

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/797

# Plano de Monitoramento, Inspeções e Manutenção de dois Túneis de Passagem de Gasodutos do Brasil

Ana Paula Mikos

Engenheira Civil Geotécnica, NTS, Rio de Janeiro, Brasil, ana.mikos@ntsbrasil.com

Matheus Braz de Souza Viana

Geólogo, NTS, Rio de Janeiro, Brasil, matheus.viana@ntsbrasil.com

Clara Emoingt Farias

Estudante de Geologia, NTS, Rio de Janeiro, Brasil, clara.farias@ntsbrasil.com

**RESUMO:** Os túneis são estruturas subterrâneas construídas para transporte, seja ele de pessoas, como túneis rodoviários, ferroviários e metroviário, ou de cargas e materiais, como água, esgoto, gás, entre outros. Os túneis do GASTAU e do GASDUC III são túneis construídos para a passagem de gasodutos em regiões de terreno acidentado. O objetivo do presente artigo é apresentar o histórico de ambos os túneis e descrever as atividades de recuperação e manutenção que foram executadas a partir de 2017, ano em que os túneis passaram a ser ativos da Nova Transportadora do Sudeste (NTS). Além disso, também é apresentado o Plano de Monitoramento, Inspeção e Manutenção dos túneis com as principais atividades que vêm sendo realizadas nos últimos anos. Atualmente os túneis contam uma programação de inspeções e instrumentação geotécnica automatizada nos dois túneis, além de monitoramentos de meteorologia, InSAR e escaneamento a laser 3D.

**PALAVRAS-CHAVE:** Túneis, Gasodutos, Manutenção.

**ABSTRACT:** The tunnels are underground structures built for transportation for people, such as road, railway, and subway tunnels, or for goods and materials, such as water, sewage, gas, among others. The GASTAU and GASDUC III tunnels are tunnels built for the passage of gas pipelines in regions with rough terrain. The paper aims to present the history of both tunnels and describe the recovery and maintenance activities that have been carried out since 2017, the year in which the tunnels became assets of Nova Transportadora do Sudeste (NTS). Additionally, the Monitoring, Inspection, and Maintenance Plan of the tunnels are also presented, outlining the main activities that have been carried out in recent years. Currently, the tunnels have a schedule of inspections and automated geotechnical instrumentation in both tunnels, as well as meteorological monitoring, InSAR, and 3D laser scanning.

**KEYWORDS:** Tunnels, Pipelines, Maintenance.

## 1 INTRODUÇÃO

As faixas de gasoduto de transporte de gás natural da Nova Transportadora do Sudeste – NTS, conectam os estados mais industrializados do Brasil (São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais). Em alguns trechos, os dutos passam por regiões de relevo acidentado, sendo necessária a passagem destes por túneis.

Os túneis do GASTAU e do GASDUC III constituem os ativos da NTS. O túnel do GASTAU tem aproximadamente 5,2 km e foi construído com o objetivo de transpor a Serra do Mar. O seu trecho inicial foi realizado em NATM e na sequência TBM. O seu emboque é no município de Caraguatatuba-SP (aproximadamente na cota 60 m) e seu desemboque em Paraibuna-SP, através de um poço vertical, que permite ao duto sua subida até a cota 700 m, aproximadamente.

Outro túnel da NTS é o GASDUC III que tem aproximadamente 3,8 km de extensão, e é situado no município de Cachoeiras de Macacu-RJ. O túnel foi escavado a fogo simultaneamente pelos dois emboques, sendo adotada seção arco retângulo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Metodologias Executivas para Escavação de Túneis

O método NATM – *New Austrian Tunneling Method*, também denominado SEM – *Sequential Excavation Method*, é aplicado quando o maciço não apresenta resistência e suporte para uma escavação total, e por isso é necessário ser escavado em etapas. Os estágios intermediários de escavação são apoiados conforme necessário no próprio material da seção, e a próxima porção é escavada gradativamente até que toda a seção transversal seja concluída. As seções são arredondadas, por serem mais eficientes na distribuição de tensões ao redor da abertura (FHWA, 2015). Geralmente em túneis NATM são necessários dados geotécnicos e análises mais abrangentes para prever o comportamento e classificar as condições do solo e os sistemas de suporte ao solo em quatro ou cinco categorias com base no comportamento (FHWA, 2010).

