

EVOLUÇÃO DE PATOLOGIAS IDENTIFICADAS NO TÚNEL GASTAU E SOLUÇÕES PREVENTIVAS DE GEOTECNIA REALIZADAS

Kadson Matheus Barreiros GOMES¹; Ana Paula MIKOS²; Marco Antonio da Silva RAMIDAN³; Matheus Braz de Souza VIANA⁴; Álvaro de Freitas VIANA⁵; Flavia de Oliveira DIAS⁶

Resumo – O túnel do GASTAU se trata de uma obra linear para a transposição de um gasoduto pela Serra do Mar, no Estado de São Paulo. O maciço rochoso, predominantemente composto de granito-gnaiss com foliação de fluxo magmático, apresenta relevantes heterogeneidades ao longo do traçado. Em inspeções realizadas entre 2018 e 2024 foram identificados pontos de surgência contendo sedimentos carregados, principalmente na altura da Zona de Falha de Ribeirão do Ouro. As patologias observadas, além de relacionadas às condições de execução do túnel, como a deficiência em partes da impermeabilização de juntas e conexões entre peças estruturais ao longo do túnel, estão em concordância com as zonas geológico-geotécnicas que apresentam falhas, zonas de cisalhamento e diques fraturados com espessuras de até 40 m, indicando a influência da geologia na manifestação dessas patologias. Tendo em vista o contexto descrito foi realizada a extração de corpos de prova para avaliação da qualidade do concreto (compressão axial e determinação de velocidade ultrassônica), além de esclerometria nas aduelas e análise de água e sedimentos carregados. Somente o material esbranquiçado no trecho em NATM tem indícios de ser oriundo da lixiviação do revestimento de concreto, enquanto os demais são advindos de alteração do maciço. Para mitigar as patologias, em 2023, foram executados DHPs e injeções de polímeros, nos trechos em NATM e TBM, respectivamente. as injeções de gel acrílico não se mostraram adequadas frente as vazões observadas nas percolações, no entanto, as injeções de poliuretano estrutural atenderam adequadamente, gerando um aprimoramento nas condições de segurança.

Abstract – The GASTAU tunnel is a linear project for the transposition of a gas pipeline through the Serra do Mar, in the State of São Paulo. The rock massif, predominantly composed of granite-gneiss with magmatic flow foliation, presents significant heterogeneities along its route. Inspections carried out between 2018 and 2024 identified uncontrolled seepage points containing sediments carried, mainly in the Ribeirão do Ouro Fault Zone. The pathologies observed, in addition to being related to the tunnel construction conditions, such as the deficiency in parts of the waterproofing of joints and connections between structural parts, are consistent with the geological-geotechnical zones that present faults, shear zones and fractured dikes with thicknesses of up to 40 m, indicating the influence of geology in the manifestation of these pathologies. Considering the context described, specimens were extracted for axial compression and measurement of ultrasonic wave velocity. Additionally, rebound hammer tests on the concrete of the segments and analysis of the water and sediments carried were performed. Only the whitish material in the NATM section has evidence of originating from the leaching of the concrete lining, while the others come from alteration of the massif. To mitigate the pathologies, in 2023, DHPs and polymer injections were performed in the NATM and TBM sections, respectively. The injections of acrylic gel were not adequate for the flow observed in the seepage paths, however, the injections of structural polyurethane responded efficiently, generating an improvement in the tunnel's safety conditions.

Palavras-Chave – injeção; impermeabilização; NATM; TBM; túnel mecanizado.

¹ Geól., MSc, ALTA Geotecnia Ambiental, Rio de Janeiro, kadson.gomes@altageotecnia.com

² Eng., MSc, NTS, Rio de Janeiro, ana.mikos@ntsbrasil.com

³ Eng., MSc, ALTA Geotecnia Ambiental, Rio de Janeiro, masramidan@altageotecnia.com

⁴ Geól., NTS, Rio de Janeiro, matheus.viana@ntsbrasil.com

⁵ Eng., MSc, ALTA Geotecnia Ambiental, Rio de Janeiro, alvaro.viana@altageotecnia.com

⁶ Geól., MEng, ALTA Geotecnia Ambiental, Rio de Janeiro, flavia.dias@altageotecnia.com

1. INTRODUÇÃO

O Gasoduto Caraguatatuba – Taubaté (GASTAU), no estado de São Paulo, foi projetado para viabilizar a distribuição do gás natural produzido na bacia de Santos. Visando a transposição do gasoduto pela Serra do Mar, foi construído um túnel, que teve como um dos principais objetivos a redução do impacto ambiental relacionado a implantação da faixa de dutos. O emboque do túnel GASTAU se dá no município de Caraguatatuba, sob a cota de elevação 62m. O seu “desemboque” ocorre em um SHAFT vertical com cerca de 540m de comprimento, no Município de Paraibuna, acima da cota 750m, de modo a atingir o topo da serra. O túnel apresenta extensão sub-horizontal (com inclinação de 3%) de 5.200m.

