, e na expectativa de que se tratava de um deslocamento, permaneceram no local ainda por alguns minutos. Logo perceberam o surgimento de outras trincas também no

revestimento do poço, e um minuto depois o túnel e o poço desmoronaram, dando tempo somente para os técnicos e o encarregado correrem pelo túnel para o lado Butantã.

PÁGINAS :: 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Próxima >>

Simultaneamente várias trincas apareceram na superfície, sendo a rua Capri o epicentro do colapso, sem que houvesse tempo de seu fechamento. O pessoal que trabalhava na frente Ferreira de Araujo sentiu o impacto do sopro de ar (air blast) provocado pelo desabamento, sintoma de um desmoronamento extremamente brusco.



Figura 7 - Cicatriz de ruptura do lado da rua Capri

Interpreta-se, à luz dos dados compilados que, desde o primeiro sinal de instabilidade do deslocamento, passaram-se apenas cinco minutos até o colapso completo do túnel. Durante esse período, primeiro ocorreu o surgimento de trincas, dois a três minutos depois surgiu o deslocamento, e um a dois minutos depois o desmoronamento completo do túnel e do poço.

Através das câmeras de segurança do Edifício Passarelli são observados movimentos antes, durante e depois do acidente (figura 6).

O desmoronamento súbito atingiu o poço de acesso da Estação Pinheiros (com colapso parcial do mesmo), o alinhamento da Rua Capri, e a lateral oposta à Rua Capri, onde se localizava um estacionamento. Durante o desmoronamento foi constatada uma tubulação rompida, com fluxo de água e esgoto, e com diâmetro estrangulado de 1 m para 70 cm, e que se localizava ao longo do eixo da Rua Capri, exatamente na região da ruptura (figura 7).

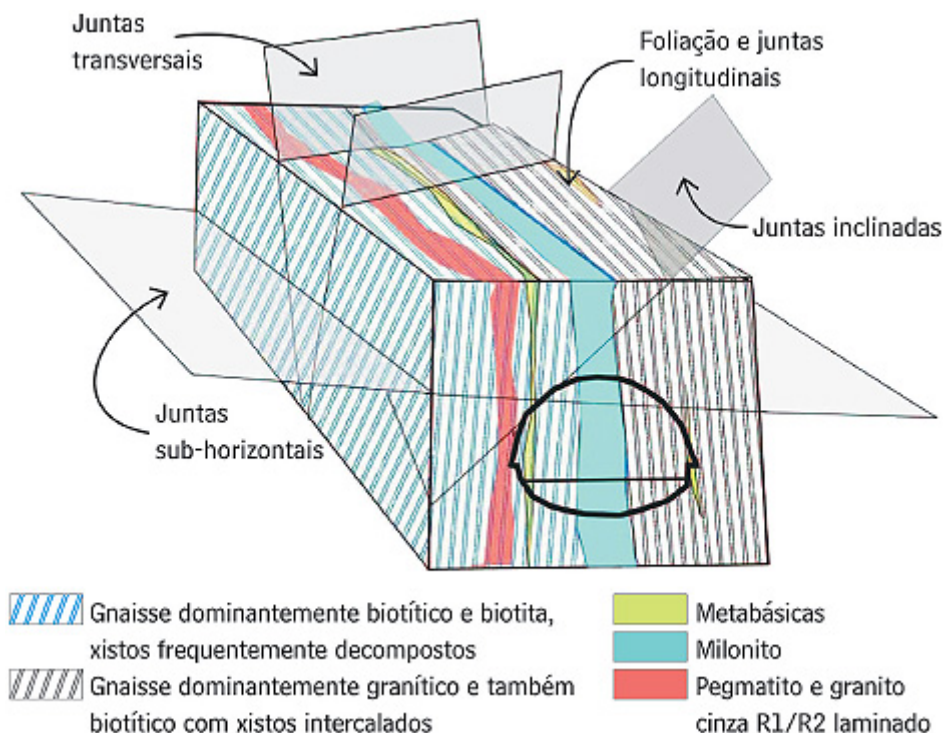


Figura 8 - Modelo geológico das fraturas e foliações identificado após as investigações

III - Causas do acidente

Modelo geológico verificado após as investigações

A junta de consultores identificou os seguintes condicionantes geológicos, relacionados diretamente ao colapso, alguns somente observados durante e após a conclusão das investigações:

> Mergulho oposto das foliações subverticais paralelas ao eixo do túnel, tendentes a isolar um bloco crítico de grandes dimensões (figura 8) diferentemente do projeto básico e do projeto executivo que previam mergulho da foliação condicionante sempre paralelo mergulhando somente para um lado.

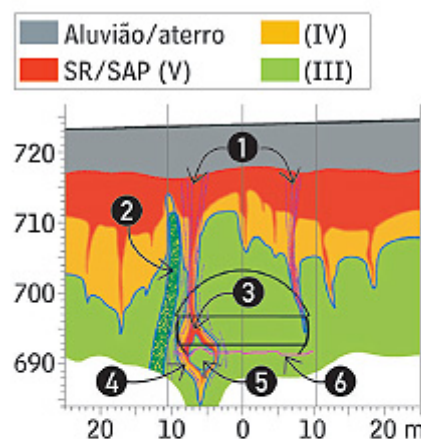
> Corpo tabular mais rígido de pegmatito mergulhando por detrás da parede norte (figuras 8, 9 e 10), cujo contato com o maciço predominante é constituído de extensa camada friável de biotita de espessura decimétrica.

