

## NOVA TECNOLOGIA NO MONITORAMENTO GEOTÉCNICO E ESTRUTURAL DE ESCAVAÇÕES PROFUNDAS

Geraldo Moretti – Engenheiro Civil  
Moretti Engenharia Consultiva – Diretor de Engenharia  
[Geraldo@morettiengenharia.com.br](mailto:Geraldo@morettiengenharia.com.br)

Denis Suzuki – Engenheiro Civil  
Moretti Engenharia Consultiva – Departamento de Instrumentação e Prospecção Geotécnica  
[Denis@morettiengenharia.com.br](mailto:Denis@morettiengenharia.com.br)

Ivo Teixeira – Engenheiro Civil  
Moretti Engenharia Consultiva – Departamento de Instrumentação e Prospecção Geotécnica  
[Ivo.teixeira@morettiengenharia.com.br](mailto:Ivo.teixeira@morettiengenharia.com.br)

Cristina Barbosa – Engenheira Civil  
FiberSensing – Departamento de Desenvolvimento  
[Cristina.barbosa@fibersensing.com](mailto:Cristina.barbosa@fibersensing.com)

Nuno Costa – Técnico Superior em Electrónica  
FiberSensing – Departamento de Produção  
[Nuno.Costa@fibersensing.com](mailto:Nuno.Costa@fibersensing.com)

Luis Ferreira - Phd em Fisica  
FiberSensing – Diretor de Vendas e Marketing  
[Luis.Ferreira@fibersensing.com](mailto:Luis.Ferreira@fibersensing.com)

Hugo Cássio Rocha – Geólogo  
Companhia metropolitana de São Paulo – Departamento de Projeto  
[hcrocha@metrosp.com.br](mailto:hcrocha@metrosp.com.br)

André Silva – Engenheiro Civil  
Cyrela – Departamento de produção  
[Andre.Silva@cyrela.com.br](mailto:Andre.Silva@cyrela.com.br)

### **RESUMO**

Neste trabalho é apresentada uma nova tecnologia para o monitoramento geotécnico e estrutural do efeito de uma escavação de grande porte e respectiva contenção na deformação de um túnel da rede do metropolitano de São Paulo. O sistema pioneiro foi desenvolvido com o intuito de monitorar vários parâmetros correlacionados com a evolução das deformações ao longo do tempo, e consequente grau de risco associado a cada estágio da escavação.

A condicionante fundamental para o desenvolvimento do sistema foi que este permitisse o monitoramento remoto da convergência do túnel sem interferir com a operação da linha metropolitana. As metodologias tradicionais de medição de convergência implicam uma presença física humana no túnel, fator incompatível com a operação contínua do metrô durante 20 horas diárias. Complementarmente surge a necessidade de aquisição e disponibilização dos dados de um modo constante e em tempo “quase” real devido aos riscos inerentes a qualquer dano causado ao túnel.

Para este fim foi instalado um sistema de monitoramento remoto baseado na tecnologia de sensores de Bragg de fibra óptica, no qual é possível medir deformações e temperatura pontualmente no perímetro do túnel. Os dados são transmitidos e disponibilizados online em regime permanente, sendo os mesmos atualizados a cada minuto.

Os trabalhos de preparação e instalação são descritos bem como apresentados resultados preliminares dos primeiros meses de operação.

## ***ABSTRACT***

This paper presents a new technology for geotechnical and structural monitoring of the effect of a large-scale excavation and its containment in an urban area in a deformation of the underground tunnel network of São Paulo. The pioneering system was developed in order to monitor various parameters correlated with the evolution of deformation over time, and therefore the degree of risk associated with each stage of excavation.

The fundamental condition for the development of the system was that it would allow remote monitoring of the convergence of the tunnel without interfering with the operation of the Metropolitan Line. The traditional methods of measuring convergence imply a physical human presence in the tunnel, a factor incompatible with continued operation of the subway for 20 hours a day. In addition there was the need that all the data would be always available and in “almost” real-time because of the risks associated to any damage to the tunnel.

For this matter a remote monitoring system based on fiber Bragg grating sensors was installed, in which was possible to measure deformations and temperature at certain points in the perimeter of the tunnel. The data is transmitted and available online and with permanent access, being updated every minute.