O projeto básico foi emitido em 2007 e a implantação se deu em 2011. Subsidiado por uma análise acerca dos dados históricos disponibilizados, este artigo apresenta a compartimentação geotécnica do túnel, com uma descrição das principais feições geotécnicas e estruturais identificadas em inspeções realizadas entre 2018 e 2024, considerações referentes às possíveis causas e riscos associados, assim como medidas mitigadoras implementadas.

2. VISÃO GERAL

De acordo com a documentação técnica acessada, foram realizadas sequências de investigações geotécnicas ao longo das etapas de projeto e de implantação, sendo estas compostas por sondagens, prospecções geofísicas e ensaios de campo e laboratório. A partir do desenvolvimento de um modelo geológico do maciço, gerando a sua compartimentação em unidades geotécnicas, estabeleceu-se dois tipos de tecnologias de escavação.

Nos primeiros 280 m a partir do emboque, devido à proximidade com a superfície do terreno, além da baixa qualidade do maciço devido à presença de solos residuais e rocha alterada, optou-se pelo método convencional New Austrian Tunneling Method (NATM). O restante do traçado se deu por escavação mecanizada, Double Shield TBM – Tunnel Boring Machine (DS TBM). As Figuras 1 e 2 ilustram as regiões do túnel executadas pelas diferentes tecnologias de escavação.



Figura 1. Trecho NATM (fonte: ALTA Geotecnia, 2023).



Figura 2. Trecho TBM (fonte: ALTA Geotecnia, 2023).

Em inspeções realizadas entre 2018 e 2022, foram identificados pontos de surgência contendo sedimentos carreados, principalmente na altura da Zona de Falha de Ribeirão do Ouro. As patologias observadas, além de relacionadas às condições de execução do túnel, como a deficiência na impermeabilização de juntas e conexões entre peças estruturais, são compatíveis com as zonas geológico-geotécnicas que apresentam falhas, zonas de cisalhamento e diques fraturados com espessuras de até 40m, indicando a influência da geologia na manifestação dessas patologias.

Ressalta-se que, por se tratar de um cenário onde o maciço se mostra heterogêneo, com presença de rochas Classes III e IV (Barton, 1974), intrusões de diques de diabásio, sistemas de fraturas sub-verticais e percolação contínua de água, é natural que, com o passar do tempo, os processos de alívios de tensões devido às escavações, assim como os intemperismos físico e químicos nas rochas e em preenchimentos de suas descontinuidades, resultem em situações de maior solicitação à estrutura do túnel. Apesar disso, tais condições não foram evidenciadas nas inspeções de 2019, bem como nas inspeções realizadas em 2022, 2023 e 2024.

2.1 Compartimentação geotécnica

A geologia do maciço na região do traçado do túnel é composta por granitos-gnaisses, milonitos, diques de diabásio e enclaves de granodioritos-gnaisses. A Figura 3 exhibe a sua compartimentação geotécnica, por meio de levantamento geológico de superfície, sondagens *in situ*, prospecção geofísica superficial e ensaios de laboratório, à época da concepção do seu projeto básico. Devido à extensão do traçado e baixa densidade de dados locais, são ressalvadas incertezas quanto à escala de detalhe de informações como características geomecânicas, espessuras de zonas de cisalhamento e alteração, por exemplo.