> Presença de alteração argilosa de rochas metabásicas com baixíssima resistência residual e alta expansividade do lado Abril (Norte).

> Concentrações no maciço de juntas transversais ao eixo do túnel, já de conhecimento prévio.

> Bloco central de rocha mais resistente, menos alterada e, portanto, mais densa, já de conhecimento durante as escavações (figura 8).

Seção transversal km 7 + 105



- ① Foliação com lentes de biotita
- ② Pegmatito
- ③ Anfibolito muito alterado (IV)
- ④ Borda biotítica alterada
- ⑤ Anfibolito são
- ⑥ Superfície final de escavação (após limpeza do material colapsado)

Figura 9 - Presença da rocha metabásica e de bloco acima da abóbada do túnel

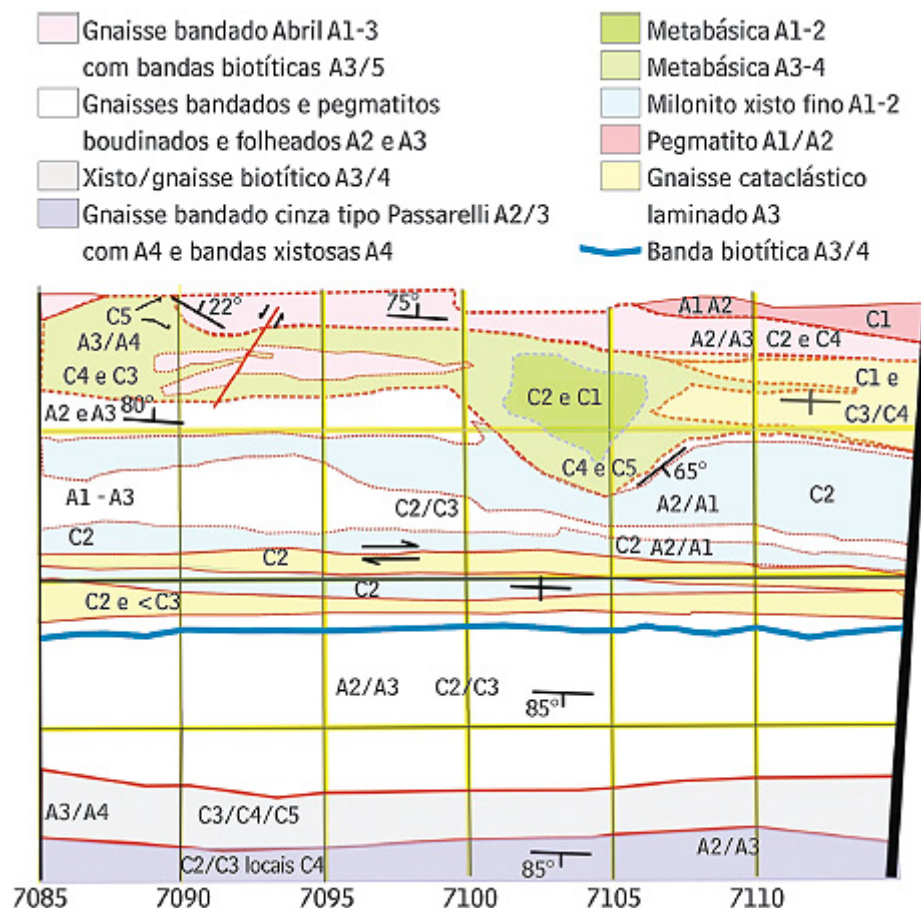


Figura 10 - Geologia da estação Pinheiros

Embora o modelo geológico à época do projeto considerasse a existência de lentes menos resistentes, as mesmas eram descritas como localizadas e não contínuas e relativamente delgadas sendo de praticamente impossível localização espacial prévia por meio de sondagens.

O corpo de pegmatito se encontrava ao lado do túnel, inclinado rumo ao Edifício Abril (Norte). Apareceu durante as escavações da perícia em cotas mais elevadas mergulhando por trás da parede conforme descia para cotas mais baixas, e, portanto, não pudera ser claramente visível durante o mapeamento de frente de escavação do túnel. Mostrou-se ainda esconso em relação ao eixo do túnel de tal sorte que se encontrava com afastamento variável em relação à lateral do túnel, conforme se dirigia rumo ao Poço Central da Estação (figura 10).

