

# UTILIZAÇÃO DE NOVA TECNOLOGIA DE SENSORES LINEARES EM CADEIA PARA O MONITORAMENTO DE DESLOCAMENTOS EM TÚNEL DO METRÔ DE SÃO PAULO

Denis Kenhiti Suzuki

MMF Projetos de Infraestrutura, São Paulo, Brasil, Denis.suzuki@mmfprojetos.com.br

Ricardo Mirisola Rodrigues

MMF Projetos de Infraestrutura, São Paulo, Brasil, Ricardo.mirisola@mmfprojetos.com.br

Luciano Machado

MMF Projetos de Infraestrutura, São Paulo, Brasil, Luciano.machado@mmfprojetos.com.br

Fernanda Castells Vidaller Laurino

MMF Projetos de Infraestrutura, São Paulo, Brasil, Fernanda.castells@mmfprojetos.com.br

Clemerson Pereira Silva

Companhia do Metropolitano de São Paulo – Metrô, São Paulo, Brasil, clemersonpereira@metrosp.com.br

**RESUMO:** Este trabalho apresenta um estudo de caso da utilização de sensores lineares em cadeia do tipo MEMS, *Shape Accell Array* (SAA), para o monitoramento de deslocamentos verticais, horizontais e de convergência em seção do túnel singelo em execução da Linha 2 - Metrô, no qual a utilização automatizada deste sensor, permitiu avaliar a influência na estabilidade do túnel da execução de colunas de *Jet-grouting* (JG) adjacentes a seção monitorada, garantindo maior segurança a continuidade dos trabalhos de escavação do túnel bem como dos parâmetros utilizados na execução das colunas de JG, utilizadas como reforço de solo para partida do *Túnel Boring Machine* (TBM). As leituras obtidas de forma remota e em tempo quase real, foram confrontadas com os dados de instrumentação convencional, mostrando resultados compatíveis e confiáveis. Neste caso, o monitoramento remoto se mostrou como única opção para atender aos requisitos da obra, dado o nível de alerta apertado ( $\pm 3$ mm para 5min) e a necessidade de rápida intervenção, caso o nível de alerta fosse atingido. Além disso, o sistema permitiu observar a ocorrência de deslocamentos importantes não registrados pelas equipes de campo, evidenciando ainda mais a importância do monitoramento contínuo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Instrumentação geotécnica e estrutural, Túneis, Escavação subterrânea, Metrô

**ABSTRACT:** This paper presents a case study on the use of linear chain MEMS sensors, specifically Shape Accell Array (SAA), for monitoring vertical and horizontal displacements, as well as convergence in a section of the ongoing single-track tunnel of Line 2 - Metro. The automated use of these sensors enabled the evaluation of their influence on tunnel stability amidst the execution of adjacent Jet-grouting (JG) columns. This monitoring ensured greater safety for the tunnel excavation works and the parameters used in JG column execution, which reinforce the soil for Tunnel Boring Machine (TBM) starting shafts. Remote readings, obtained in near real-time, were compared with conventional instrumentation data, demonstrating consistent and reliable results. In this scenario, remote monitoring proved to be the only viable option to meet the project's requirements, given the tight alert level ( $\pm 3$ mm for 5 minutes) and the need for swift intervention if the alert level was breached. Moreover, the system highlighted significant displacements that were not detected by field teams, emphasizing the importance of continuous monitoring.

**KEYWORDS:** Geotechnical and structural instrumentation, Tunnels, Underground Excavation, Subway

## 1. INTRODUÇÃO

A instrumentação geotécnica comumente utilizada nas obras de túneis ainda se baseia nos dados coletados por equipes de campo, que obtêm essas leituras 2 a 3 vezes por dia, numa frequência alta. As leituras depois de coletadas são planilhadas e processadas até que estejam disponíveis depois de algumas horas para os clientes e consultores. No entanto, neste tempo, as atividades de escavação e demais serviços adjacentes permanecem em andamento, muitas delas com interferências que podem apresentar risco direto a estabilidade do túnel. Visando minimizar este risco, neste sentido, a instrumentação geotécnica automatizada e remota apresenta-se como uma excelente alternativa para o monitoramento dos túneis, sendo capaz de coletar informações e disponibilizá-la em poucos minutos, além da possibilidade de pré-configuração de alertas automáticos que informam caso algum parâmetro exceda o limite pré-estabelecido.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O caso apresentado trata-se de um túnel singelo executado junto ao VSE Coxim da Linha 2 do Metrô. O túnel em formato elipsoidal possui diâmetro horizontal maior de aproximadamente 6,2m, sendo esse executado pelo método NATM (*New Austrian Tunnelling Method*). Este túnel situa-se a de forma adjacente ao túnel de via dupla com 11,66 m de diâmetro. O trecho objeto deste artigo encontrava-se executado, aproximadamente entre 15,00 e 18,00 metros apartir do emboque do VSE Coxim, e na época 60m da frente de escavação. A necessidade de instrumentação contínua e interrupta se deu devido a necessidade de execução de 113 colunas de *Jet-Grouting* (JG) no túnel de via dupla, utilizadas para a formação do septo vertical “rolha”, sendo este parte de um conjunto de tratamentos para a partida da *Túnel Boring Machine* (TBM), próximo ao túnel singelo, que encontrava-se executado. Na Figura 1 é apresentado a localização dos túneis e do tratamento realizado.