A metodologia *Drill and Blast*, também denominada escavação de rocha a fogo, consiste na utilização de explosivos e detonações sistemáticas. O desmonte de rocha D&B é composto por etapas distintas que, ordenadamente, formam um ciclo de escavação, considerando: instalação de enfilagens; execução dos furos exploratórios, com eventual aplicação de calda de cimento; perfuração da frente de escavação; carregamento dos furos com explosivos e detonação; ventilação e limpeza do túnel; instalação das cambotas metálicas e aplicação do concreto projetado e medição dos deslocamentos (FHWA, 2010). O método D&B também pode ser utilizado em conjunto com o método NATM. Normalmente são escavados em formato de ferradura para proporcionar um arco sobre a abertura (FHWA, 2015).

A escavação pelo método TBM (*Tunnel Boring Machine*) consiste em uma máquina com uma cabeça e discos de corte rotativa que escava mecanicamente rochas com uma abertura circular de tamanho fixo. No Brasil, o TBM também é conhecido como “tatzão”. As características da rocha apresentam grande influência na escolha das ferramentas e das configurações da máquina. Em rochas brandas, o TBM é projetado para equilibrar as pressões do terreno e da água subterrânea na face escavada, o que ajuda a minimizar as perdas de material e recalques, reduzindo danos potenciais a estrutura. A parte atrás da cabeça de corte, denominada escudo, que suporta os esforços do terreno até que os segmentos pré-moldados sejam colocados dentro do escudo, juntamente com a injeção de calda de cimento ou pedregulho para preenchimento dos vazios. O TBM avança com o auxílio de macacos hidráulicos, que empurram a frente contra os anéis dos segmentos pré-moldados do revestimento montado. Em rochas duras, os TBM são projetados para realizar o corte rapidamente sem o uso dos escudos, geralmente sem o equilíbrio de forças provenientes da frente de escavação, uma vez que rochas duras são mais estáveis e estanques (FHWA, 2015).

### 2.2 Tratamentos em Túneis

Os principais tratamentos aplicados em túneis são: concreto projetado, cambotas metálicas, ancoragens ou tirantes e enfilagens. O concreto projetado normalmente é aplicado juntamente com fibras ou instalado com tela metálica, e é aplicado para promover o confinamento do maciço em pontos localizados, ou ao longo do túnel (ATS, 2020).

As cambotas são elementos estruturais de suporte e podem ter perfil metálico ou ser treliçadas. A geometria da cambota também tem a função de funcionar como guia para execução das enfilagens. As cambotas são normalmente utilizadas juntamente com o concreto projetado, que deve preencher os vazios entre a cambota e a superfície do túnel escavado (FWHA, 2015).

As ancoragens ou tirantes são utilizadas em regiões com falhas e descontinuidades, normalmente combinados com concreto projetado e tela metálica (ATS, 2020). As ancoragens são utilizadas tanto como pré-suporte, como elementos permanentes.

As enfilagens são dispositivos metálicos tubulares instalados na abóboda do túnel formando um leque acima da geratriz superior. Os tubos interagem entre si e são ancorados no maciço imediatamente a frente da escavação do túnel. As enfilagens são utilizadas como pré-suporte e suportes para avanços na frente de escavação do túnel. Devido a necessidade de serem instaladas sobrepostas, as enfilagens são instaladas sub-horizontalmente (ATS, 2020).

### 3 TÚNEL DO GASTAU

O túnel de passagem do GASTAU foi construído para transpor a Serra do Mar. O GASTAU é parte integrante do gasoduto que transporta o gás proveniente do campo Mexilhão, que é processado e armazenado em Caraguatatuba, e transportado para Taubaté, ambos no Estado de São Paulo. O emboque do túnel está localizado no município de Caraguatatuba, na cota 62 m, com extensão aproximada de 5.200 m, e inclinação de 3%. No final do túnel existe um poço vertical com cerca de 540 m de extensão, que atinge a região do planalto, no município de Paraibuna, também no Estado de São Paulo. A cobertura máxima do túnel é de 600 m, no trecho final. Atualmente o túnel contém um duto de gás de 28 polegadas (GASTAU), e dois dutos de óleo de 8 polegadas. O acesso ao longo do túnel é feito através de um veículo sobre trilhos.