Preparation and installation works are described and results for the first months of operation are shown.

## ***INTRODUÇÃO***

A Avenida Paulista em São Paulo, Brasil é uma das importantes avenidas da América do Sul, o principal centro financeiro, econômico e de serviços da cidade, assim como uma das suas principais atrações turísticas. Milhares de pessoas movem-se diariamente ao longo deste importante eixo que conecta diversos polos da cidade. Toda a área envolvente é servida pela linha verde da companhia metropolitana de São Paulo. Em um dos mais antigos e místicos terrenos existente na avenida um novo arranha-céu será construído. A Torre Matarazzo terá um centro financeiro, um centro comercial contemplando também uma grande área de entretenimento, totalizando mais de 120 000 metros quadrados de área construída.



Figuras 1. Vista da futura Torre Matarazzo

A estrutura consiste em 23 andares e 7 subsolos. A contenção do edifício é garantida por uma parede diafragma com 50 cm de espessura e 8 linhas de tirantes. Nas imediações da obra existe a linha verde do metropolitano de São Paulo em constante operação, existindo apenas alguns metros de separação para terreno e conseqüente escavação.



Figura 2. Execução de escavação

Uma das preocupações do projeto é a possibilidade de alteração no estado de tensões do solo ao redor do túnel, durante a execução e protensão dos tirantes da parede diafragma (contenção). Devido a este fato foi necessário desenvolver um conjunto de metodologias com o objetivo de monitorar o comportamento geotécnico e estrutural do túnel e assim garantir a segurança da operação do Metro, da Avenida Paulista, dos edifícios do entorno e da própria obra.

## **OBJETIVO**

O objetivo deste trabalho é apresentar uma nova tecnologia, por meio da utilização de fibra óptica, para o monitoramento geotécnico e estrutural de escavações, capaz de operar em regime constante, disponibilizando os dados em tempo real ao utilizador.

## **TECNOLOGIA**

### **Histórico**

A ambição por uma tecnologia capaz de registrar, mesurar e transportar continuamente os dados obtidos pelo monitoramento geotécnico e estrutural tem sido cada vez mais significativo. O impacto causado pelas atividades de construção, manutenção e monitoramento de estruturas de Engenharia Civil tem assumido um enorme impacto social e econômico. A qualidade da construção, a compatibilidade com as crescentes exigências arquitetônicas, os requisitos em termos de manutenção e de segurança, são fatores que cada vez mais balizam os desenvolvimentos neste domínio. A resposta adequada a estas exigências torna necessária uma abordagem aos temas globais da instrumentação de estruturas e monitorização contínua [1].

Primordialmente a inspeção visual era o método mais utilizado no monitoramento de estruturas, no entanto, por questões operacionais e de limitação de recursos humanos, muitas vezes as inspeções eram tecnicamente insuficientes e na maior parte das vezes superficiais. A utilização de métodos mais quantitativos de monitoramento a que recorreram os inspetores evoluiu para a utilização de extensômetros mecânicos, sistemas de triangulação e um número considerável de sensores de base eléctrica (sensores de cordas vibrantes, extensômetros resistivos, LVDTs, etc.). Entretanto, estes métodos requerem normalmente a presença de pessoal técnico especializado, associando um nível geral de precisão e resolução baixas, bem como um elevado custo para a obtenção de dados. Aliado a este fato, a exigência da presença da equipe nas imediações da estrutura invalida ou limita as suas ações em estruturas em operação, tais como túneis, pontes.

Por outro lado, a instalação de sistemas de monitoramento em tempo real baseados em sensores eléctricos torna-se muito complexa dada a quantidade de cabos e os problemas de interferências eletromagnéticas associadas ao elevado número de sensores requeridos.

Os sensores de fibra óptica constituem, assim, uma alternativa muito eficiente em termos de desempenho e custo, para o monitoramento em tempo real das mais diversas estruturas – a elevada sensibilidade, o peso e tamanho reduzidos, a ausência de emissões e/ou sensibilidade EMI/RFI (ElectroMagnetic Interference/Radio Frequency Interference), a operação segura em ambientes perigosos, a elevada largura de banda da fibra óptica, etc., são alguns dos seus principais atributos.