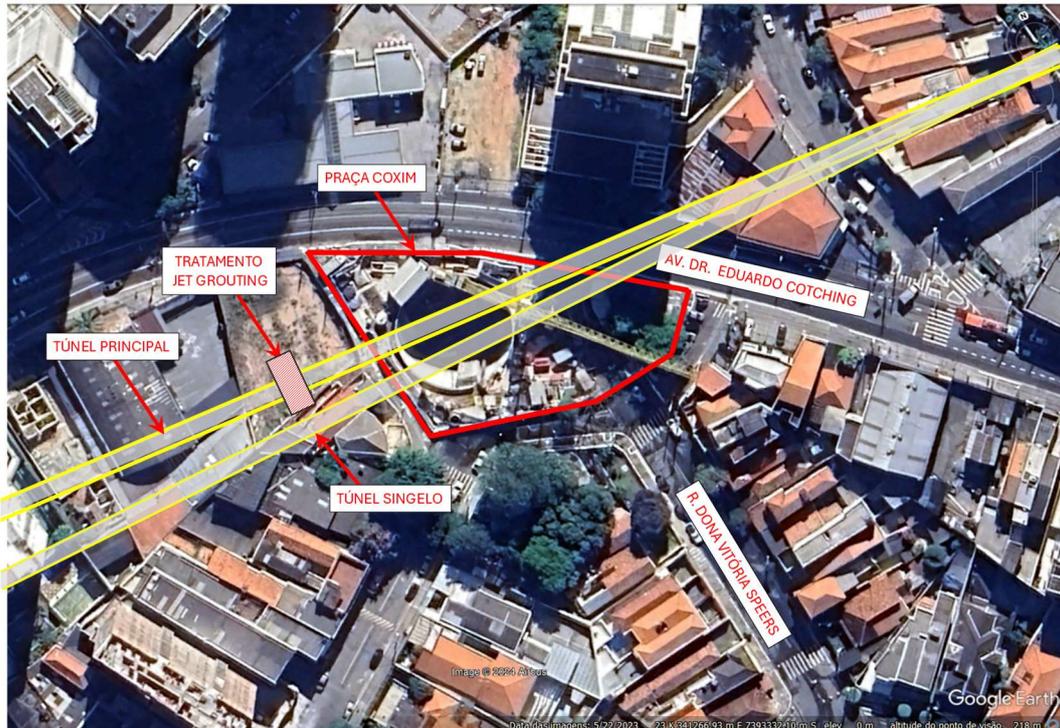


Figura 1 – Localização da obra

Como é de conhecimento, o *Jet-Grouting* (JG) é uma técnica de melhoramento de solos que promove a injeção de nata de cimento através de jatos horizontais e verticais de alta pressão promovendo a mistura do solo existente com nata de cimento formando colunas ou painéis de solo cimento. A preocupação era de que durante a execução das colunas de JG, possíveis imprevistos relativos a execução das colunas (existência de

vazios no solo, caminhos preferenciais) pudessem de alguma forma ocasionar deformações excessivas no túnel singelo ao ponto de comprometer a estabilidade dele. Desta forma, as deformações junto a seção mais próxima do tratamento necessitavam ser monitoradas ao longo de todo o processo executivo das colunas de JG. A distância da coluna mais próxima ao túnel era de cerca de 1,20m da parede do túnel singelo. A Figura 2 ilustra a posição das colunas de JG e a posição da seção instrumentada.