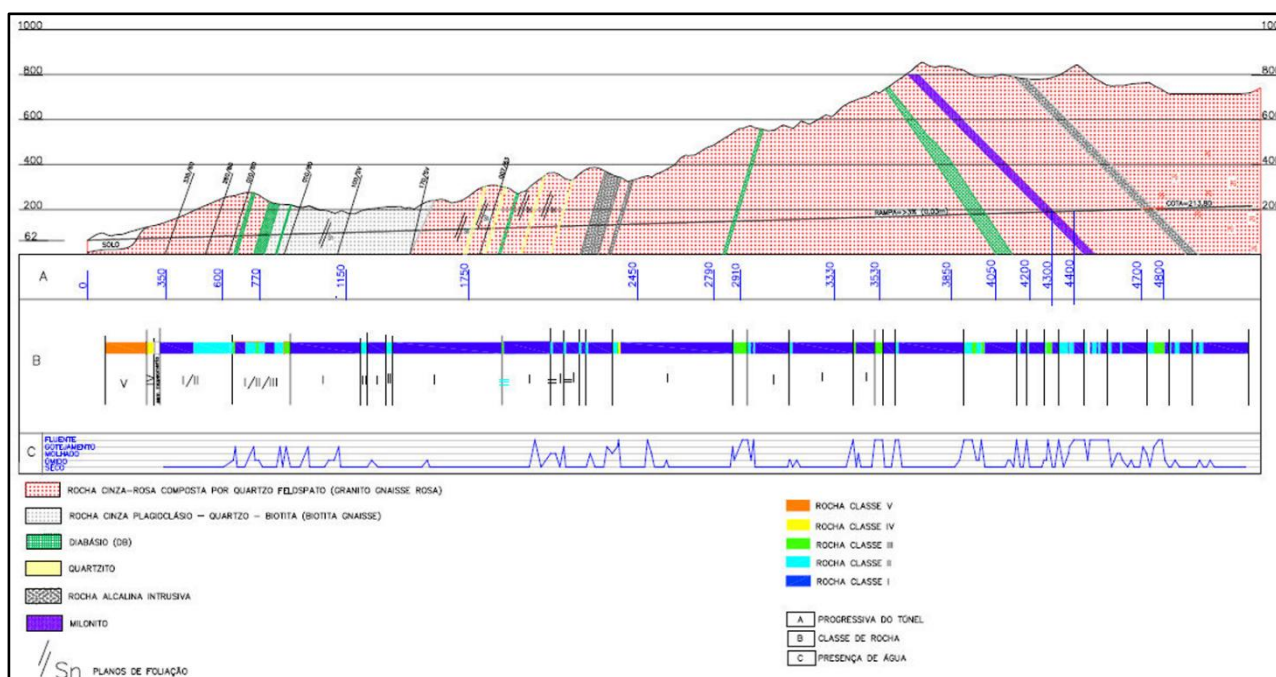


Figura 3. Seção geológica e geomecânica longitudinal do túnel (fonte: Kanji *et al*, 2012).

Embora apresente heterogeneidades ao longo do traçado, predominam no maciço rochoso o granito-gnaiss com foliação de fluxo magmático. À medida que se aproxima de zonas de cisalhamento, a foliação milonítica torna-se progressivamente mais intensa, dando lugar a milonitos. Ao longo do perfil, também são indicados os principais diques de diabásio identificados, alcançando espessuras que variam de 10 a 40m.

Em relação à mineralogia, os granito-gnaisses são compostos por feldspatos alcalino-róseos, plagioclásios, quartzos, biotitas e anfibólios. A granulação é grossa e os cristais possuem até 1cm de extensão. Os milonitos apresentam a mesma composição. No entanto, se diferem pela foliação mais intensa, chegando a ultramilonítica. Já os diques de diabásio variam entre básicos a intermediários e alcalinos.

O traçado do túnel atravessa zonas de falhas caracterizadas por faixas milonitizadas e cataclasadas, as quais geralmente possuem comprimentos inferiores a 100m. Contudo, entre o km 1+700 e o km 2+200, ocorre a Zona de Falha de Ribeirão do Ouro, que possui extensão de centenas de metros e é caracterizada por misturas em proporções variadas de granodiorito-gnaiss, granito-gnaiss e granitoide quartzoso, além de ocorrências de pegmatitos, quartzitos, brechas e bandas de milonitos.

Nas zonas de cisalhamento são esperados fluxos de água subterrânea em razão da estruturação intensa das rochas, impulsionando a evolução de alteração por intemperismo e, consequentemente, afetando a qualidade do maciço. Já os contatos planares entre os diques de diabásio e a rocha encaixante, além do comum fraturamento verificado, igualmente favorecem a percolação d'água. Ademais, como os diabásios representam um litotipo com pouca resistência ao intemperismo e, geralmente, encontram-se muito fraturados, nos trechos de sua ocorrência a qualidade geomecânica acaba sendo inferior à do restante do maciço.