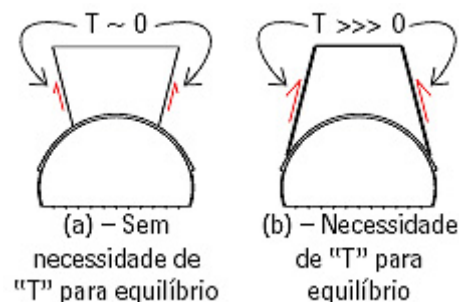


Figura 11 - Comparação entre cunhas de grandes dimensões convergentes e divergentes no teto do túnel

Perda do arqueamento

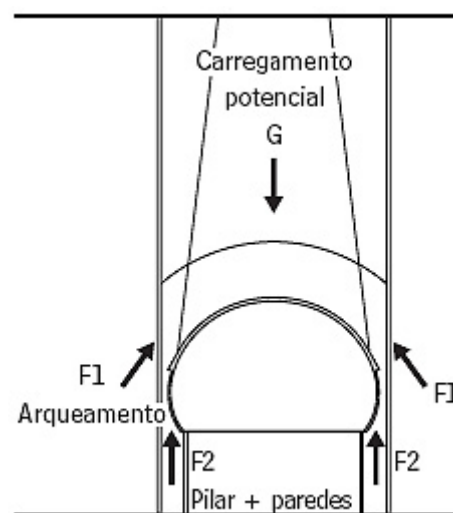
As atitudes divergentes das foliações, em forma de cunha invertida, não favorecem o arqueamento do maciço (figura 11).

No caso da cunha invertida, para permitir o arqueamento é necessário que a resistência ao cisalhamento das descontinuidades limitantes da cunha no maciço fosse muito elevada, o que se mostrou incompatível com os planos de fraqueza longitudinais representados pelas juntas e pelas extensas concentrações de biotita.

Tal situação se agravou pela presença de uma superfície de fraqueza crítica fora da seção de escavação junto ao contato com o pegmatito duro, representada por uma camada decimétrica e praticamente contínua e frágil de biotita-xisto decomposto a argilas e siltes, com baixa resistência ao cisalhamento. O elevado contraste de rigidez entre o pegmatito e a camada rica em biotita e argilas permitiu que o limite de resistência ao cisalhamento fosse atingido para pequenos deslocamentos, tornando esse plano como preferencial de ruptura e restringindo a transmissão de tensões de cisalhamento para a lateral do maciço.

Como consequência de todo o quadro geológico, o necessário arqueamento transversal sobre o túnel não ocorreu (figura 12). O equilíbrio do peso do maciço na direção vertical é garantido pelas forças F_1 e F_2 . A força F_1 é função da característica de resistência do maciço ao longo das discontinuidades verticais, do deslocamento, de K_0 (confinamento inicial dos planos verticais) e da feição do bloco tipo "chapéu chinês" que ao se deslocar reduz a tensão normal na junta subvertical. Parte da força F_2 é responsabilidade do "pilar" de rocha e parte é responsabilidade das paredes, ou seja, do revestimento. Portanto, à maior eficiência do arqueamento (maior F_1) estará associado ao menor carregamento do revestimento e do "pilar" de rocha.

PÁGINAS :: << Anterior | 1 | **2** | 3 | 4 | 5 | Próxima >>



Onde:

F_1 = parcela resistida pelo arqueamento, função da resistência ao cisalhamento da junta vertical mobilizada pelo deslocamento "de bloco rígido", privilegiado pelos planos de fraqueza e comprovado pela instrumentação.

F_2 = soma da capacidade de carga da fundação da parede do rebaixo e do pilar de rocha de espessura "e" confinado pela parede com curvatura de projeto. Deverá ser superior à diferença entre a metade do peso G e a componente vertical de F_1 , para não haver colapso.

Figura 12 - Mecanismo do colapso - esquema básico

Comportamento da instrumentação

O comportamento da instrumentação à luz do ocorrido indicava que ao ser concluída a escavação da calota, o revestimento do túnel apresentava deformações coerentes e compatíveis. Iniciado o rebaixo, a comparação de recalques dos tassômetros com os dos pinos internos ainda indicava a existência de arqueamento.

A escavação do rebaixo do túnel foi retomada no início de janeiro.

Entre os dias 4 e 5/01 o rebaixo do túnel estava sendo executado entre as progressivas km 7,0+93 e km 7,0+88 (aproximadamente entre 15 m e 10 m de distância do Poço Central da Estação), região onde o dique de pegmatito começa a se afastar do revestimento e onde existe maior concentração de alteração de rocha metabásica. Essa maior concentração de material alterado passou a recalcar sob o carregamento transmitido pelas paredes, transferindo tal carregamento para o "pilar" de rocha remanescente entre o pegmatito ladeado com bandas biotíticas e a escavação, de espessura "e" como apresentado na figura 12. Na impossibilidade de transferir o carregamento para as laterais, quando deixa de existir arqueamento (parcela F1 da figura 4 tendendo a zero), toda a reação (F2) passou a ser resistida por esse "pilar"

de rocha, o qual exerce força lateral contra o revestimento apoiado sobre a rocha metabásica alterada, que se desloca para o interior da escavação, provocando as convergências observadas na instrumentação.