Vários tipos de sensores de fibra óptica têm sido utilizados ao longo do tempo no monitoramento de estruturas: cavidades de Fabry-Pérot em fibra óptica (extrínsecas e intrínsecas), interferômetros de luz-branca em fibra óptica, sensores de Brillouin e de Raman, e redes de Bragg. As redes de Bragg em fibra óptica, também conhecidas por sensores de Bragg, oferecem um conjunto de vantagens que faz delas a tecnologia predileta para aplicações de monitoramento estrutural [2].

### *Sensores de Bragg*

Uma rede de Bragg é essencialmente uma microestrutura de dimensões reduzidas ( $\sim 1 \mu\text{m}$ ) que pode ser inscrita no núcleo de uma fibra óptica ( $\varnothing$  núcleo  $\approx 10 \mu\text{m}$ ,  $\varnothing$  fibra  $\approx 125 \mu\text{m}$ ) por diversos métodos utilizando radiação ultravioleta coerente, ou seja, emitida por um laser. Essa microestrutura consiste numa pequena alteração periódica e localizada do índice de refração, da ordem dos 0,1 %, que tem origem num mecanismo físico denominado fotossensibilidade, particularmente observável em fibras de sílica com elevadas dopagens de germânio ou em fibras ópticas standard submetidas a tratamento com hidrogénio a alta pressão [3].

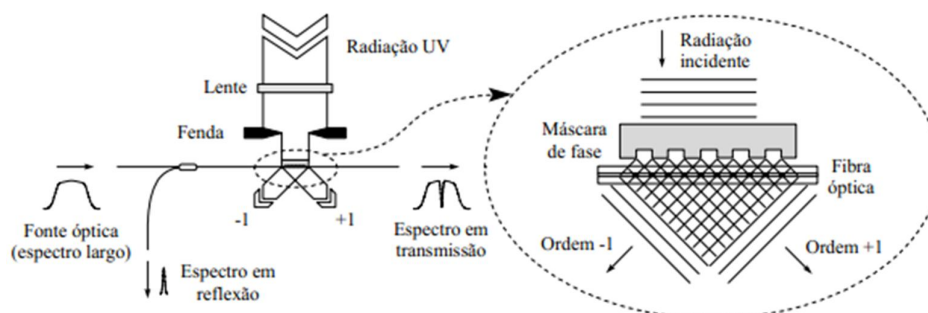


Figura 3. Fabricação de uma rede de Bragg

As redes de Bragg, enquanto sensores de fibra óptica são simplificadaamente uma microestrutura periódica que funciona como um espelho de comprimento de onda seletivo. Isto significa que se uma fonte de luz com uma extensa largura de banda é injetada na fibra óptica, apenas a luz dentro de uma largura espectral muito estreita, centrada no comprimento de onda de Bragg, será refletida pela grade. A luz restante continuará o seu caminho através da fibra óptica, sem sofrer qualquer tipo de perda. A fibra de rede de Bragg é uma estrutura simétrica, refletindo sempre por isso a luz no comprimento de onda de Bragg, não importando a direção pela qual a luz segue [4].

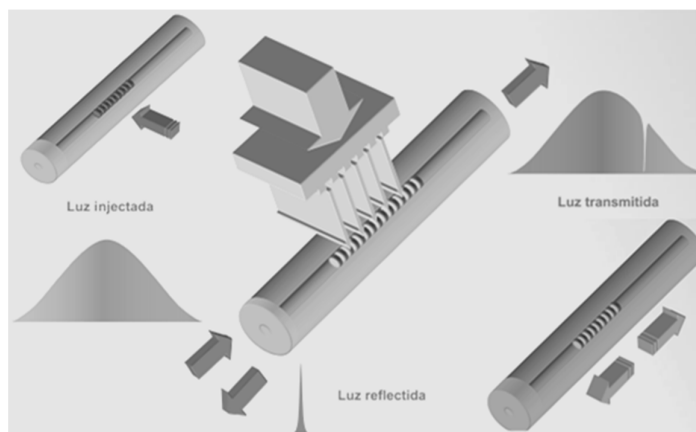


Figura 4. Comportamento de uma rede de Bragg

Tal como a maioria dos sensores de fibra óptica, os sensores de Bragg são intrinsecamente sensíveis à temperatura, às deformações axial e transversal, à pressão e, em situações particulares, ao campo magnético. Mas por intermédio destas sensibilidades, principalmente da deformação axial, os sensores de Bragg podem ser utilizados na medição de uma grande variedade de grandezas físicas. Nos últimos anos, foram propostas e demonstradas várias técnicas baseadas em redes de Bragg em fibra óptica para a medição simultânea de temperatura e deformação [4].