A partir das sondagens realizadas foi possível detalhar a compartimentação estrutural do maciço rochoso, principalmente na área do shaft. Verificou-se que a foliação do granito-gnaiss possui direção dominante N70E e mergulho subvertical para SE. Além disso, todo o maciço é cortado por juntas e fraturas de diferentes atitudes, com 4 famílias estatisticamente dominantes. A família principal é caracterizada por fraturas de alívio predominantemente sub-horizontais com mergulho de até 30° para SW. As três demais são famílias subverticais, com direções dominantes para WNW e ENE, e mergulhos para SE, afetando diretamente o shaft.

2.1.1. Região do emboque

De modo geral, o perfil do trecho inicial é constituído por solo residual, rocha alterada e o substrato rochoso caracterizado pela rocha sã. O solo residual constitui-se de argila-arenosa, pouco siltosa, de coloração marrom amarelada. A rocha alterada é caracterizada como areia com textura variada (fina, média e grossa), apresentando fragmentos de rochas compactas de coloração variegada. A rocha sã é descrita como gnaiss cinza claro rosado, formado por quartzo, feldspato e mica, de granulação média, alterado e pouco fraturado.

2.1.1. Região do SHAFT

Investigações na região do entorno do SHAFT identificaram a presença de zona de alteração hidrotermal e rocha xistosa. Ainda que a abrangência destes litotipos tenha se mostrado limitada, estes podem constituir descontinuidades geomecânicas e hidráulicas que facilitam a percolação de fluidos e/ou movimentações naquele trecho. Além disso, algumas sondagens mapearam milonitos e diabásios.

Contudo, tais condicionantes eram de conhecimento antes da execução das obras de implantação. Deste modo, entende-se que as ações mitigadoras como o uso das melhores técnicas de reforços no revestimento, impermeabilizações e drenagens, tenham sido devidamente aplicadas.

2.2 Inspeções em 2019

Foram realizadas duas inspeções no túnel do GASTAU, em 2019, com o objetivo de avaliar suas condições de operação e segurança. Ambas indicaram a presença de infiltrações tanto no trecho em NATM, através do revestimento de concreto projetado, quanto no trecho em TBM, nas juntas das aduelas e nos orifícios para injeção secundária. Por mais que infiltrações sejam comuns neste tipo de obra, dadas as condições do maciço, se concluiu que as mesmas tiveram como origem falhas nos sistemas de drenagem e de impermeabilização e, portanto, das obras executadas.

As patologias estruturais identificadas, em geral surgências de água ou água com a presença de material lixiviado através de juntas, assim como corrosão em tirantes sem o cap de proteção, foram relacionadas diretamente a problemas de execução, a saber: o não preenchimento total do *gap* com pedregulho, a deficiência na impermeabilização de juntas e conexões entre peças estruturais e de ligação e a não proteção correta dos tirantes. Por outro lado, seus respectivos relatórios indicaram ausência de evidências de problemas de instabilização devido ao maciço, tais como trincas, abaulamentos e ovalizações do revestimento.

Além disso, essas infiltrações traduziram, de certa forma, a compartimentação geotécnica do maciço, pois coincidiram com os trechos mais fraturados, zonas milonitizadas e/ou diques de diabásio, se concentrando no trecho escavado em NATM e nas regiões próximas às falhas e zonas de cisalhamento.

2.3 inspeções realizadas em 2022 e 2023

Analisando os processos identificados e comparando-os com as inspeções de 2019, tendo como base as orientações geológico-geotécnicas geradas em documentos técnicos anteriores, é possível destacar alguns pontos.

As patologias estruturais identificadas indicam a continuidade da relação com problemas na execução de obras. Apesar disso, não foram identificados danos estruturais relevantes nas aduelas ou nas paredes de concreto projetado. Com relação às infiltrações, havia um predomínio de carreamento de material de coloração alaranjada, compatível com as características do maciço (Figuras 4 a 7).



Figura 4. Material escuro carreado na base da parede esquerda, através da junta, sinalizando a presença de minerais máficos no substrato rochoso (fonte: ALTA Geotecnia, 2022).



Figura 5. Percolação com carreamento de material de coloração laranja, junto à parede esquerda, base do túnel (fonte: ALTA Geotecnia, 2022).



Figura 6. Destaque para a intensa infiltração com carreamento de finos de coloração alaranjada na parede, junto à base (fonte: ALTA Geotecnia, 2022).



Figura 7. Percolação com carreamento de material, junto a aparafusamento da junta longitudinal (fonte: ALTA Geotecnia, 2022).

Os trechos do túnel que chamam mais atenção estão localizados entre os suportes 147 e 374, em concordância com as zonas geológico-geotécnicas que apresentam falhas, diques de

diabásio e material fraturado. Adicionalmente, a hidrogeologia da região propicia recargas hidráulicas elevadas, influenciando diretamente a condição de infiltrações e carreamentos observadas.