Para construção do túnel foram utilizadas duas metodologias. Nos primeiros 282 m, a partir do emboque, foi utilizado a escavação convencional pelo método NATM com dimensão de 7,2 m. O revestimento utilizado foi concreto projetado com uso de enfilagens, quando necessário.

O trecho subsequente foi executado com TBM (*Tunnel Boring Machine*), com tuneladora de escudo duplo (*Double Shield Tunnel Boring Machine*: DS TBM). O diâmetro interno a seção é 5,40 m, o diâmetro da escavação é de 6,16 m e o revestimento de concreto pré-moldado com 25 cm de espessura. No espaço vazio entre a escavação e o revestimento foi preenchido com pedregulho através da abertura dos segmentos para auxiliar na drenagem. A Figura 1 apresenta uma seção esquemática do Túnel do GASTAU.

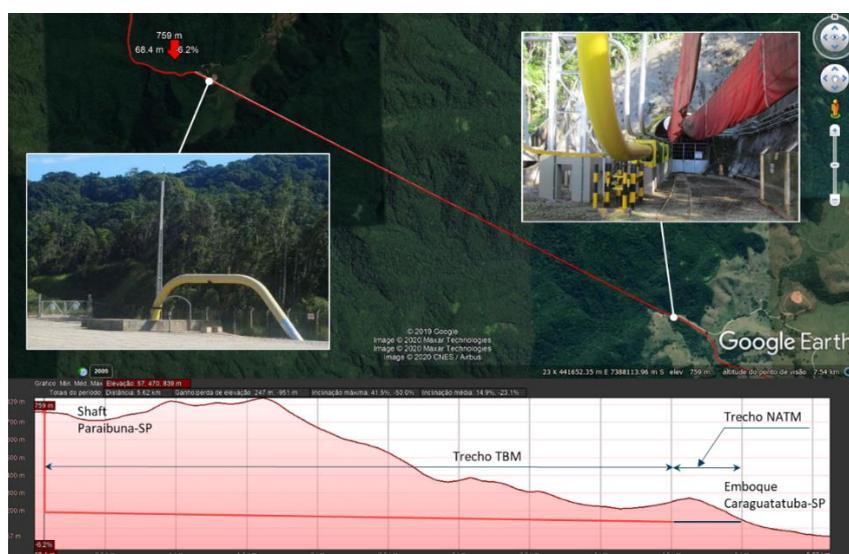
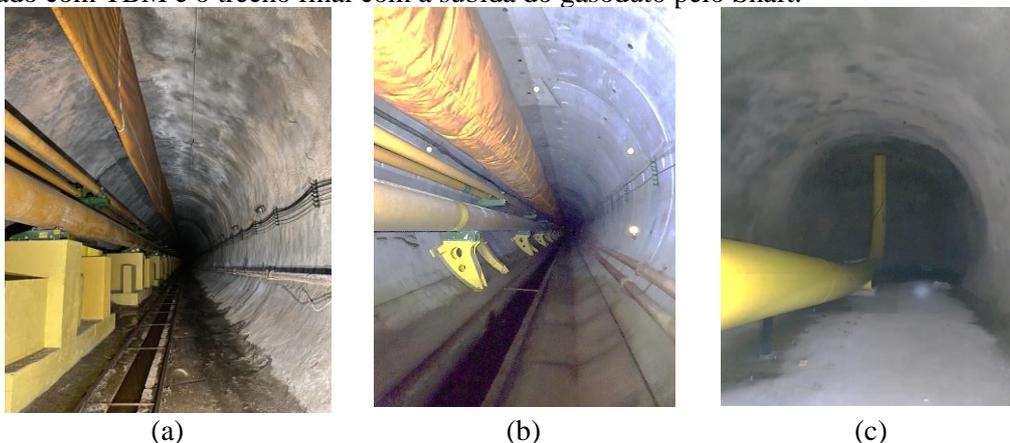


Figura 1. Seção esquemática do Túnel e Shaft do GASTAU

Na Figura 2 são apresentadas fotos dos trechos internos do túnel, o trecho inicial em NATM, o trecho final executado com TBM e o trecho final com a subida do gasoduto pelo Shaft.