As redes de Bragg, enquanto sensores de fibra óptica exibem um conjunto de vantagens comuns a este tipo de sensores que as tornam particularmente adequadas para um grande número de aplicações da Engenharia Civil. As redes de Bragg possuem, no entanto, duas características adicionais que as tornam sensores notáveis e particularmente adequadas a este projeto: a capacidade de multiplexagem e a auto-referenciação. Ambas resultam do fato da grandeza medida atuar sobre o comprimento de onda ressonante da estrutura, o comprimento de onda de Bragg, que é um parâmetro absoluto. Isto quer dizer que a calibração inicial do sensor torna desnecessária toda e qualquer recalibração posterior, em claro contraste com o que acontece com o sensor equivalente de base elétrica, o “strain gauge”.

As medições podem, assim, ser sempre feitas tendo como referência a primeira medição (feita aquando da fabricação do sensor, ou da instalação do mesmo), não sendo afetadas se o instrumento de medição for, por exemplo, desligado. A codificação dos sinais de telemetria em comprimento de onda garante ainda aos sensores de Bragg uma capacidade intrínseca de multiplexagem, permitindo que inúmeros sensores possam ser integrados numa só fibra óptica e interrogados recorrendo a um único equipamento, tornando fácil o monitoramento distribuído de diferentes parâmetros.

## CASE STUDY – MONITORAMENTO DO TUNÉL DE MÊTRO DE SÃO PAULO

### Desafios

O empreendimento Torre Matarazzo apresenta-se como uma obra de Engenharia Civil extremamente desafiante. Ao realizar uma escavação de 7 subsolos ao longo de 29 metros num centro urbano extremamente denso, consignado por diversas infraestruturas e edifícios assume um risco extremamente elevado. A contenção projetada foi do tipo parede diafragma apresentando uma espessura de 50 centímetros.

Do ponto de vista geotécnico as características dos solos que constituem o maciço de maior interesse para o problema são:

- Argila Porosa – Perda de resistência mecânica com o aumento do nível de humidade (Propriedade Colapsível)
- Argila siltosa pouco arenosa – Insensível em relação à utilização de água; dificuldade de formação do bulbo, pois é pouco sensível em relação às injeções de calda de cimento.

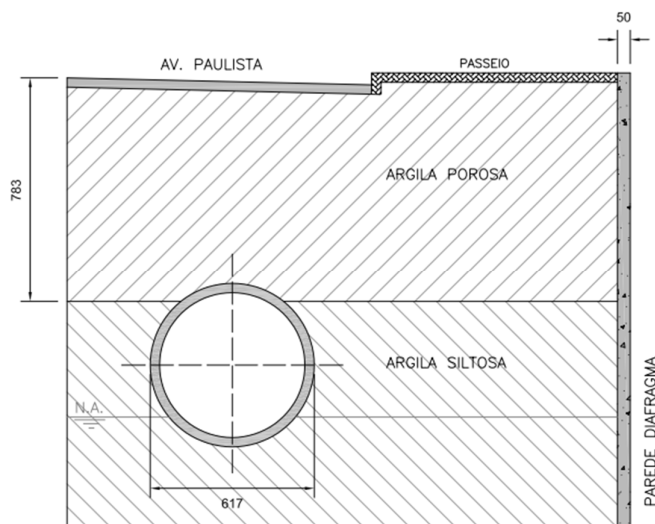


Figura 5. Estratigrafia do Solo

Na fronteira da contenção existe um túnel da linha verde da Companhia do Metropolitano de São Paulo (Metrô) susceptível de ser afetada pela escavação, perfuração e protensão dos tirantes da contenção. Qualquer interferência direta no túnel do Metrô apresentaria um enorme transtorno ao tráfego de passageiros que utilizam o metrô de São Paulo.