2.4 Investigações

Diante do problema, buscou-se desenvolver uma solução com a premissa de impactar o menos possível na operação do túnel. Entre os dias 20 e 29 de junho de 2022 foram executados serviços para coleta de amostra e ensaios de esclerometria. Nas amostras coletadas foram realizados ensaios de resistência à compressão axial, velocidade de onda ultrassônica e análises de água e solo carreados. Um breve resumo das conclusões obtidas é apresentado a seguir:

- Todos os resultados dos ensaios de determinação da velocidade de onda ultrassônica apontaram a qualidade do concreto como ótima ou excelente;
- Com relação aos ensaios de compressão axial, no trecho em TBM, em 75% das amostras verificou-se a resistência superior à mínima, de 45 MPa especificada em projeto. No trecho em NATM, constatou-se que 82% dos corpos de prova ensaiados não alcançaram o valor mínimo de resistência à compressão axial de 25 MPa especificado em projeto, todavia, a maioria (mais de 70%) dos corpos de prova extraídos estavam associados a locais com patologias superficiais identificadas em campo, o que pode tornar os resultados não representativos das condições do concreto como um todo. Ademais, alguns destes resultados podem estar ligados a perturbações relacionadas ao procedimento de amostragem (Figuras 8 e 9);
- Todos os resultados dos ensaios de esclerometria (Figura 10), realizados nas aduelas, indicaram valores satisfatórios de dureza superficial, iguais ou maiores que à referência de projeto;
- Somente o material esbranquiçado (Figura 11) no trecho em NATM tem indícios de ser oriundo da lixiviação do revestimento de concreto;
- A granulometria, o peso específico dos grãos e a concentração de óxidos de ferro no material alaranjado carreado apoiam a interpretação de que este é advindo de alteração do maciço, com indicações preliminares de ser o resultado do intemperismo dos diques de diabásio;
- Não foi observado pH elevado na água que percola para o interior do túnel.



Figura 8. Extração de corpos de prova das aduelas para execução de ensaios de resistência à compressão axial (fonte: ALTA Geotecnia, 2022).



Figura 9. Corpos de prova do concreto das aduelas em ensaios de resistência à compressão axial (fonte: ALTA Geotecnia, 2022).



Figura 10. Ensaio de esclerometria (fonte: ALTA Geotecnia, 2022).



Figura 11. Material carregado pela percolação retirado no trecho em NATM para análise (fonte: ALTA Geotecnia, 2022).

2.5 Soluções geotécnicas

A partir dos resultados das investigações e de inspeções realizadas no túnel, foram desenvolvidos projetos de soluções geotécnicas para o Túnel GASTAU.

No período entre 06/03/2023 e 18/09/2023, parte das soluções especificadas nos projetos foram implementadas no Túnel GASTAU, sendo estas injeções no maciço, no trecho TBM e, adequação do sistema de drenagem interna com drenos horizontais profundos, no trecho NATM, conforme exibem as Figuras 12 a 15.

Inicialmente, foi planejada a utilização da resina de poliuretano estrutural expansiva e resina de gel acrílico. Definiu-se uma malha de furos que levasse em consideração o tempo de preenchimento da resina para o estimado em projeto, como também a diferença de reação dos dois produtos: resina de poliuretano estrutural expansiva e resina de gel acrílico.

A seguir o resumo do processo executivo da injeção: as perfurações para acesso foram realizadas diretamente nas peças, com uso de furadeiras de alto impacto; instalação dos bicos; injeção das resinas de forma alternada; retirada dos bicos e calafetagem.

Durante o acompanhamento técnico das obras mencionadas foi possível chegar às seguintes conclusões:

- As injeções de gel acrílico não se mostraram adequadas frente a vazão observada nas percolações;
- As injeções de poliuretano estrutural se mostraram eficientes para eliminar as percolações nos pontos onde foram realizadas.