(a)

(b)

(c)

Figura 2 Túnel do GASTAU.

Legenda: (a) Trecho em NATM. (b) Trecho em TBM. (c) Subida do duto no final do túnel.

Como o túnel não apresenta uma saída, a tuneladora TBM ficou mantida no final do túnel. Desse modo, o túnel do GASTAU é considerado espaço confinado, e para acesso é necessário treinamentos e exames, além do funcionamento da ventilação, iluminação e comunicação via rádio no interior do túnel.

O acesso ao túnel é realizado por um veículo sobre trilhos com auxílio de baterias, ou a pé para lateral oposta aos dutos. Na região central do túnel (entre os trilhos) existe uma canaleta de água, que direciona as águas de infiltração do túnel para o seu exterior.

### 3.1 Caracterização Geológica-Geotécnica

A geologia do traçado do túnel do GASTAU apresenta três diferentes unidades geológicas distintas: granítico/gnássica, milonítica e diabásica (em forma de diques). A primeira unidade é a predominante, e em áreas perturbadas (tecnizadas) ocorrem os milonitos que se caracterizam por zonas deformadas, de menor resistência e contendo descontinuidades abertas e como consequência maior percolação de água em profundidade. O mesmo efeito é provocado pelos diques de diabásio que se inserem em regiões pré-fraturadas.

A área do emboque do GASTAU situa-se justamente na transição entre dois compartimentos geomorfológicos do terreno, sendo eles o sopé da escarpa da Serra do Mar e as áreas de planície ou baixadas, predominantemente constituídas por depósitos aluvionares. No trecho inicial do túnel, o maciço sofreu forte processo de intemperismo encontrando-se em forma de solos maduros e solos jovens (solos saprolíticos),

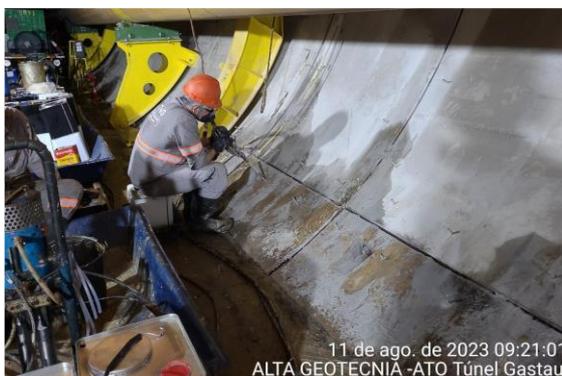
No entorno da área do shaft foi observado que a região do platô foi assentada sobre solo residual, com alguma espessura de aterro. Nas regiões mais íngremes dos taludes dos morros, ainda que de acesso restrito, em favor da segurança, entende-se que existam depósitos coluvionares, migrando para aluvionares, principalmente na margem do vale no qual está instalado canal meandrante, interligado à Represa de Paraiubuna.

### 3.2 Inspeções e Manutenções Realizadas

Em 2019 foram realizadas inspeções geotécnicas por especialistas em túneis para identificação de anomalias e passivos estruturais. Nas inspeções foram identificados problemas como: pequenos deslocamentos no concreto projetado, deslocamentos entre aduelas (juntas), surgência de água, revestimento com marcas de umidade, infiltração entre juntas, presença de material avermelhado carreado, trechos com muita infiltração com grande deposição de material esbranquiçado, cabeça dos tirantes não revestidas

No ano de 2022 foi realizada a readequação da infraestrutura do túnel, como a ventilação, comunicação e locomoção, que é realizada através de um veículo sobre trilhos. Neste mesmo ano também foi realizada uma nova inspeção para atualização e confirmação dos passivos do túnel.

A mitigação dos passivos foi realizada em 2023, sendo que as principais atividades realizadas consistiram em injeção de resina, proteção de corrosão da cabeça dos tirantes e adequação do sistema de drenagem interna com DHPs (drenos horizontais profundos), conforme apresentado na Figura 3.