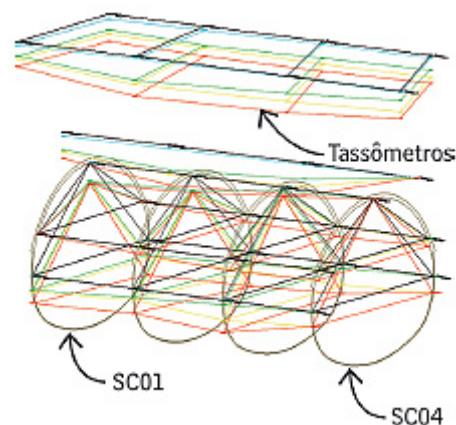


Figura 13 - Ilustração das superfícies de deslocamentos da instrumentação dos pinos internos e dos tassômetros entre o Poço Central (seção SC01) e o túnel de via (seção SC04) em função do tempo

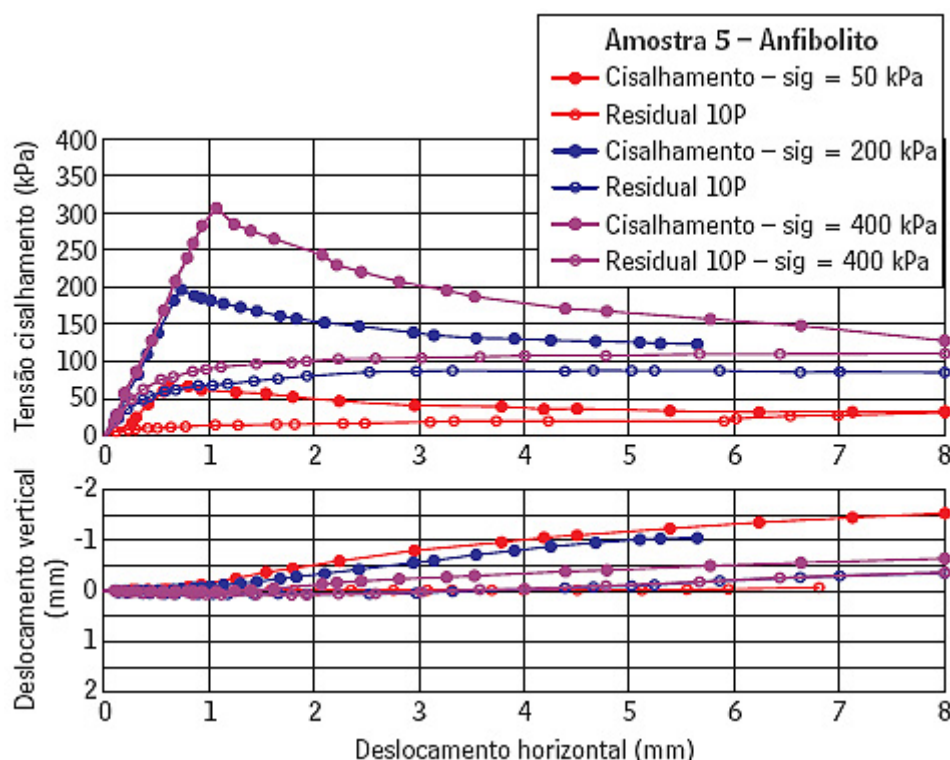


Figura 14 - Ensaios de cisalhamento direto

O revestimento do túnel continua recalando mesmo sem ser carregado, pois a fundação do "pilar" de rocha também recalca e se deforma para o túnel, por efeito da presença da metabásica decomposta. Nessa situação, os pinos de instrumentação das laterais do túnel, independentemente de sua altura, apresentam deslocamentos verticais equivalentes.

Foi possível observar que acréscimo na velocidade dos deslocamentos verticais ocorre no dia 11/01, com exceção da convergência, cuja velocidade aumenta a partir do dia 9/01. Isso porque a casca de concreto projetado (revestimento primário) é rígida no sentido longitudinal e busca apoio nas seções vizinhas, sentido Faria Lima e sentido Poço Central, o que sobrecarrega principalmente as seções mais próximas desse.

Enquanto as leituras dos tassômetros indicavam comportamento de bloco, ou de uma grande viga, como indica a figura 13, o maciço colaborava com o revestimento na redistribuição longitudinal, mas nas proximidades do km 7,0+90 existem concentrações de juntas que isolam o maciço, prejudicando essa sua contribuição.

Até a última leitura disponível antes do acidente, aquela mencionada do dia 11/01, a tendência de deslocamentos permanecia, não indicando situação de aceleração acentuada a ponto de sugerir uma movimentação de grandes proporções. A fatalidade somente se configurou minutos antes do colapso, quando a equipe de instrumentação realizava leituras e interrompeu seus serviços em função do início da ruptura franca.

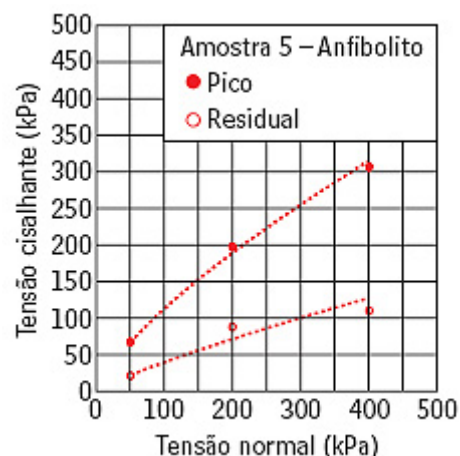


Figura 15 - Tensões de pico

As leituras efetuadas com início na tarde do dia 12/01, que apresentam a mudança abrupta de comportamento da instrumentação, foram processadas e distribuídas apenas depois do acidente, não estando disponíveis para a tomada de decisões prévia à ruptura.