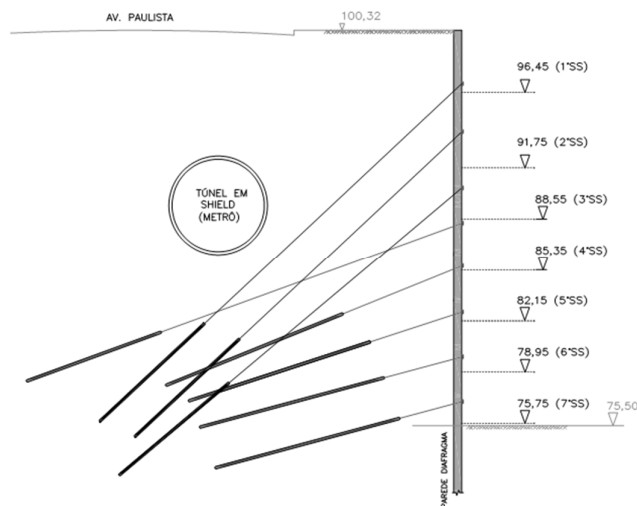


Figura 6. Detalhe Fronteira da Parede Diafragma

O monitoramento geotécnico e estrutural surge assim da necessidade absoluta de controlar e mesurar todos os detalhes inerentes à evolução da obra. As características únicas do projeto levaram ao desenvolvimento de uma solução certamente única no Brasil e com um pioneirismo mundial.

Convencionalmente para aferir os deslocamentos no túnel, utiliza-se como metodologia a instalação de pinos de convergência na seção de concreto ocorrendo a respectiva medição da convergência através de fita extensométrica. No entanto, a leitura destes pinos, realizada de modo convencional, restringe-se às horas em que não ocorre operação no interior do túnel.

No caso específico do Metropolitano de São Paulo, a operação ocorre continuamente durante 20 horas, existindo toda uma sequência de procedimentos de segurança, que reduz qualquer ação no interior do túnel para cerca de 2:30 horas diárias (01h30 às 04h00 horas).

Devido à defasagem entre as fases de perfuração e protensão dos tirantes (realizadas durante o dia), e as leituras convencionais de convergência realizadas no período noturno dentro túnel, não é possível realizar o monitoramento constante. Este fato impossibilitaria qualquer medida preventiva caso fosse constatado algum problema.

Para responder a este desafio foi necessário desenvolver um sistema que monitorasse continuamente a influência da obra, reportando automaticamente os níveis de deformação segundo níveis de risco e que permitisse um acesso *contínuo* a todos os dados em tempo quase real.

### **Solução**

A adoção de um sistema de monitoramento geotécnico recorrendo à tecnologia dos sensores de Bragg apresentou-se como a melhor opção técnica e econômica.

Como a rede de Bragg e todas as suas propriedades inerentes são afetadas pela variação da temperatura, foi integrada ao sistema a medição de temperatura diretamente em cada sensor de deformação, com o objetivo de corrigir este efeito. Assim o sistema de monitoramento remoto consiste na medição de dois parâmetros diretamente: deformação e a temperatura.

Os dados adquiridos apresentaram assim um nível bastante superior de detalhe em comparação com a metodologia convencional, permitindo obter dados extremamente úteis e raramente medidos *“in situ”*.

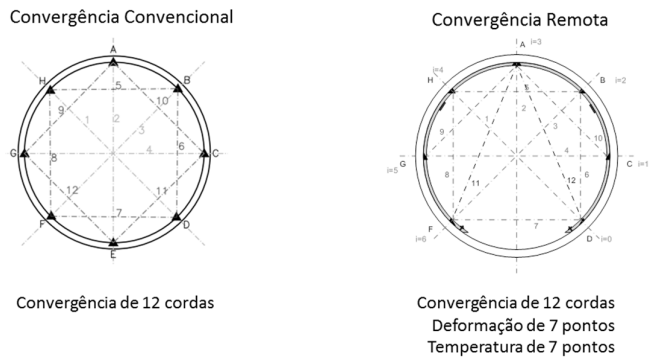


Figura 7. Comparativo entre Convergência Convencional e Remota

Como controle de qualidade foram testados todos os sensores após a instalação de um modo independente, bem como a interação dos sensores em cada seção, não se registrando qualquer dano ou ineficiência de sinal. Através da interligação das diversas seções instrumentadas a um equipamento de recepção e decodificação da rede de Bragg (Braggmeter) o sistema foi colocado em funcionamento. Complementarmente aos dados obtidos diretamente (Deformação e Temperatura) foi desenvolvido um algoritmo capaz de calcular diversos parâmetros, exemplificados na Tabela 1.

