

6°CBT



**6° CONGRESSO BRASILEIRO
DE TÚNEIS E ESTRUTURAS
SUBTERRÂNEAS**
**SEMINÁRIO INTERNACIONAL
"LATIN AMERICAN TUNNELLING
SEMINAR - LAT 2025"**

10 a 12 de março de 2025

São Paulo-SP

**Desenvolvimento e
Sustentabilidade por
meio de Túneis e
Estruturas Subterrâneas**

Implementação de Monitoramento Geotécnico Automatizado com Distanciômetros a Laser nos Túneis do Mineroduto do Sistema Minas-Rio

Rodrigo Brum Teodorico

<Anglo American>, <Santo Antônio do Grama/MG>, <Brasil>

Jairo Henrique da Silva

<Anglo American>, <Conceição do Mato Dentro/MG>, <Brasil>

Leonardo Leopoldo Gomes

<Anglo American>, <Conceição do Mato Dentro/MG>, <Brasil>

Alexandre Assunção Gontijo

<MecRoc Engenharia>, <Belo Horizonte/MG>, <Brasil>

Leandro Roque da Fonseca

<MecRoc Engenharia>, <Belo Horizonte/MG>, <Brasil>

João Paulo Godoi da Silva

<MCA Auditoria e Gerenciamento>, <Santo Antônio do Grama /MG>, <Brasil>

RESUMO: Este trabalho apresenta a implementação de um sistema de monitoramento automatizado das seções de convergência utilizando distanciômetros a laser nos cinco túneis do mineroduto do Sistema Minas-Rio, pertencente à Anglo American. O principal objetivo deste projeto é garantir a coleta de dados em tempo real, obtendo medições contínuas e ininterruptas da estrutura monitorada. Tradicionalmente, as medidas de deslocamento nos túneis do Sistema Minas-Rio eram realizadas com um convergenciômetro de fita manual, um método direto, simples e de baixo custo, mas com limitações significativas, como a exposição excessiva do pessoal em campo, a obtenção de dados apenas durante a coleta e a menor precisão devido a possíveis erros de leitura humana. Para superar essas limitações, foram implementados convergenciômetros a laser automatizados. Este trabalho apresenta as estratégias utilizadas para essa implementação, incluindo a metodologia aplicada e as etapas do serviço, como a definição das seções de convergência, a instalação dos medidores de deslocamento óptico (laser) e a comunicação dos dados com o Centro de Monitoramento Geotécnico (CMG).

Após a automatização, os lasers foram acompanhados por operação assistida, garantindo os padrões de qualidade da instrumentação e comunicação dos dados. O acesso contínuo aos dados e a possibilidade de aplicar diversos tipos de análise para avaliar as condições de deslocamento têm se mostrado de grande valor na gestão de risco da estrutura. Isso permite que a equipe técnica avalie as condições de deslocamento em tempo real, desenvolva gatilhos para deslocamentos aceitáveis e tome decisões de mitigação e correção mais assertivas quando necessário.

Palavras-chave: monitoramento geotécnico, túneis, distanciômetros a laser, automação, gestão de riscos.

Realização



Organização



1. INTRODUÇÃO

As deformações nas estruturas dos túneis surgem de uma infinidade de fatores, abrangendo condições geológicas, geometria do túnel e metodologias de construção. Essas deformações podem precipitar desafios estruturais substanciais, exigindo monitoramento e gerenciamento meticulosos para manter a estabilidade e a segurança do túnel.

Os túneis que atravessam zonas de falha fracas exibem maior vulnerabilidade à deformação atribuível à diminuição da resistência e à autoestabilidade inadequada da massa rochosa circundante. Essa situação pode culminar em graves deficiências estruturais, incluindo subsidência e fissura da coroa do arco, deformação interna das paredes laterais e distorção dos arcos de aço de suporte (Zheng et al., 2024).

Em formações rochosas estratificadas, a aplicação de sobrecargas e a presença de tensões internas podem gerar deformações plásticas consideráveis, exigindo, portanto, um projeto e monitoramento meticulosos para aliviar esses efeitos adversos (Adlim et al., 2022).

A avaliação da convergência em túneis envolve o monitoramento do deslocamento radial da rocha circundante do túnel durante a escavação. Isso ajuda a avaliar a estabilidade do solo e estimar os parâmetros constitutivos dos materiais geológicos, cruciais para garantir a construção segura de túneis (Lee et al., 2022).