Mecanismo do colapso

Propriedades geomecânicas dos materiais biotíticos e metabásicos

Foram realizados ensaios nas litologias biotíticas e metabásicas na condição de rocha alterada e solo das escavações, nos Laboratórios da Cesp (Companhia Energética de São Paulo), e posteriormente na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, que mostram o seguinte:

- os materiais ensaiados exibem comportamento típico de "strain-softening": perdem muita resistência com o deslocamento ao se ultrapassar as tensões de pico (figuras 14 e 15);
- a resistência ao cisalhamento do maciço esverdeado (anfibolito) sem inundação, exibe coesão de 0,05 MPa e ângulo de atrito de 33°, para os ensaios "in natura". Para o material biotítico as resistências residuais atingem valores de ângulo de atrito de 20° e coesão zero; já para o solo esverdeado (anfibolito), esses valores são da ordem de 18°, para coesão zero;
- as metabásicas apresentaram características expansivas. As amostras, na condição de rocha alterada, se desintegram quando imersas em água, e podem desenvolver grandes pressões de expansão. A influência das características de expansibilidade da metabásica sobre a ruptura está sendo analisada.

Em resumo, o comportamento geomecânico do maciço na região da Estação Pinheiros é heterogêneo, anisotrópico, descontínuo e com características de "strain softening", com resistência residual muito baixa, além das características expansivas da metabásica (anfibolito).

Seqüências cinemáticas do colapso Com a perda de arqueamento, considerando o recalque do revestimento e uma espessura "e" do pilar de rocha entre 1 m e 2 m, o carregamento total devido ao bloco crítico

de grandes dimensões equivale a tensões nesse pilar de rocha de 200 a 400 tf/m², o que corresponde a um empuxo de cerca de 250 tf, como mostrado na figura 16. Observe-se que existe um valor de espessura de pilar de rocha "e" que é crítico, em função das características geométricas e geológicas próprias do maciço e do revestimento.

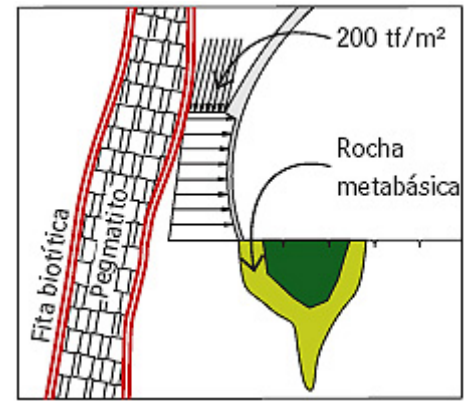


Figura 16 - Empuxo na parede do rebaixo

O pilar de rocha, laminada, sob tensão de 20 kgf/cm², ainda poderia suportar, com recalques, caso o confinamento oferecido pela parede do revestimento fosse suficiente. Tal confinamento fica impossibilitado em vista dos recalques de sua fundação no lado Abril, de modo que o equilíbrio local não conta com força normal para equilíbrio. Desse modo, a parede deveria resistir por flexão, o que é incompatível com sua concepção. Ocorre, ainda, que na região encontra-se alteração de rocha metabásica, prejudicando o equilíbrio das forças horizontais, fazendo com que o pé-direito deslize na sua fundação.

A superfície de ruptura do pilar de rocha verificada em campo é "serrilhada", como se observa nas figuras 17 e 18, razão pela qual o primeiro movimento observado do revestimento durante a investigação é de translação e rotação em torno do pé da cambota, porque a seção mais crítica, em função da presença da metabásica no piso da escavação, é a seção inferior.



Figura 17 - Aspecto da superfície serrilhada de ruptura. Vista do sentido do poço à direita, parede ao lado da Abril

A partir desse momento não existe mais apoio para a calota, que ocupa o espaço entre a parede e a rocha, de modo que aparecem momentos fletores no revestimento, que irá romper na seção mais crítica em termos de solicitação e resistência.

Interpreta-se, portanto, que a ruptura teve início num deslocamento de parte do revestimento descrito nos depoimentos de testemunhas, entre as progressivas 7,0+90 e 7,1+01, como uma instabilidade local, seguida da generalização global e repentina em todo o túnel, desde a parede remanescente até o Poço Capri.

Tal movimento, na seção que iniciou a ruptura do túnel, é apresentado esquematicamente nas figuras 18 e 19, que pode ser descrito da seguinte maneira:

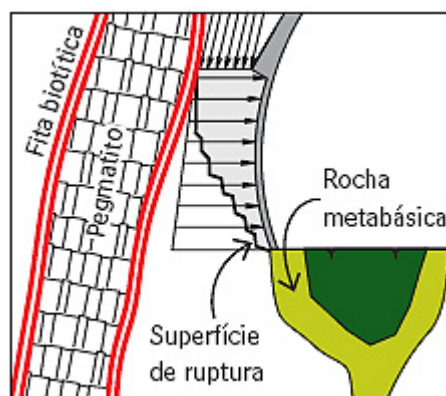


Figura 18 - Mecanismo esquemático da ruptura em rocha "laminada"

1 - parede translada e gira em função da falta de resistência do contato parede-rocha;

2 - contato parede-calota do revestimento rompe por flexão;

3 - parte da calota ocupa o espaço deixado pela parede deslocada, rompendo por flexão.