Grandezas medidas	Código	Unidades
Deformação	D	Microstrain ( $\mu\epsilon$ )
Temperatura	T	Graus Célsius ( $^{\circ}C$ )
Abcissa	X	Metros (m)
Ordenada	Y	Metros (m)
Convergência	C	Milímetros (mm)
Velocidade de deformação	VD	Microstrain/dia ( $\mu\epsilon/\text{dia}$ )
Aceleração de deformação	AD	Microstrain/dia <sup>2</sup> ( $\mu\epsilon/\text{dia}^2$ )
Velocidade de convergência	VC	Milímetros/dia (mm/dia)
Aceleração de convergência	AC	Milímetros/dia <sup>2</sup> (mm/dia <sup>2</sup> )

Tabela 1. Grandezas medidas

O sistema composto por sensores, caixas de conexão e datalogger foi configurado de modo a permitir leituras a cada 1 minuto em todos os sensores. São assim adquiridos 166 dados por minuto tendo o sistema sido dimensionado para uma utilização e aquisição permanente durante 14 anos (1.221.494.400 de dados).

A disponibilização do sistema em regime permanentemente acessível foi realizada através de uma ligação à Internet e respectivo alojamento em website, sendo realizado um backup permanente dos resultados obtidos.

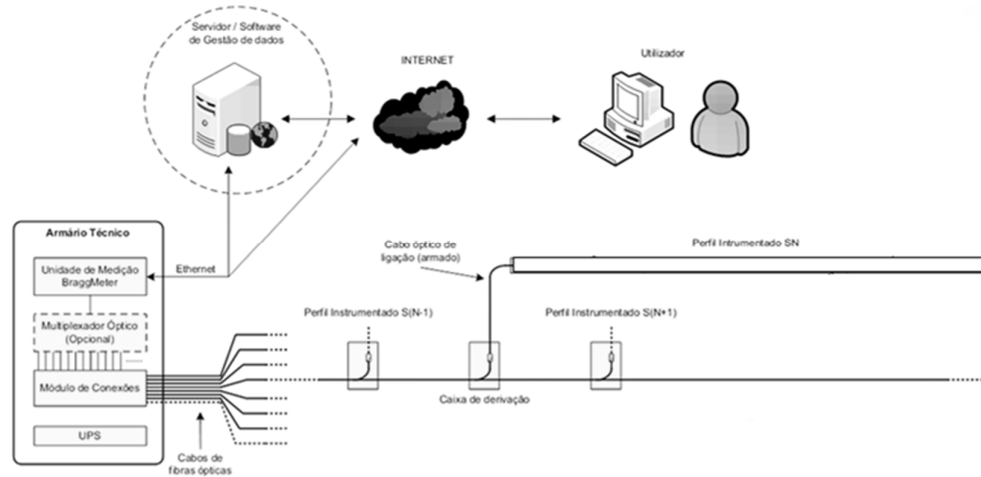
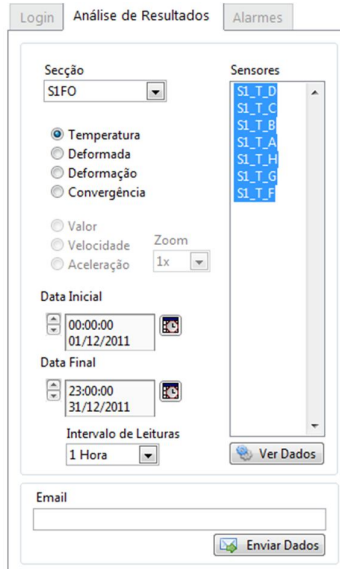


Figura 8 – Componentes do sistema.