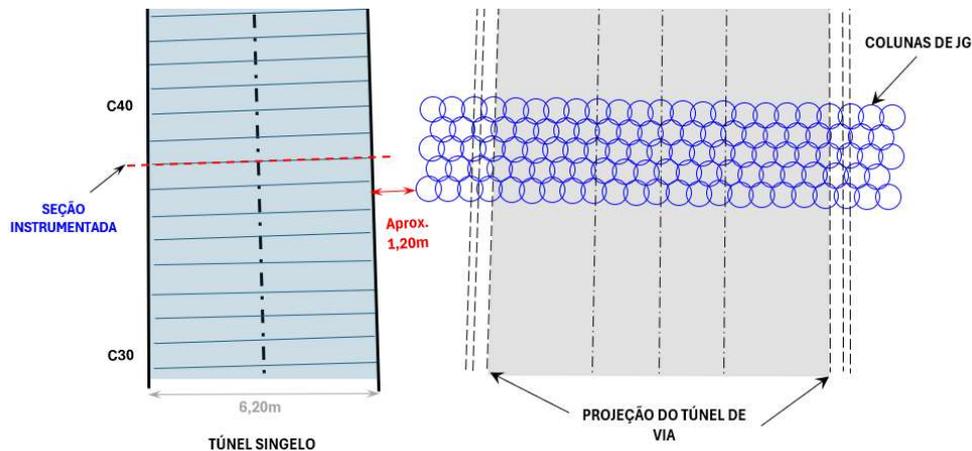


Figura 2 – Localização da seção instrumentada e das colunas de *Jet Grouting* (JG)

A Figura 3 apresentada a seguir mostra a numeração das colunas.

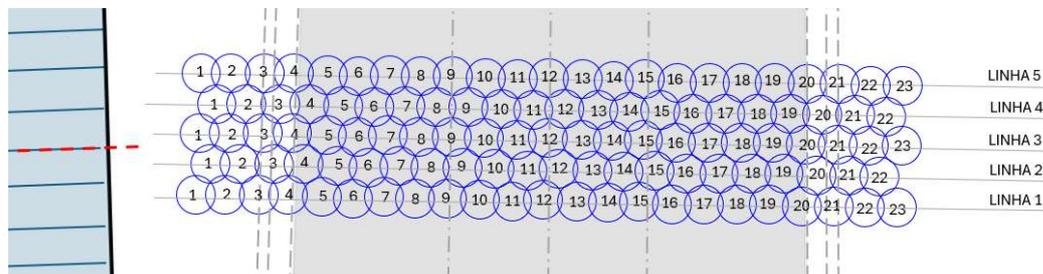


Figura 3 – Localização e numeração das colunas de *Jet Grouting* (JG)

### 3. INSTRUMENTAÇÃO ADOTADA

A instrumentação convencional prevista para o acompanhamento da execução do túnel vinha sendo realizada desde o início da obra com auxílio de alvos refletivos, para monitoramento dos recalque e convergência do túnel. Entretanto, o monitoramento convencional não permite o acompanhamento das deformações em tempo real, impossibilitando uma resposta rápida no caso de uma possível intervenção, mesmo com a equipe permanecendo no local em tempo integral. Desta forma, a necessidade do monitoramento contínuo e interrupto fez com que se optasse por um monitoramento automatizado.

Uma vez que os serviços de escavação no túnel singelo permaneceriam em andamento, a instrumentação a ser instalada não poderia interferir nessas atividades, ou seja, não seria possível a instalação de um instrumento que bloqueasse ou sofresse interferência pelo tráfego de equipes e equipamentos através da seção.

Dentre as soluções apresentadas, a utilização de sensores lineares em cadeia do tipo *Shape Acell Array* (SAA), mostrou-se o instrumento mais viável, atendendo tanto as questões referentes a precisão necessária, número de pontos instrumentados, quanto a facilidade de instalação ao longo do da seção do túnel. Conforme apresentado por SILVA (2021), este instrumento vem sendo muito utilizado em diversas obras de escavação subterrânea e túneis, como uma excelente alternativas ao monitoramento geodésico comumente realizado.

Outras soluções automatizadas também eram possíveis de utilização para este caso, como utilização de medidores de convergência laser, monitoramento de prismas com estação total robótica, sensores de fibra óptica para medição de deformação e convergência, como apresentado por Barbosa C.B. *et al.*(2009),

extensômetros elétricos instalados em série, etc porém com limitações, principalmente a respeito do tempo de implantação, velocidade de leitura e interferências externas.