A avaliação de convergência é, de fato, o principal método de monitoramento para túneis escavados na rocha, empregando várias técnicas avançadas para garantir a integridade e a segurança estrutural. Esse método envolve medir as mudanças na geometria do túnel ao longo do tempo, o que é crucial para avaliar a integridade do túnel.

No Sistema Minas Rio, as medidas de deslocamento foram tradicionalmente realizadas com um instrumento manual conhecido como convergenciômetro de fita, um método direto, simples e de baixo custo que dispensa a instalação de dispositivos instrumentais sofisticados ou medição indireta. No entanto, essa abordagem manual de coleta de dados apresenta algumas limitações, como exposição excessiva do pessoal em campo, obtenção de dados apenas no momento da coleta em campo e menor precisão dos dados devido à possibilidade de erros de leitura humana.

Neste trabalho, será apresentado um método de automatização das seções de convergências nos cinco

túneis em operação da Anglo American, que consiste em um dispositivo óptico, sem fio, capaz de medir a distância relativa entre os pares de pontos de referência com uso de distanciômetros a laser e comunicação online com o Centro de Monitoramento Geotécnico (CMG). Este método automatizado oferece maior precisão e minimiza o risco de erros humanos durante a coleta de dados, além de reduzir a exposição do pessoal em campo e permitir a obtenção de dados em tempo real.

2. OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho tem como objetivo principal apresentar a implementação de um sistema de monitoramento automatizado das seções de convergência nos cinco túneis do mineroduto do Sistema Minas-Rio, pertencente à Anglo American, utilizando distanciômetros a laser, promovendo avanços significativos na precisão das medições, na redução de riscos ocupacionais e na eficiência da gestão de riscos estruturais.

Divulgar à comunidade geotécnica a metodologia empregada e a forma como os dados foram tratados. Reforçar a importância da instrumentação geomecânica como forma de monitoramento em escavações subterrâneas e analisar os dados de instrumentação, de forma a controlar os riscos geotécnicos, analisando as possíveis variações de deslocamentos das escavações.

3. ÁREA DE ESTUDO

O Sistema Minas-Rio da Anglo American engloba uma mina de minério de ferro e planta de beneficiamento, em Conceição do Mato Dentro e Alvorada de Minas / MG, e um mineroduto, com 529 km de extensão que atravessa 33 municípios mineiros e fluminenses e o terminal de minério de ferro do Porto de Açu em São João da Barra / RJ (Figura 01). Ao longo da extensão do mineroduto, existem cinco túneis.

O Mineroduto Minas Rio conduz o concentrado de minério de ferro, na forma de polpa, da planta até o Porto de Açu. Ao longo do mineroduto, existem cinco túneis denominados São Domingos do Prata, Sem Peixe 2, Carangola-Faria Lemos, Tombos B e Tombos C que estão localizados nos municípios de Nova Era, São Domingos do Prata, Sem Peixe, Carangola e Tombos no estado de Minas Gerais.

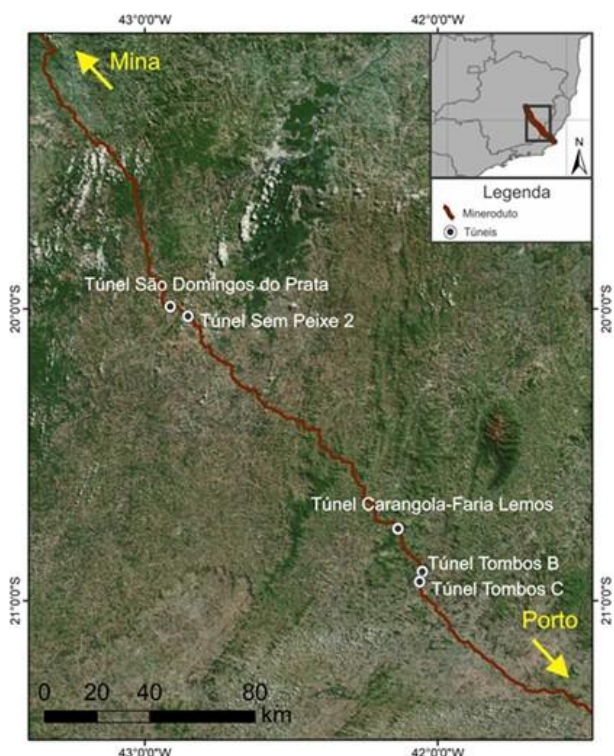


Figura 1. Localização dos túneis ao longo do Mineroduto Minas Rio.