## Resultados

A Interface utilizada permite a escolha de diversos parâmetros a serem disponibilizados bem como a escolha de intervalos de tempo e frequência de leituras, tal como demonstrado na figura 9. A obtenção e disponibilização de dados mostrou estabilidade. A coerência dos dados adquiridos mostrou-se satisfatória cumprindo com os valores esperados.



The screenshot shows a web-based interface with three tabs: "Login", "Análise de Resultados", and "Alarmes". The "Análise de Resultados" tab is active. It features a "Secção" dropdown menu set to "S1FO". Below this are four radio buttons for parameter selection: "Temperatura" (selected), "Deformada", "Deformação", and "Convergência". There are also radio buttons for "Valor", "Velocidade", and "Aceleração", with a "Zoom" dropdown set to "1x". The "Data Inicial" is set to "00:00:00" on "01/12/2011", and the "Data Final" is set to "23:00:00" on "31/12/2011". The "Intervalo de Leituras" is set to "1 Hora". A "Sensores" list on the right includes "SI\_T\_D", "SI\_T\_C", "SI\_T\_B", "SI\_T\_A", "SI\_T\_H", "SI\_T\_G", and "SI\_T\_F". A "Ver Dados" button is located below the list. At the bottom, there is an "Email" input field and an "Enviar Dados" button.

Figura 9. Interface utilizador.

A Figura 10 apresenta a variação da Temperatura ao longo do mês de Dezembro e Janeiro. Neste gráfico são disponibilizados os valores relativos a um sensor instalado no topo do túnel na secção 1.

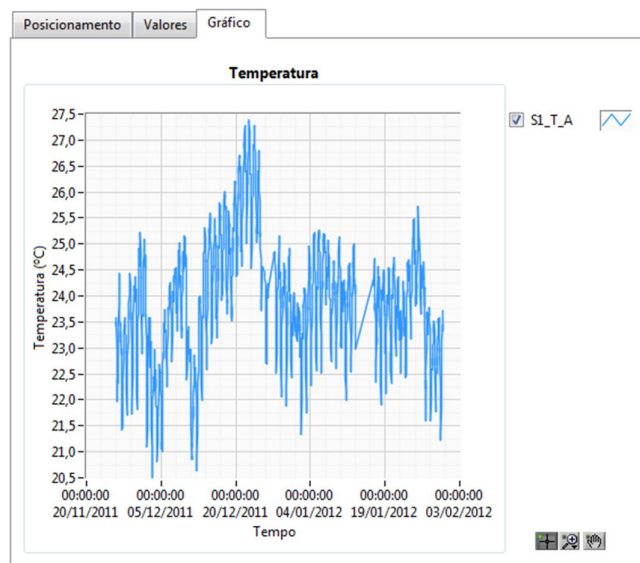


Figura 10. Variação da Temperatura.



A Variação da deformação ao longo do tempo é representada na Figura 11. Esta variação acompanha a tendência apresentada pela temperatura.

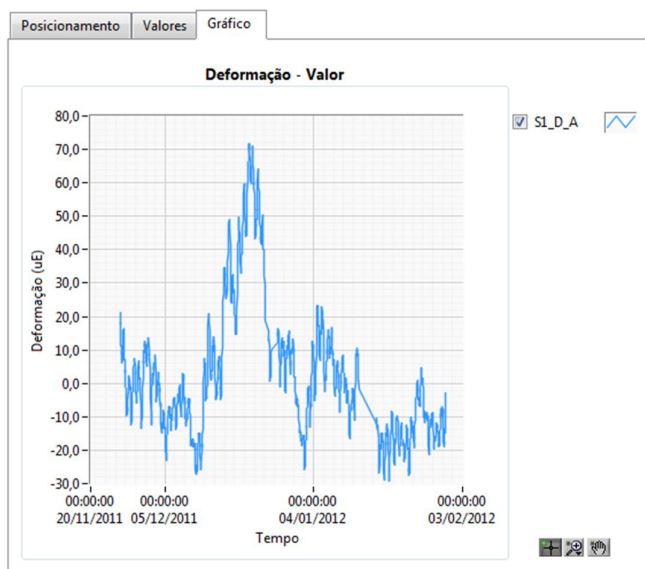


Figura 11. Variação da deformação.