- Shape Accell Array (SAA)

Trata-se de um equipamento eletrônico giroscópico e gravimétrico com tecnologia MEMS (*Micro Electro Mechanical Systems*) para medição de deformações de estruturas podendo ser aplicados para detecção de deformações na vertical (recalque), horizontal (inclinações) e em arco (convergência), adequados para monitoramento em mineração, barragens, estradas, túneis, hidrelétricas e encostas. Composto por uma cadeia de segmentos de 250 e 500 milímetros de tubos rígidos unidos por juntas flexíveis que podem se deslocar em qualquer direção, sendo que cada segmento possui um microprocessador, um sensor do tipo MEMS e um sensor de temperatura. Na Tabela 1, apresentada a seguir são apresentadas algumas características do sensor.

Tabela 1 – Características do SAA (fonte: Measurand)

<b>Comprimento do segmento</b>	250mm ou 500mm (do centro da junta ao centro da junta)
<b>Comprimento padrão do SAAV</b>	Até 150m (segmentos de 500mm) Até 50m (segmentos de 250mm) Até 30m (com kit instalação para convergência)
<b>Diâmetro interno dos tubos para instalação</b>	27mm, 47mm a 100mm
<b>Diâmetro da junta</b>	19mm
<b>Comprimento padrão do cabo de dados</b>	padrão 15m
<b>Peso</b>	0,5 kg/m
<b>Temperatura de operação</b>	(-35°C a 60°C corrigido por algoritmo polinomial de temperatura)
<b>Profundidade a prova d'água</b>	2000 Kpa (200m de coluna d'água)
<b>Requisitos de alimentação (energia)</b>	12 VDC (12-16.5) no 1,8mA/segmento 12 VDC (12-16.5) no 0,4mA/segmento (no modo low power)
<b>Faixa de trabalho angular do sensor MEMS</b>	+/- 360° (seleção requerida para modos 2D/3D)
<b>Faixa de trabalho do modo 3D (Vertical)</b>	+/- 60° em relação a vertical
<b>Resolução</b>	0,00067° (0,012mm/m)
<b>Precisão do sistema</b>	+/- 0.5mm para 30m SAAV
<b>Precisão por segmento</b>	+/- 0.0005° (0.01mm/m) (68% intervalo de confiança) +/- 0.005° (0.09mm/m) (99.7% intervalo de confiança)
<b>Estabilidade do sensor (24H)</b>	+/- 0.01mm/m (68% intervalo de confiança) +/- 0.03mm/m (99.7% intervalo de confiança)
<b>Erro de aximute nas juntas</b>	< +/- 0.01°

Para o caso em questão foi utilizado um SAAV com 11m, possuindo 22 sensores ao longo do seu comprimento. Em comparação com o monitoramento convencional realizado com alvos refletivos, o monitoramento com SAAV apresentava cerca de 7x mais pontos monitorados em uma única seção, conforme figura 4.1 e 4.2.

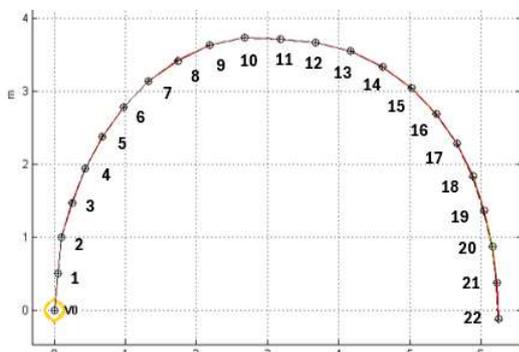


Figura 4.1 – Numeração dos sensores sistema automatizado (SAA)

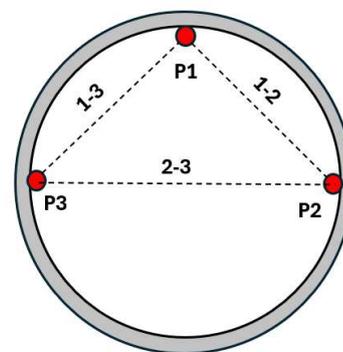


Figura 4.2 – Alvos refletivos (monitoramento convencional)

Para a instalação do instrumento na seção, utilizou-se uma tubulação de 1” em PVC, para revestimento e proteção dos sensores. Esta tubulação foi então fixada por meio de abraçadeiras metálicas diretamente no

semicírculo da seção. Esta forma de instalação permitiu a rápida liberação do tráfego de equipamentos dentro do túnel, sendo necessário cerca de 1,5h para realização deste serviço.