(a)



(b)

Figura 3. Mitigação dos passivos do túnel do GASTAU.

Legenda: (a) Execução da injeção com resina. (b) Proteção da cabeça dos tirantes.

A injeção de resina teve como objetivo a redução dos pontos de infiltração e surgência, principalmente aqueles que apresentavam carreamento de material. No total, foi realizada a injeção de dois tipos de resina (gel acrílico e resina de poliuretano) em 18 pontos. A proteção contra corrosão dos tirantes foi realizada com argamassa na cabeça de 73 tirantes.

A instrumentação geotécnica do emboque e do Shaft do GASTAU foi instalada em 2023. A descrição dos instrumentos e do monitoramento é apresentada no Item 5.

#### 4 TÚNEL DO GASDUC III

O túnel de passagem do GASDUC III foi o primeiro do Brasil construído para a passagem de um gasoduto, compondo a faixa de dutos que conecta o Terminal Cabiúnas (Macaé) a Refinaria de Duque de Caxias (REDUC). Localizado no município de Cachoeira de Macacu, no Estado do Rio de Janeiro, o traçado do túnel atravessa a Serra do Soarinho, também conhecida como a Serra dos Gaviões. O túnel foi construído em formato arco-retângulo (“U” invertido), com 3.762 m de extensão, 7,2 m de largura e 6,2 m de altura. O túnel possui um duto de gás em operação com diâmetro de 38 polegadas em sua lateral, sendo possível o acesso ao longo do túnel de carro. A declividade do túnel é variável, sendo que o ponto mais alto é situado próximo ao centro, mergulhando em direção aos dois emboques com o objetivo de facilitar a drenagem natural.

A escavação do túnel durou aproximadamente 13 meses, com frentes simultâneas de avanço, utilizando os métodos *Drill and Blast* (Perfuração e desmonte) e o NATM (*New Austrian Tunneling Method*), com a conclusão das obras em janeiro de 2010. No total, o túnel apresentou um volume de escavação de 149.935 m<sup>3</sup>, com 3.880 m<sup>3</sup> de concreto projetado, instalação de 10.534 tirantes e 127 cambotas.

Os emboques são denominados “Emboque Oeste” e “Emboque Leste”, que vão da estaca 0 à estaca 187, respectivamente. Em relação ao perfil longitudinal do túnel, a cobertura máxima é de aproximadamente 350 m, há cerca de 1 km do Emboque Oeste. A Figura 4 apresenta uma seção esquemática do túnel.



Figura 4. Seção Esquemática do Túnel do GASDUC III.

##### 4.1 Caracterização Geológica-Geotécnica

O traçado do túnel do GASDUC III está inserido em rochas que, em sua grande maioria, são granito gnaises ricos em biotita, frequentemente migmatíticos (diferenciação marcante entre bandas máficas, ricas em mica e félsicas, ricas em minerais quartzo-feldspáticos). O mapeamento indicou que o maciço no qual se insere o túnel se encontra intensamente fraturado, embora não seja realizada distinção entre fraturas de origem tectônica, alívio ou induzidas pela detonação. Também foram observados diques de diabásio ao longo da extensão do túnel, e um dique constituído de material quartzo feldspático fino.

O Emboque Oeste do GASDUC III localiza-se na baixada litorânea do estado do Rio de Janeiro, em uma região caracterizada pela transição do domínio de mar de morros e colinas para as escarpas serranas com

cobertura superficial composto por solo residual. Do ponto de vista geológico, a área do emboque encontra-se inserida no Domínio Costeiro do Terreno Oriental da Faixa Ribeira, mais especificamente na unidade geológica denominada como “Granito Cassorotiba”.

No entorno do Emboque Leste, semelhante ao Emboque Oeste, há a predominância de um relevo típico de escarpas serranas com uma cobertura superficial composta por solo residual, que tende a ser pouco espesso e não saturado, em função da declividade da encosta, classificado como um cambissolo.

## 4.2 Inspeções e Manutenções Realizadas

Em 2017, quando o túnel passou a ser da NTS, foram feitas inspeções de modo a identificar as principais patologias e definir um plano de ação. As patologias identificadas consistiram em sinais de deterioração com trincas e deslocamento do concreto projetado, focos de umidade, rocha exposta, cambotas expostas e com corrosão.