A evolução da convergência nas 12 cordas da seção 1 é apresentada na figura 12. Os valores máximos atingidos neste intervalo de tempo rondaram a ordem dos 0,5 mm. As leituras obtidas obedecem ao padrão demonstrado pela temperatura.

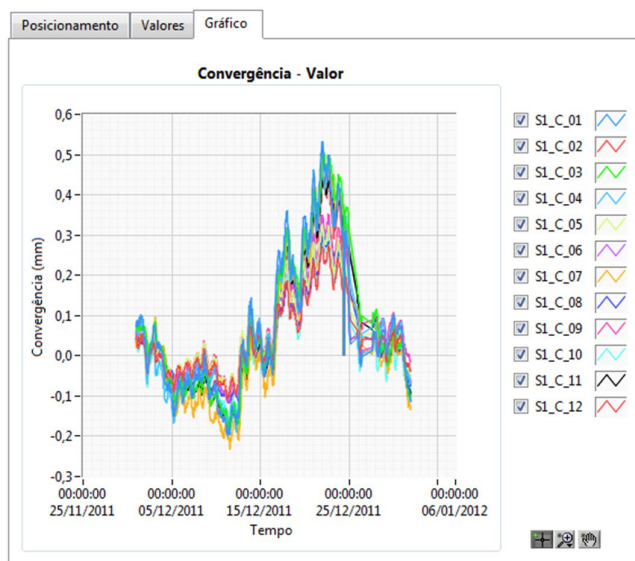


Figura 12. Variação da convergência.

## **CONCLUSÃO**

Com o crescimento dos grandes centros urbanos é cada vez mais importante o controle tecnológico das obras e a avaliação da interação da obra com as demais estruturas circundantes, sendo para tal necessário a instalação de instrumentos que permitam avaliar continuamente o desenvolvimento das obras e dos demais parâmetros de controle previstos em projeto. Neste sentido, foi apresentada uma nova tecnologia para o monitoramento geotécnico e estrutural de escavações profundas, baseado na utilização de fibra óptica (sensores Bragg).

A utilização de sensores de Bragg neste tipo de obra apresenta-se como uma alternativa pioneira que têm apresentado resultados confiáveis, atendendo aos requisitos do cliente, com um custo competitivo. As medições realizadas em tempo real permitem obter as variações de convergência durante a execução das escavações, perfurações e protensão dos tirantes a cada minuto, mesmo durante o período de operação do metrô, permitindo a tomada de decisões emergenciais caso seja necessário, garantindo assim a segurança do metrô e da obra.

As vantagens desta tecnologia em comparação com os sistemas elétricos são inúmeras, sendo de assinalar a menor perda de sinal devido ao comprimento dos cabos, sistema inerte às variações do campo eletromagnético, cabos de menor diâmetro, múltiplos sensores instalados no mesmo cabo, maior facilidade nas ligações, maior precisão entre outras.

Em comparação com as leituras convencionais a diversidade dos parâmetros obtidos, associado a uma continuidade do sistema e a reduzida susceptibilidade ao erro humano tornam esta opção muito vantajosa. A independência sobre a operação no interior do túnel apresenta-se como fundamental no caso da linha verde do Metropolitano de São Paulo.

A aplicação desta tecnologia não se limita somente ao monitoramento de túneis, podendo ser aplicado em diversos tipos de estruturas, como pontes, pilares, estruturas metálicas, cortinas atirantadas. A Tecnologia associada tem aumentado significativamente o nível de segurança nas obras de Engenharia Civil onde é aplicada, diminuindo assim o risco associado a cada projeto.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

[1] - Ferreira L.M., Araújo F. M., Maia A. A. - *Redes de Bragg em Fibra Óptica – Contribuições para o Desenvolvimento de uma Tecnologia Revolucionária em Monitorização Estrutural*, Encontro Nacional Betão Estrutural, FEUP, Universidade do Porto, 2004.

[2] - López-Higuera J. M., *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology*, John Wiley & Sons, Chichester, 2002.

[3] - Araújo F. M., *Redes de Bragg em Fibra Óptica*, Tese de Doutoramento, FCUP, Universidade do Porto, Porto, 2000.

[4] – Ferreira L. A., *Interrogação de Sensores de Bragg em Fibra Óptica*, Tese de Doutoramento, FCUP, Universidade do Porto, Porto, 2000.