As regiões onde estão localizados os túneis estão inseridas no contexto geológico do Orógeno Araçuai, que se estende do Cráton do São Francisco ao litoral atlântico (Pedrosa-Soares et al. 2001) e cujas deformações e metamorfismos regionais ocorreram no Neoproterozoico, entre 582 e 560 Ma (Silva et al. 2005).

As unidades geológicas presentes no orógeno podem ser agrupadas em dois grandes conjuntos:

- Embasamento Arqueano / Paleoproterozoico;
- Unidades Supracrustais e suítes magmáticas associadas aos vários estágios evolutivos do Orógeno (Novo et al., 2012).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Monitoramento de Convergência

No campo da construção de túneis, a metodologia de monitoramento de convergência desempenha um papel fundamental na proteção da integridade estrutural das passagens subterrâneas. O monitoramento é um processo crítico, voltado para a medição do movimento ou da deformação das paredes do túnel ao longo do tempo. Esse processo permite avaliar a estabilidade e a segurança da estrutura do túnel, detectando quaisquer alterações significativas que possam indicar problemas com a rocha circundante ou com os sistemas de suporte.

Essa técnica envolve um sistema de monitoramento com frequência de aquisição de dados de forma discreta, possibilitando a realização de leituras ao longo de uma seção do túnel ou galeria para monitorar a deformação ao longo do tempo, seja no sentido de convergência ou divergência (fechamento ou abertura).

O sistema de monitoramento é reconhecido por sua estrutura simples e baixo custo, o que o torna acessível para diversos projetos de túneis. Apesar de sua simplicidade, ele proporciona alta precisão nas medições, essencial para o monitoramento confiável da estabilidade do túnel.

As medições de convergência fornecem uma indicação clara da condição do túnel, permitindo que os engenheiros detectem sinais precoces de instabilidade.

Para a definição das seções de convergência, foi utilizada a planta de perfil geológico do túnel, considerando a qualidade do maciço rochoso e as classes entre II e V. Com base no mapa de fragilidade elaborado para o túnel, as seções de convergência foram determinadas nas áreas de menor resistência ou mais frágeis, garantindo um monitoramento mais representativo das condições geotécnicas. A Figura 03 abaixo ilustra o perfil geológico do túnel São Domingos do Prata e os locais onde essas seções foram instaladas.

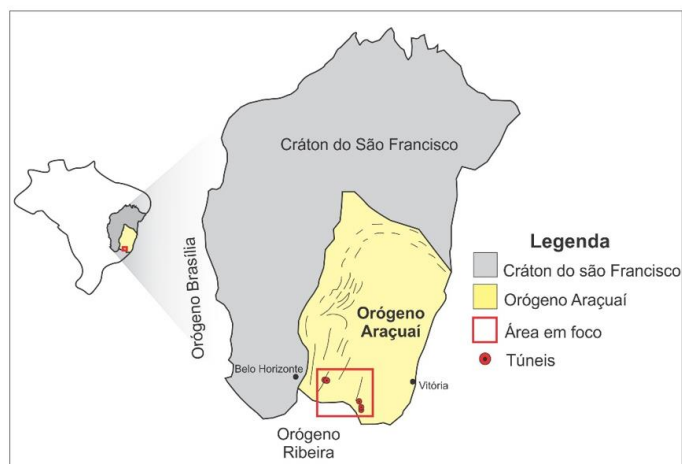


Figura 2. Localização dos túneis inseridos no contexto geológico do Orógeno Araçuai.

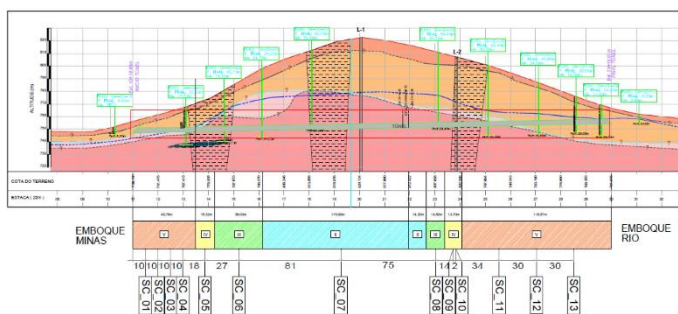


Figura 3. Perfil Geológico do Túnel São Domingos do Prata.

O Túnel São Domingos do Prata, localizado entre os quilômetros 175 e 176 do mineroduto, no trecho II, na Fazenda Estiva, no município de São Domingos do Prata, é o primeiro túnel ao longo da extensão do mineroduto, no sentido Minas-Rio. O túnel possui 380 metros de extensão.