Na inspeção foi identificada uma queda de blocos de rocha em um trecho mais crítico do túnel, com rocha exposta apresentando fraturamento subvertical, indicando a baixa qualidade do maciço rochoso e com presença de rocha alterada. Neste trecho havia cambotas metálicas não incorporadas ao túnel com concreto projetado, além de estarem afastadas da parede no túnel. A solução consistiu na execução de um muro de concreto moldado *in loco* com tirantes em uma das laterais, muro moldado *in loco* chumbado no piso na outra lateral e a readequação e instalação de cambotas e concreto projetado com telas metálicas no restante da seção. A mitigação dos passivos foi executada entre os anos de 2017 e 2018, e o histórico das fotos pode ser observado na Figura 5.



Figura 5. Queda de blocos no túnel da parede esquerda do túnel do GASDUC III.  
Legenda: (a) Parede antes da queda dos blocos. (b) Queda de blocos. (c) Solução executada.

Em 2022 foi realizada uma nova inspeção no túnel do GASDUC III de modo a avaliar as mitigações realizadas nos anos anteriores. Durante a inspeção também foi utilizada uma Plataforma de Trabalho Aéreo (PTA) para realização de “bate-choco” e visualizações mais próximas de porções altas das paredes laterais e abóboda. Durante esta inspeção, as principais ocorrências e patologias observadas foram relacionadas à sinais de umidade e indícios de carbonatação no revestimento do concreto projetado. Localmente também foram identificados trechos de pequena magnitude com deterioração no concreto projetado com trincas pouco persistentes. Apesar disso, entende-se que os tratamentos realizados em 2018 foram adequados aos problemas geotécnicos de estabilidade do maciço rochoso, indicando operação segura do gasoduto.

Em 2022 também foi realizado um escaneamento a laser 3D, que é apresentado no Item 4.3. E a instrumentação geotécnica dos emboques do GASDUC III foi instalada em 2023. A descrição dos instrumentos e do monitoramento é apresentada no Item 5.

## 4.3 Escaneamento a Laser 3D

O escaneamento a Laser 3D é caracterizado por dispositivos de emissão de laser, usualmente pulsado, que verifica coordenadas tridimensionais de superfícies alvo, criando uma nuvem de pontos 3D que permite a análise e comparação entre escaneamentos. Em 2022, foi realizado um escaneamento a laser 3D ao longo de toda a extensão do túnel do GASDUC III, de modo a avaliar a atual condição da estrutura e seu revestimento

interno. O levantamento também teve como objetivo ser a “leitura zero” para a comparação com futuros escaneamentos, permitindo a comparação e identificação de deslocamentos e/ou anomalias.

Nesta primeira campanha também foi realizado um segundo escaneamento para simulação de intervenções em um trecho de inicial de 100 m, de modo a garantir que a tecnologia fosse adequada para detecção das mudanças do túnel. As intervenções simularam deslocamentos, deslocamentos e defeitos ao longo do revestimento do túnel, e consistiram em: fechamento da portinha da capela da Santa Bárbara, raspagem do concreto em uma estrutura de proteção do duto, remoção de parte de concreto projetado, entre outros. Na Figura 6 é apresentado um exemplo de uma das intervenções avaliadas no túnel do GASDUC III, que consistiu na remoção de uma camada de concreto projetado que estava sobre um dos muros de concreto armado construídos na lateral do túnel. A Figura 6 (a) apresenta uma visão geral do levantamento do túnel. Nas Figuras 6 (b) e (c), é possível verificar o antes e depois da remoção do concreto projetado. Na Figura 6 (c) é possível identificar tanto a região sem concreto projetado, quanto o acúmulo de material na base. Por fim, a Figura 6 (d) apresenta a análise de deformidade da região, que indica as dimensões da anomalia.