O *datalogger* foi instalado a cerca de 30m da seção e próximo a saída do túnel, visando melhorar a comunicação via protocolo *LoRa* entre o *datalogger* e o *gateway*, instalado fora do poço de acesso. Já a ligação entre o *datalogger* e o sensor SAA é realizada via cabo de dados.

Na Figura 5 é apresentado um registro fotográfico da instalação dos equipamentos utilizados no monitoramento automatizado.

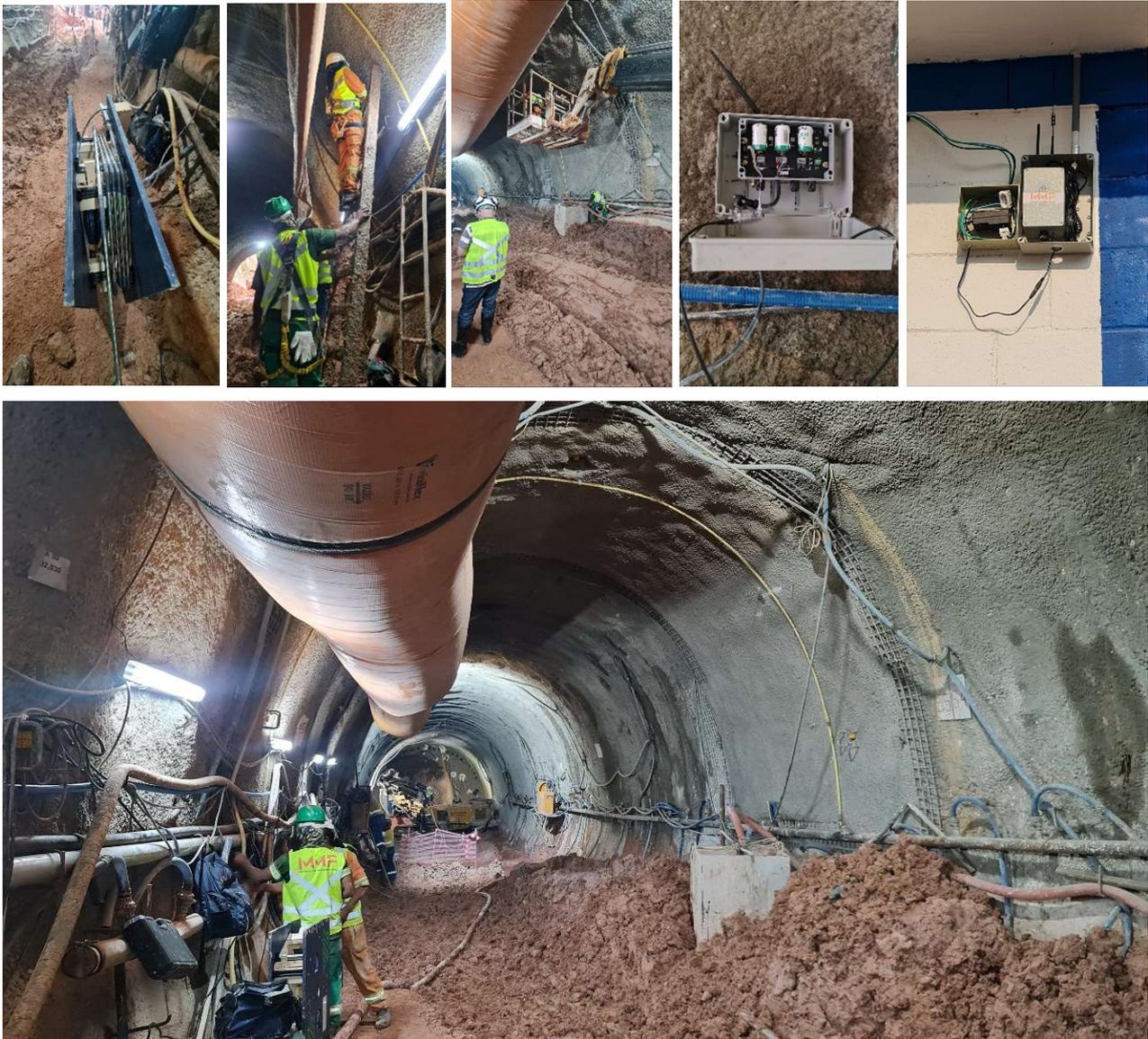


Figura 5 – Fotos das instalações dos equipamentos

O intervalo definido de coleta de leituras foi de 5min, sendo a transmissão para o servidor de dados realizada logo após a coleta da leitura. Após carregados os dados no servidor, estes eram processados automaticamente e disponibilizados para visualização em tempo quase real em um software de visualização específico do equipamento.