4.2 Infraestrutura e Comunicação

Para garantir a precisão no monitoramento das seções de convergência, foram adotadas soluções tecnológicas eficientes em cada uma das treze seções definidas. A infraestrutura necessária para o funcionamento do sistema de monitoramento foi cuidadosamente planejada e implantada. O sistema foi composto pelos seguintes componentes:

- Distanciômetros a laser;
- Refletor de parede;
- Refletor no teto.

Os refletores desempenham um papel crucial, funcionando como alvos para refletir o feixe de luz emitido pelos distanciômetros a laser. Nos túneis, foram instalados medidores de deslocamento ótico nas paredes, enquanto no teto foi colocado um refletor, que reflete o feixe de luz do laser para que as medições possam ser realizadas com alta precisão. As Figuras 04 e 05 ilustram o esquema de uma seção de convergência.

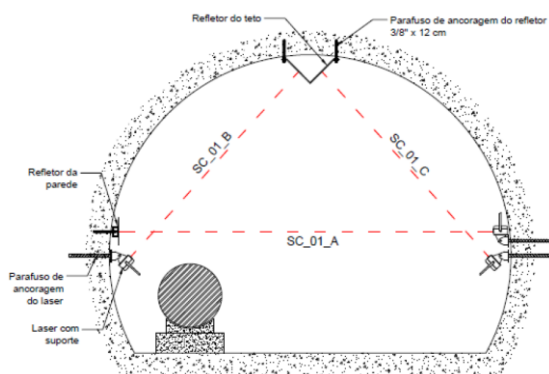


Figura 4. Esquema de instalação dos refletores e dos lasers.



Figura 5. Sensores instalados em uma das seções em esquema de triangulação.

Os dados de monitoramento dos distanciômetros são enviados para o gateway instalado na entrada do túnel, que os registra e os transmite, por meio de fibra ótica, até o Centro de Monitoramento Geotécnico (CMG) da Anglo American, localizado em Conceição do Mato Dentro, MG. A Figura 6 apresenta um desenho esquemático da infraestrutura necessária para o funcionamento da automatização dos equipamentos.

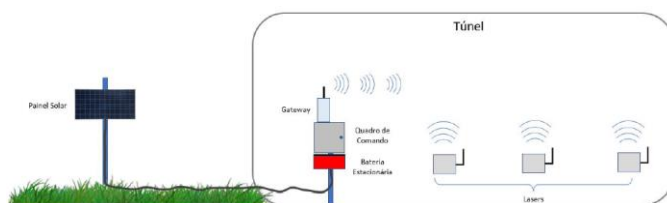


Figura 6. Ilustração da infraestrutura do sistema de automatização dos equipamentos.

A energia necessária para o funcionamento do sistema é fornecida por meio de um painel solar (placa fotovoltaica) instalado no emboque, o qual abastece os equipamentos presentes no quadro de comando (gateway e bateria estacionária). Na figura 7 a seguir, é possível observar o sistema instalado no interior do túnel.



Figura 7. Quadro de comando do sistema de monitoramento.

Nos sensores, foram configurados a identificação e a senha do gateway para que ele pudesse reconhecê-los corretamente. O intervalo de coleta de dados foi definido para ocorrer a cada 6 horas, e o gateway é o responsável por registrar essas informações.

Além disso, o gateway também envia sinais aos sensores, ativando o feixe de laser para a aquisição dos dados. Esses dados são transmitidos de volta ao gateway de forma instantânea. Durante o processo de configuração, é definida a quantidade de sensores que utilizam lasers na mesma rede do gateway. Para evitar conflitos na recepção dos dados, o sinal é enviado a cada sensor com uma diferença de alguns milésimos de segundo entre eles.

5. RESULTADOS

A análise dos dados coletados pelos distanciômetros a laser revelou que, durante o período avaliado, não foram registrados deslocamentos significativos nos túneis monitorados. O gráfico de séries temporais (Figura 8) apresenta os deslocamentos relativos em relação ao ponto de referência inicial, que foi calibrado como zero. Nesse contexto, os valores registrados refletem as variações relativas a esse ponto de partida, com deslocamentos tanto positivos quanto negativos indicando, respectivamente, abertura ou fechamento das seções monitoradas.