Esse é o instantâneo do deslocamento observado que foi interpretado como "capela", ou seja, instabilidade local em uma extensão da ordem de oito cambotas, de acordo com depoimentos. PÁGINAS :: <<

Anterior | 1 | 2 | **3** | 4 | 5 | Próxima >>

As regiões de concentração de juntas transversais em toda a extensão do maciço dificultaram a redistribuição longitudinal do maciço, de modo que apenas o revestimento ficou encarregado dessa redistribuição e a estrutura, não projetada para essa função, foi sobrecarregada e rompeu como um todo. Deu-se, então, em curtíssimo espaço de tempo a ruptura brusca do maciço como um todo, gerando um deslocamento de ar tamanho que chegou a derrubar trabalhadores no túnel de via sentido Faria Lima.

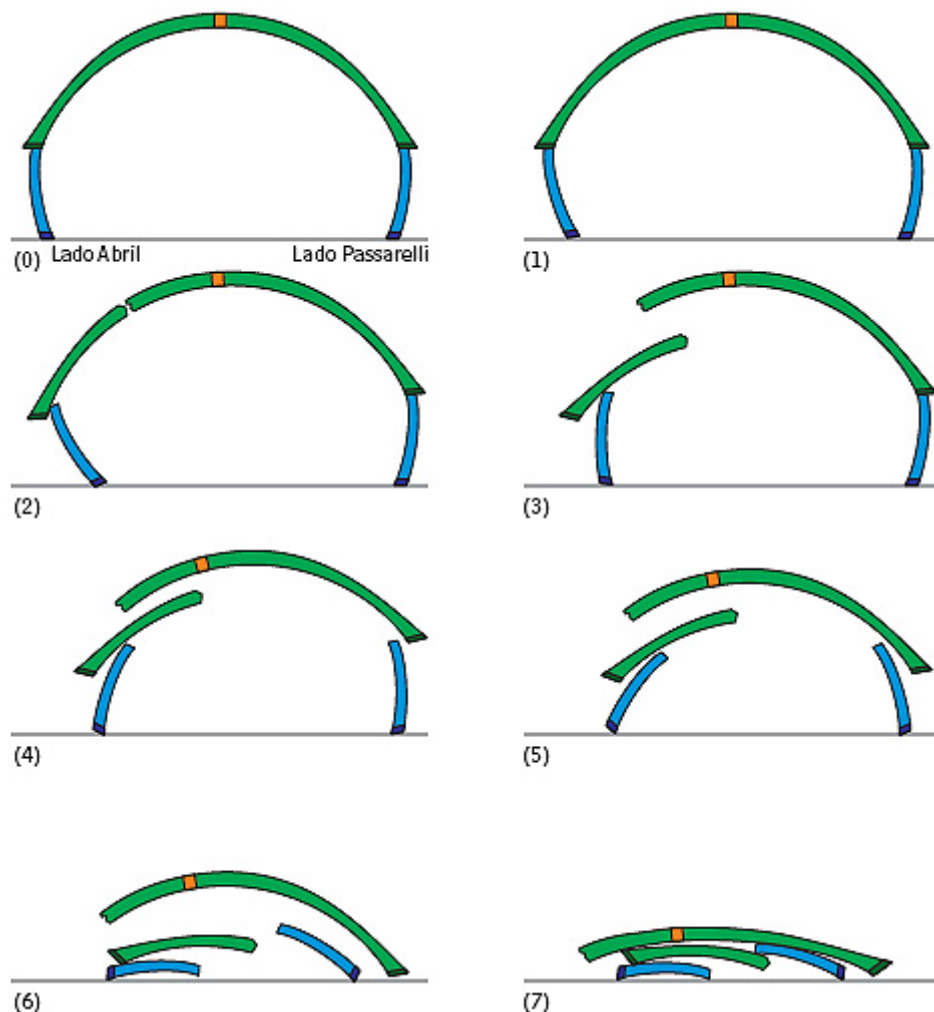


Figura 19 - Cinemática de ruptura esquemática da seção 5 (~ km 7,0+90 a ~ km 7,1+01)

IV - Aspectos relacionados ao projeto executivo

Projeto original

O projeto utilizou o conceito do método NATM, universalmente utilizado para a execução de túneis. Nesse método, está implícito o princípio de que o confinamento oferecido pelo concreto projetado deve permitir que o maciço trabalhe como parte da estrutura (arqueamento), redistribuindo as tensões verticais decorrentes do peso do maciço sobre o túnel para as laterais da escavação.

Assim, o estado da prática do cálculo de túneis admite que o suporte ou revestimento primário seja calculado para as tensões resultantes considerando a contribuição do arqueamento transversal, sem a necessidade de equilibrar o carregamento potencial, o qual, no caso, corresponderia a todo o peso do maciço de cobertura e às sobrecargas à superfície.