Como critério de alerta definiu-se em conjunto com o cliente que o limite estabelecido seria de +/-3mm entre 2 leituras consecutivas (5min). Ultrapassando este limite os responsáveis seriam informados via email. Na Figura 6 é apresentada a tela do *software SAAView*, utilizada para visualização dos dados.

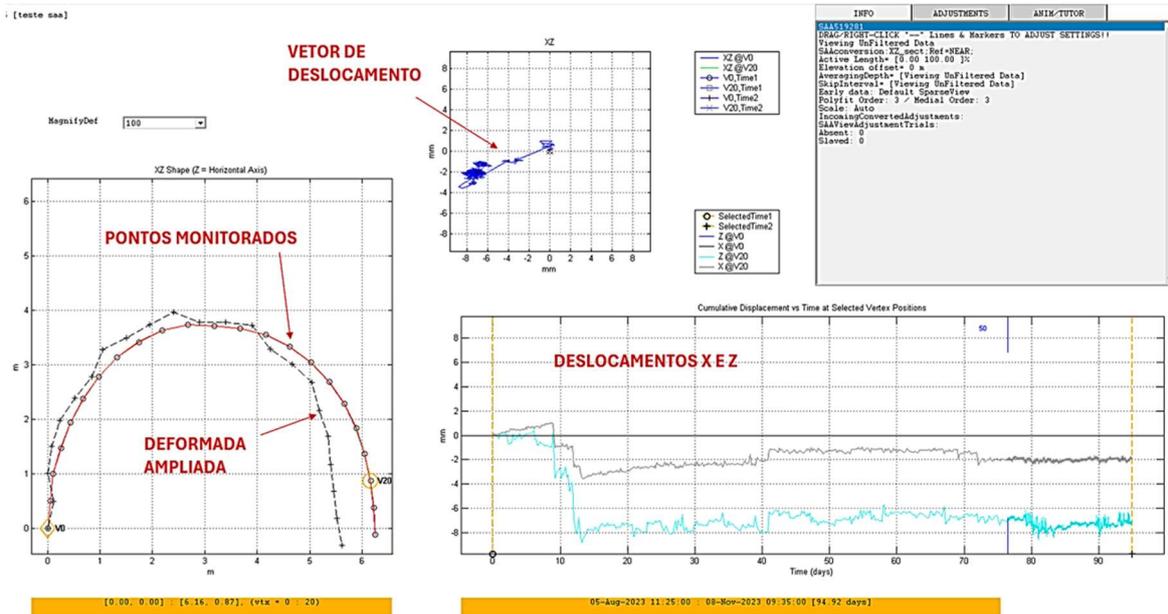


Figura 6 – Software de visualização dos dados do SAAV

#### 4. ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

O monitoramento automatizado foi iniciado no dia 05/08/2023, logo após sua instalação. Já execução das colunas de JG foi iniciada no dia 12/07/23 pela Coluna 11 da linha 1, cerca de 3 semanas antes da instalação do sistema.

Após o início do monitoramento automatizado, entre os dias 14 e 19/08/23, durante a execução das colunas foram observadas deformações que ocasionaram diversas paralisações na obra, uma vez que os limites de alerta foram ultrapassados. Tais variações também foram confirmadas pelas leituras convencionais, através das leituras dos alvos refletivos. As colunas executadas neste período e que tiveram relação com as paralisações podem ser visualizadas na Figura 7.