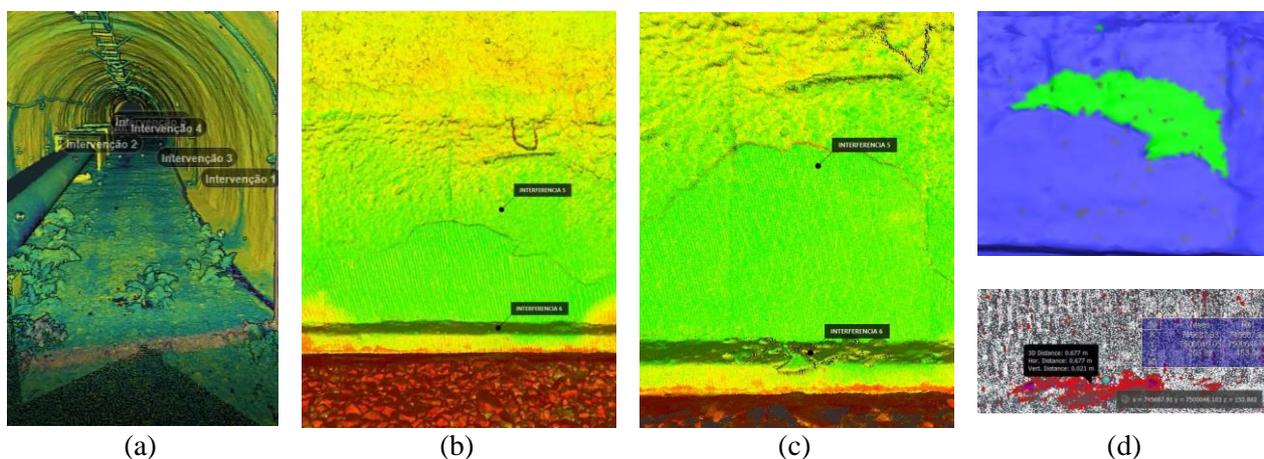


Figura 6. Escaneamento a laser 3D no túnel do GASDUC III.

Legenda: (a) Visão geral do túnel. (b) Local antes das Interferências 5 e 6. (c) Local após as Interferências 5 e 6. (d) Resultado da detecção de mudanças.

A comparação dos escaneamentos subsequentes com simulação de falhas permitiu detectar as intervenções realizadas neste trecho do túnel, e se apresentou com uma boa ferramenta para identificação de possíveis anomalias, como deslocamentos no túnel, deslocamentos do concreto projetado, queda de blocos, infiltrações, etc.

## 5 INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA DOS TÚNEIS

No ano de 2023 foram instalados instrumentos geotécnicos para monitoramento dos 2 emboques do túnel do GASDUC III e para o emboque e shaft do túnel do GASTAU. Os instrumentos utilizados foram: tensiômetros, umidostatos e tiltímetros, com monitoramento remoto. O tensiômetros tem como objetivo medir a sucção do solo, o umidostato mede a umidade do solo, e os tiltímetros permitem estimar os deslocamentos horizontais através da medição angular. Para cada ponto de instalação foram considerados tensiômetros, umidostatos e tiltímetros instalados em furos de sondagem em 3 profundidades diferentes: 1,5 m, 3,0 m e 4,5 m.

Além dos instrumentos automatizados, no Shaft do GASTAU também foram instalados dois inclinômetros, que medem deslocamentos horizontais ao longo de uma vertical. As leituras são realizadas com um torpedo com frequência mensal.

No total, o emboque leste e emboque oeste do GASDUC III apresentam um total de 36 e 30 instrumentos geotécnicos automatizados, respectivamente. O emboque e o Shaft do GASTAU contam com 30 e 20 instrumentos geotécnicos automatizados, respectivamente. Em complemento a estes instrumentos, também foram instalados 2 inclinômetros no Shaft do GASTAU e 3 pluviômetros, um próximo ao emboque oeste do GASDUC III e mais dois no GASTAU, um no emboque e outro no shaft.

## 6 PLANO DE MONITORAMENTO, INSPEÇÃO E MANUTENÇÃO DOS TÚNEIS

A Figura 7 apresenta, de maneira geral, como foi definido o plano de monitoramento, inspeção e manutenção dos túneis do GASDUC III e GASTAU.