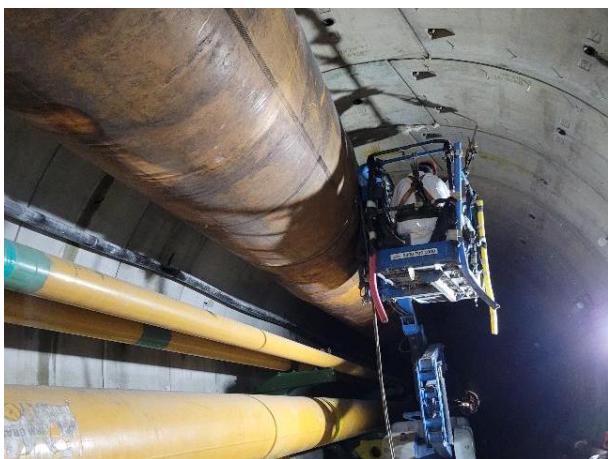


Figura 12. Injeção nas juntas no trecho em TBM (fonte: ALTA Geotecnia, 2023).



Figura 13. Sistema de injeção bicomponente utilizado no trecho em TBM (fonte: ALTA Geotecnia, 2023).



Figura 14. Execução de DHPs no trecho NATM (fonte: ALTA Geotecnia, 2023).



Figura 15. DHP instalado no trecho em NATM com fluxo perceptível de água (fonte: ALTA Geotecnia, 2023).

2.6 Inspeções em 2024

Em setembro de 2024, uma nova inspeção foi realizada no túnel, a qual teve, entre outros objetivos, a finalidade de verificar a evolução dos trechos nos quais foram realizadas soluções geotécnicas. Nesse aspecto verificou-se que, de forma geral, as injeções realizadas em 2023 reduziram ou eliminaram as infiltrações nos locais onde estas foram realizadas (Figuras 16 e 17). Todavia, em alguns locais próximos aos pontos injetados surgiram novas surgências (Figura 18).

Tal situação indica que é recomendável a realização de uma nova campanha de injeções, com a sugestão de que seja realizada uma setorização de controle de vazões e patologias. Adicionalmente, injeções adicionais devem ser realizadas em um perímetro de segurança ao redor do ponto onde foi tratada a patologia com o intuito de impedir o deslocamento da surgência para uma região imediatamente adjacente.

No que tange aos DHPs, instalados, durante a inspeção, verificou-se vazão em um terço dos instalados (Figura 19).



Figura 16. Trecho onde foram realizadas injeções e as infiltrações cessaram (fonte: ALTA Geotecnia, 2024).



Figura 17. Trecho onde foram realizadas injeções e houve redução das infiltrações (fonte: ALTA Geotecnia, 2024).



Figura 18. Novo ponto de infiltração e carreamento de sedimentos próximo a trecho onde foram realizadas injeções (fonte: ALTA Geotecnia, 2024).



Figura 19. DHPs com vazão perceptível no trecho em NATM (fonte: ALTA Geotecnia, 2024).

3.0 CONCLUSÃO

Ao avaliar as informações advindas das inspeções realizadas entende-se que as condições de execução identificadas, principalmente a deficiência na impermeabilização de juntas e conexões entre peças estruturais e de ligação, foram responsáveis pelo aparecimento de surgências expressivas de água, muitas vezes com material carreado. A análise da compartimentação geotécnica do túnel revelou que as infiltrações estão em concordância com as zonas que apresentam falhas, zonas de cisalhamento e diques fraturados com espessuras de até 40m, indicando influências da geologia e hidrogeologia na localização dos pontos de surgências e carreamento de material. As investigações confirmaram a qualidade do concreto das aduelas e deram indicações preliminares de que os sedimentos carreados são resultado do intemperismo dos diques de diabásio. Apenas no trecho em NATM os indícios indicam lixiviação do revestimento de concreto.

Mesmo após a execução das intervenções preventivas, é fundamental que o processo de inspeções se mantenha contínuo. Estas atividades devem se remeter sempre às anteriores, de modo que se tenha um acompanhamento comparativo cronológico no que tange à eficácia das ações a serem executadas, assim como às eventuais intercorrências da evolução do comportamento geotécnico do maciço à situação estrutural do túnel.

As soluções geotécnicas realizadas representaram um aprimoramento nas condições de segurança do túnel. Todavia, as soluções já realizadas fazem parte de um planejamento de longo prazo, de forma que outras inspeções e intervenções estão planejadas para o futuro.

REFERÊNCIAS

Kanji, M. A., Teixeira, R. B., Cezar, M. B., Elsner, P. GEOLOGIA DO TÚNEL GASTAU E SUA INFLUÊNCIA NA ESCAVAÇÃO POR TBM. In *3º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas*. São Paulo. 2012.

Barton, N., Lien, R., Lunde, J. J. R. M. ENGINEERING CLASSIFICATION OF ROCK MASSES FOR THE DESIGN OF TUNNEL SUPPORT. *Rock mechanics*, 6, 189-236. 1974.