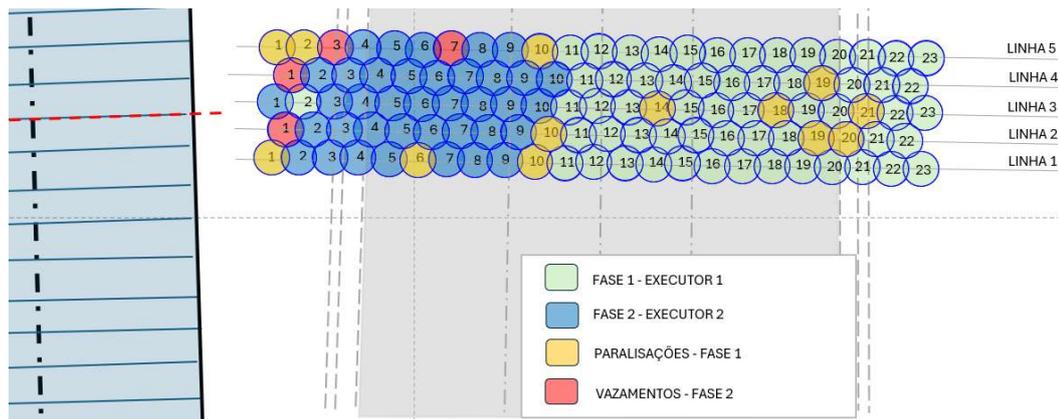


Figura 7 – Ocorrências durante a execução das colunas de JG

As variações nas convergências atingiram o valor máximo de 8,8mm na corda 2-3 em 18/08, quando a obra decidiu pela paralisação dos serviços, entre os dias 23/08 e 10/10/23, a fim de investigar o motivo da ocorrência de tais deformações. Ao final deste período, houve a troca da empresa executora e a retomada dos serviços em 11/10/23 com a entrada do Executor 2.

Com o Executor 2 também foram observadas ocorrências no túnel, que paralisaram as atividades. Dentre as ocorrências, foram constatados vazamentos de calda no túnel e vazamento de calda pelos DHPs, cujos motivos muito provavelmente estão relacionados a presença de caminhos (microfraturas) e materiais mais

permeáveis que direcionaram a calda de cimento para os DHP's e para o túnel. Entretanto, apesar das paralisações os valores de deslocamento mantiveram-se dentro dos níveis de alerta estabelecidos; o que mostra a importância da experiência da empresa executora no processo executivo.

A visualização do sistema remoto utilizado permite diversos tipos de informação como saída como posição, aceleração, deslocamento incremental, deslocamento acumulado, forma absoluta, magnitude, ângulo, temperatura, desvio incremental e raio de curvatura de cada sensor.

Através dos dados de posição dos sensores foi possível calcular aproximadamente os valores de convergência das mesmas cordas monitoradas pelo sistema convencional. A comparação entre os dados de convergência automatizados e convencional são apresentados na Figura 8.

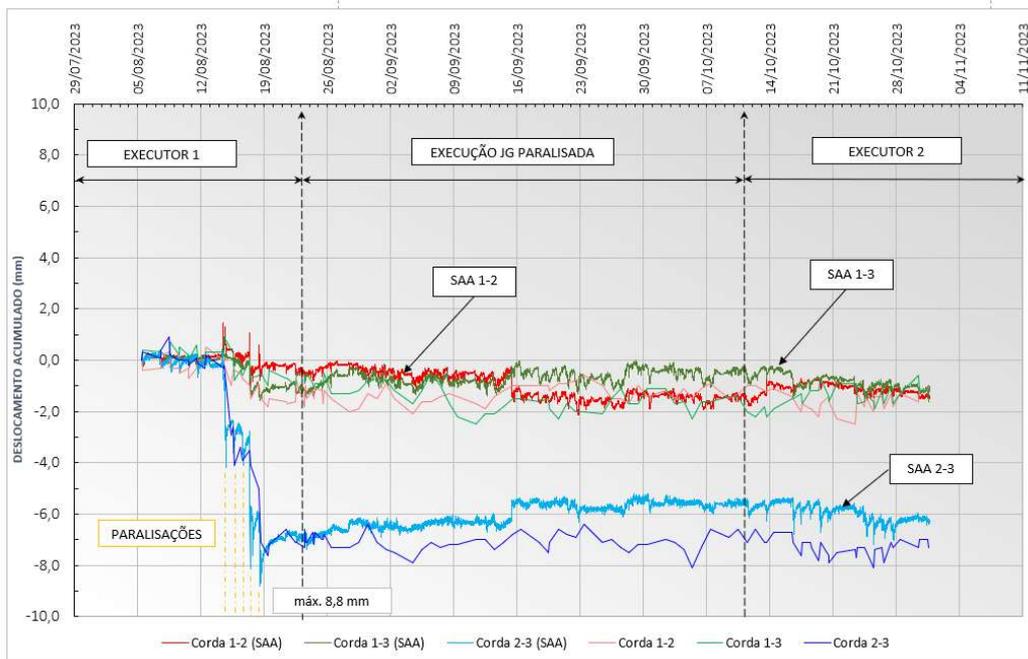


Figura 8 – Comparativo entre as convergências automatizada e convencional

A análise dos resultados permite observar que o comportamento do sistema automatizado apresentou comportamento bem similar ao monitoramento convencional realizado, porém com uma infinidade muito maior de leituras. No total o sistema automatizado coletou mais de 24200 leituras, enquanto que o convencional realizou 113 leituras no mesmo período de monitoramento.