Para comprovação do projeto executivo elaborado para a Estação Pinheiros antes do acidente, foram realizadas novas simulações numéricas, mantendo-se as hipóteses de cálculo e parâmetros adotadas à época, que

reafirmaram a validade dos cálculos prévios do projeto executivo elaborado e eliminaram as questões sobre a adequação dos modelos e métodos de cálculo empregados.

Foram ainda realizados cálculos com modelos em meio descontínuo, que concluíram que a escavação da calota e bancada da Estação Pinheiros, caso o modelo geológico anterior ao colapso mantivesse as hipóteses originais válidas, seria estável.

Verificação de cálculo das condições reais de campo (posicionamento da grua e geometria do rebaixo)

Cálculos que consideraram o efeito do posicionamento da grua e da sobreescavação do piso do rebaixo concluíram que tais condições são pouco significativas para o equilíbrio do túnel.

A verificação da variação da estabilidade da escavação em função do sentido de avanço do primeiro rebaixo não foi realizada, pois, pelos modelos geológicos existentes (tanto anterior quanto posterior ao colapso), a estabilidade depende, basicamente, do equilíbrio transversal da seção de escavação, o que reduz sobremaneira a validade de modelos tridimensionais, o sentido de avanço não sendo considerado significativo.

Verificação de cálculo considerando o novo modelo geológico

Simulações com base no modelo geológico elaborado após o mapeamento pericial após o colapso, considerando blocos críticos isolados pelo mergulho oposto das foliações subverticais paralelas ao eixo do túnel limitado transversalmente pelas juntas contínuas transversais, e em presença de alteração argilosa de rochas metabásicas mais as bandas biotíticas nos contatos indicaram que o revestimento não é estável para sistemas de suporte convencionalmente dimensionados de acordo com as hipóteses comuns ao NATM.



Figura 20 - Algumas imagens da seção 5 (~ km 7,0+90 a ~ km 7,1+01)

V - Aspectos relacionados à execução

Escavação do rebaixo

Com a conclusão da retirada do material escombrado, verificou-se pelo mapeamento do fundo da escavação que a cota média de piso era da ordem de 1,20 m abaixo da cota de escavação de projeto. Para o caso particular em questão pode-se cogitar sobre a influência do maciço alterado de metabásica e biotita no fundo do rebaixo em que a ruptura, violenta, teria removido e relaxado significativamente grande parte do maciço, atingindo cotas abaixo do piso e que a utilização de equipamento para remoção do material pode ter removido boa parte do maciço entulhado e relaxado no piso da escavação.

Embora a escavação tenha atingido cotas inferiores, o concreto projetado executado nas paredes escavadas do rebaixo acompanhava sua superfície até ao piso escavado, conferindo confinamento à face rochosa exposta

sendo insignificantes as diferenças de solicitações com 4 m ou 5,2 m de altura de primeiro rebaixo, conforme constatado em simulações numéricas elaboradas.

A seqüência de avanço adotada pela obra foi proporcionada pelo plano de fogo, recomendada por consultores especialistas à época, e manteve a detonação do rebaixo em três etapas, flexibilizando a seqüência de execução das detonações, mantendo sempre duas ou três frentes livres, usando furos de menor diâmetro e fogo cuidadoso no contorno. Assim, foi possível garantir as cargas por espera a no máximo 2,2 kg e que as velocidades de vibração fossem as mínimas possíveis, inclusive com frentes livres para escape dos gases da detonação.

Detonações do dia do acidente e última detonação

As detonações da Estação Pinheiros foram balizadas de acordo com a normatização técnica vigente da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e aquelas das especificações técnicas do projeto do Metrô e com efeitos registrados nos boletins de sismografia. Fatores como vibração produzida pela detonação ou penetração de gases sob pressão gerados nas detonações dos explosivos jamais poderiam ser apontados como fatores da causa do acidente.

A tênue detonação do segmento necessário para a rampa de acesso no dia do acidente não só suavizou a geometria da bancada central como produziu o material necessário para configuração adequada da rampa de descida do equipamento.

A segunda detonação da Estação Pinheiros ocorrida no dia do acidente foi executada no rebaixo do lado do túnel Butantã, a mais de 50 m de distância do emboque do túnel sentido Faria lima, onde os trabalhos transcorriam normalmente e fora da zona colapsada. Os registros de detonação comprovam sua localização e intensidades, ratificadas também pelas testemunhas presentes no local.

PÁGINAS :: << Anterior | 1 | 2 | 3 | **4** | 5 | Próxima >>

Portanto, somente uma detonação foi dada no Túnel do lado Faria Lima, e não correspondia à detonação de avanço do rebaixo, mas sim para conformação da rampa de entrada do equipamento de elevação para execução dos reforços em curso recomendados.

Essas detonações foram monitoradas pela sismografia e mostram valores de velocidades de vibração muito inferiores aos limites estabelecidos.

A aludida terceira detonação que teria ocorrido na Estação Pinheiros no dia 12 de janeiro nunca ocorreu. Todo o procedimento adotado para as detonações requer envolvimento de entidades públicas, o que não se poderia fazer à revelia e sem qualquer registro.