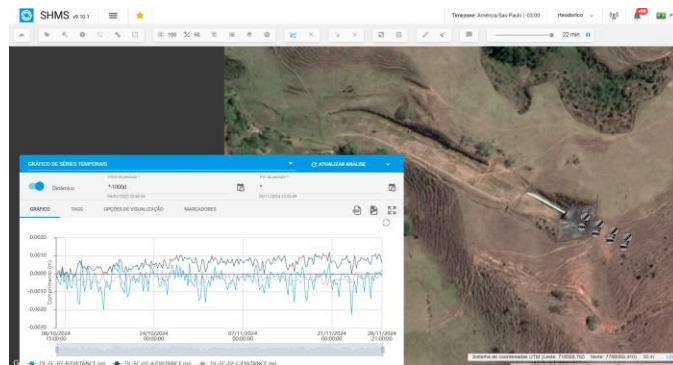


Figura 8. Gráfico de séries temporais de uma seção de convergência.

O comportamento estável observado no gráfico, com os valores próximos de zero, indica a ausência de deformações significativas nas estruturas avaliadas. Essa análise confirma a integridade estrutural no momento do monitoramento, reforçando a eficácia do sistema automatizado.

Além disso, a automatização permitiu gerar um volume significativo de dados confiáveis, possibilitando a avaliação contínua do comportamento estrutural ao longo do tempo. Essa abordagem viabiliza a identificação de tendências, padrões e alterações, sendo essencial para prever e mitigar possíveis riscos estruturais. Os dados obtidos também abrem caminho para o desenvolvimento de uma TARP (Trigger Action Response Plan), que definirá limites de referência específicos para diferentes cenários de deslocamento, aprimorando a gestão de riscos.

6. DISCUSSÃO

A introdução do sistema automatizado trouxe ganhos significativos em termos de volume e qualidade de dados. A capacidade de monitorar em tempo real e criar rotinas específicas para leitura e interpretação dos dados permite uma compreensão mais precisa das deformações nos túneis. Isso representa um avanço na detecção precoce de anomalias e na mitigação de riscos estruturais.

Apesar dos resultados positivos, o desenvolvimento de uma TARP específica é uma etapa fundamental para consolidar a eficiência do sistema. A TARP estabelecerá limites de referência para diferentes cenários de deslocamento, permitindo respostas rápidas e assertivas a eventuais alterações.

A automatização também minimizou a exposição do pessoal em campo, reduzindo riscos ocupacionais e melhorando a eficiência das operações. Essa abordagem representa um modelo de monitoramento que pode ser replicado em outros contextos geotécnicos.

7. CONCLUSÃO

A tecnologia de distanciômetros a laser proporcionou maior precisão, coleta contínua de dados e redução de riscos ocupacionais, estabelecendo um novo padrão para a gestão de riscos geotécnicos.

A continuidade desse trabalho inclui o desenvolvimento de uma TARP específica, essencial para definir limites de referência e ações proativas em resposta a deslocamentos.

Os resultados obtidos destacam o potencial do sistema automatizado como uma ferramenta indispensável para projetos subterrâneos, contribuindo para a segurança estrutural e a sustentabilidade operacional.

8. REFERÊNCIAS

Kübra, Nur, Adlim., Sinem, Bozatli., Yavuz, Abut. (2022). 1. Investigation of the Effect of Tunnel Geometry on Deformations in Shallow and Stratified Rock Formation. Yüzüncü yıl üniversitesi fen bilimleri enstitüsü dergisi, doi: 10.53433/yyufbed.1090576.

NOVO, T. A. et al. Geologia e Recursos Minerais da Folha Carangola SF.23-X-B-VI, estado de Minas Gerais, escala 1:100.000. Belo Horizonte: CPRM, 2012. 72 p. (Relatório e mapa).

PEDROSA-SOARES, A. C. et al. The Araçuaí–West Congo orogen in Brazil: An overview of a confined orogen formed during Gondwanland assembly. Precambrian Research, Amsterdam, v.110, p. 307-323, 2001.

SILVA, L. C. et al. The Neoproterozoic Mantiqueira Province and its African connections. Precambrian Research, Amsterdam, v.136, p. 203-240, 2005.

Wei, Xing, Zheng., Feng, Huang., Sheng, Wang., Wenxuan, Xu. (2024). 2. Research on the Mechanism of Loose Deformation in Weak Fracture Zone Tunnel Surrounding Rock and Support Control. Buildings, doi: 10.3390/buildings14082506

Yulin, Lee., Wei-Cheng, Kao., Chih-Sheng, Chen., Chishuai, Ma., Pei-Wen, Hsieh., Chi-Min, Lee. (2022). 3. Inverse Analysis for the Convergence-Confinement Method in Tunneling. Mathematics, doi: 10.3390/math10081223