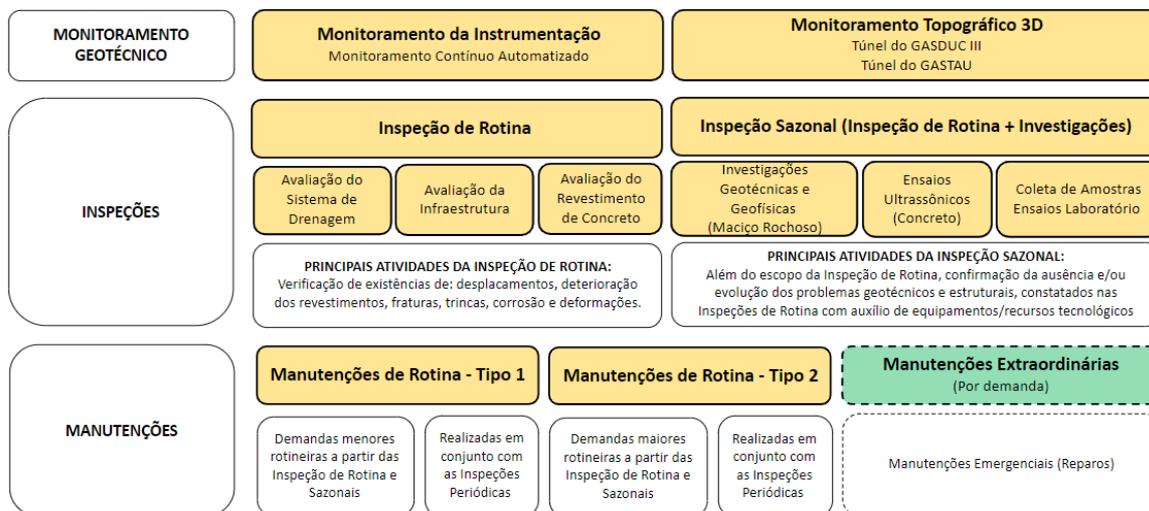


Figura 7. Plano de Monitoramento, Inspeção e Manutenção dos Túneis.

O monitoramento geotécnico compreende a instrumentação geotécnica e o escaneamento a laser 3D. A instrumentação tem o acompanhamento contínuo, com frequência de leitura diária. A frequência é aumentada em períodos chuvosos. O escaneamento a laser está sendo implementado no GASTAU, e devem ser realizados levantamentos ao longo dos anos para identificação de possíveis anomalias.

As inspeções foram divididas em rotina e sazonais. Os principais objetivos da inspeção de rotina são a avaliação do sistema de drenagem, infraestrutura e revestimento de concreto projetado. Na inspeção sazonal são consideradas investigações adicionais às inspeções de rotina. Tais investigações podem compreender ensaios geotécnicos ou geofísicos, ensaios ultrassônicos e/ou coleta de amostras e ensaios de laboratório.

As manutenções são realizadas de acordo com as demandas observadas nas inspeções, sendo para as Tipo 1, de “demandas menores” e a Tipo 2, de “demandas maiores”. Também são consideradas Manutenções Extraordinárias em casos emergenciais.

Cabe salientar que as inspeções e manutenções têm frequências pré-definidas, contudo, a equipe de geotecnia da NTS avalia constantemente os monitoramentos específicos dos túneis e monitoramentos gerais (InSAR e Meteorologia) podendo alterar as frequências planejadas em qualquer eventual necessidade que possa surgir.

## 6 CONCLUSÕES

Atualmente, os túneis da NTS são acompanhados periodicamente de modo a garantir a segurança da operação dos gasodutos. Após as intervenções realizadas nos últimos anos e com os monitoramentos através da instrumentação geotécnica, meteorológica e escaneamento a laser 3D, entende-se que as estruturas estão bem monitoradas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Australian Tunnelling Society. (2020). *ATS – Tunnel Design Guideline*. Austrália.
- Federal Highway Administration. (2009). *Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels — Civil Elements*. Publication No. FHWA-NHI-10-034. EUA.
- Federal Highway Administration. (2015). *Tunnel Operations, Maintenance, Inspection, and Evaluation (TOMIE) Manual*. Publication No. FHWA-HIF-15-005. EUA.