Perfuração dos tirantes

A proporção da área das perfurações realizadas até o acidente em relação à área total da parede do rebaixo remete a 0,030% na lateral Passarelli e 0,020% na lateral Abril. Se todas as perfurações definidas tivessem sido executadas, ainda assim a proporção seria de 0,12%, relação insignificante para o equilíbrio global do túnel. Além disso, devido ao diâmetro de cada perfuração, a influência de cada uma delas é muito restrita e não teria efeito sobre a perfuração vizinha, que estava muito distante da ordem de metros.

Velocidade de escavação entre dezembro de 2006 e janeiro de 2007

No início de dezembro de 2006 foi iniciado o primeiro rebaixo do túnel da Estação Pinheiros sentido Faria Lima e até o recesso de final de ano, durante 21 dias corridos, foram escavados 13 rebaiços na lateral Passarelli e 12 rebaiços na lateral Abril, cada um com extensão aproximada de 2 m. Durante o mês de janeiro de 2007 foram escavados oito rebaiços na lateral Passarelli e nove rebaiços na lateral Abril, durante nove dias corridos. Avaliadas as datas das escavações dos rebaiços, verifica-se que a velocidade de escavação do primeiro rebaixo junto às laterais no Túnel Leste é rigorosamente igual em dezembro de 2006 e janeiro de 2007, nunca mais de um rebaixo em cada lateral por dia, isso porque a escavação de rebaixo no mês de dezembro não foi realizada em todos os dias do mês.

VI - Conclusão

Foram analisados aspectos de Projeto e de Execução da obra com a finalidade de verificar em que medida poderiam estar relacionados com o acidente ou ter contribuído para sua ocorrência.

Do ponto de vista do projeto foi possível verificar que as hipóteses simplificadoras usualmente adotadas no projeto fazem parte do estado da prática do projeto de túneis.

A adoção de estado plano de deformação utilizado é rotineira em túneis, já que o equilíbrio na seção transversal é suficiente para garantir o equilíbrio do carregamento. A condição de maciço drenado, em geral, é satisfeita na fase provisória de túneis em rocha, pelo fato do piso ficar exposto e ligado às juntas transversais, mais permeáveis.

Do ponto de vista da obra, foram verificadas todas as adaptações executivas implantadas, listadas a seguir, concluindo-se que nenhuma delas pode ter contribuído para a ocorrência do acidente:

- > Distribuição das enfilagens.
- > Posicionamento da grua.
- > Inversão no sentido da escavação do primeiro rebaixo.
- > Cota de escavação do primeiro rebaixo.
- > Seqüência de avanço nas etapas de escavação do primeiro rebaixo.

- > Velocidades de escavação em dezembro/06 e janeiro/07.
- > Detonações dos dias 11 de janeiro e 12 de janeiro.
- > Execução das perfurações para implantação dos tirantes.

À luz do ocorrido e da análise dos condicionantes geológico-geotécnicos e geomecânicos que se fizeram notar após a remoção dos escombros, foi possível reanalisar a instrumentação e identificar o mecanismo do colapso.

Identificadas as seguintes características do colapso: ruptura brusca da superfície; comportamento do maciço como um "bloco" e a magnitude dos deslocamentos, concluiu-se pela impossibilidade de se antever a ruptura brusca pela análise das leituras de instrumentação.

O colapso se verificou pela conjugação de fatores que conferiram ao maciço um comportamento geomecânico localmente singular.

Os mencionados condicionantes podem ser assim resumidos:

- > Mergulho oposto das foliações empinadas e paralelas ao eixo do túnel, tendentes a isolar um bloco crítico de grandes dimensões, limitados pelas juntas transversais ao túnel.
- > Corpo mais rígido de pegmatito, cujo contato com o maciço predominante é constituído de extensa camada friável de biotita de espessura decimétrica.
- > Presença de alteração argilosa de rochas metabásicas, com comportamento muito expansivo e com evidências de grande queda de resistência após ultrapassar a resistência de pico.
- > Concentrações no maciço de juntas transversais ao eixo do túnel.
- > Bloco central de rocha mais resistente, menos alterada, e, portanto, mais densa.

Em consequência houve falta de arqueamento e recalque assimétrico das fundações do revestimento, formando-se então o mecanismo descrito anteriormente, circunstâncias essas que, reunidas, caracterizam a total imprevisibilidade do acidente.

Carlos Eduardo Moreira Maffei

Professor, doutor, titular do Departamento de Estruturas e Geotecnia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, especialista em obras subterrâneas, consultor e diretor da Maffei Engenharia

Luiz Guilherme de Mello

Professor, MSc pelo Imperial College, consultor e diretor da Vector Projetos e professor-assistente do Departamento de Estruturas e Geotecnia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Carlos Manoel Nieble

Consultor, MSc, engenheiro consultor em Mecânica das Rochas e de Desmontes de Rochas, da Matra Engenharia, atual professor convidado do curso Túneis da Pece-USP, tendo sido professor na Universidade de São Paulo e também chefe de Mecânica das Rochas do Instituto de Pesquisas Tecnológicas

Georg Robert Sadowski

Professor, doutor, titular de Geologia Estrutural do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, consultor em Geologia de Engenharia e Geologia Estrutural

Jorge Takahashi

Engenheiro, especialista em cálculos estruturais aplicados a obras subterrâneas