Observando-se os dados, nota-se que devido a realização de leituras pontuais da instrumentação convencional, deslocamentos importantes não foram registrados, uma vez que estes ocorreram após as leituras já terem sido realizadas e no intervalo entre leituras de um dia para o outro, conforme pode-se observar na Figura 9.

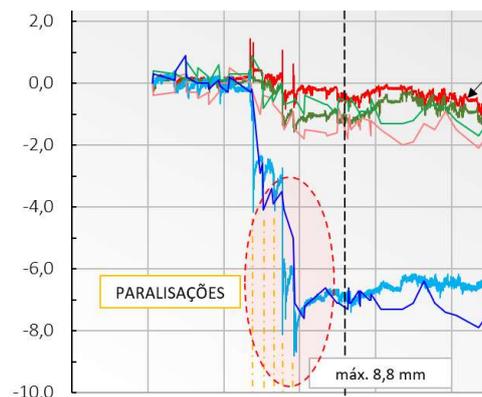


Figura 9 – Diferenças importantes entre o monitoramento convencional e o automatizado

Isso mostra a importância de se manter o monitoramento automatizado obtendo as leituras em intervalos mínimos, de modo que mudanças abruptas no comportamento do maciço possam ser registradas e alertadas.

As maiores discrepâncias observadas entre o monitoramentos convencional e automatizado são da ordem de 4mm, ou seja, próximo a precisão da leitura com estação total que em média gira em torno da mesma grandeza.

## 5. CONCLUSÕES

As variações entre o sistema convencional e automatizado podem estar relacionados principalmente a diferença de precisão entre os equipamentos utilizados, posição dos sensores utilizados nas análises e em especial a diferença no número de pontos monitorados na seção. Outro detalhe importante, é que para o nível de alerta pré-estabelecido para o monitoramento automatizado, +/-3mm entre leituras (5min), é um valor muito próximo a precisão da leitura convencional com estação total, não podendo ser aplicado o mesmo parâmetro como alerta para ambos os sistemas.

Dentre as possibilidades de monitoramento, entendemos que o tempo necessário para se monitorar a mesma quantidade de pontos monitoradas pelo SAA utilizando-se o sistema convencional seria muito superior ao da instrumentação remota e, provavelmente, o “time” da intervenção poderia ser ligeiramente tardio, com maior risco de promover danos na estrutura do túnel. Desta forma, a utilização do sensor SAA mostrou como uma excelente alternativa para o monitoramento automatizado de túneis, sendo imprescindível para o sucesso da obra neste caso específico.

O êxito da adoção desta tecnologia evidencia que o monitoramento automatizado, em conjunto com sensores e softwares de processamento cada vez mais avançados, deve ser cada vez mais frequente em projetos de infraestrutura. Ele atua em complemento à instrumentação convencional, com o objetivo primordial de garantir a segurança dos envolvidos, proporcionando também maior precisão nos dados e agilidade na resposta aos eventos críticos.

Através deste trabalho, também foi possível observar a relevância da seleção criteriosa de empresas executoras com experiência na execução dos serviços. Ficou claro que a qualidade da execução das colunas teve um impacto significativo no comportamento das deformações no túnel singelo.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos imensamente a todos os profissionais que possibilitaram a utilização desta tecnologia pela primeira vez em uma obra de infraestrutura, a toda equipe do Metrô da Mendes Júnior, e em especial a Ana Flávia Righini e Lucio Seiti Shibusaki que forneceram em detalhes todos os registros que permitiram a elaboração deste artigo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Measurand. Disponível em < <https://measurand.com/> > . Acesso em 15 dez 2024.

Barbosa, C. B., Ferreira, L. A., Araújo, F. M., Gonçalves, L., Gama, C. D., Malva, R., Silva, A. e Freitas, V. (2009) *Fiber Bragg grating system for continuous large-scale monitoring of convergence in Rossio Tunnel*, 20th International Conference on Optical Fibre Sensor, Edinburgh, UK.

SILVA, A. Monitoramento de Obras Subterrâneas com recursos a ShapeArrays. 5º Congresso Brasileiro de Túneis, São Paulo, Brasil, 2021.