APLICAÇÃO DE UM SISTEMA DE SUPORTE À DECISÃO EM PLATAFORMA WEB PARA ACOMPANHAMENTO TÉCNICO DE UMA ESCAVAÇÃO SUBTERRÂNEA

A decision support system on web platform for technical monitoring of underground excavation

Talita Caroline Miranda*
Claudio Fernando Mahler**
Anna Laura Lopes da Silva Nunes***

RESUMO – O Acompanhamento Técnico de Obra (ATO) especialmente na construção de túnel em NATM é fundamental para a garantia de qualidade, segurança e prazo/custo. Além de muita experiência, o profissional responsável pelo ATO deve relacionar, interpretar e disponibilizar as informações da instrumentação e do cotidiano para os envolvidos na obra. Este trabalho descreve a implementação e a aplicação de uma ferramenta online de suporte à tomada de decisão, desenvolvida para auxiliar o trabalho do ATO na execução do Túnel Dois Leões, na cidade de Salvador, Brasil. Além disto, o trabalho também apresenta o uso de geoestatística para a análise da variação espacial dos dados de instrumentação da obra.

SYNOPSIS – In NATM tunnel construction, the Technical Assistance Team (TAT) is fundamental for ensuring quality, safety, time and cost of excavation execution. It is necessary that the TAT has much experience in excavation operations to collect, interpret and provide instrumentation and project development information for all involved in the construction. This paper describes the implementation and application of an online tool to support decision making, developed to assist the work of the TAT in excavating the Two Lions tunnel in Salvador, Brazil. Furthermore, the paper presents the use of geostatistics applied to the spatial variation analysis of the instrumentation data.

PALAVRAS CHAVE – Túneis, geoprocessamento, acompanhamento técnico, segurança.

1 – INTRODUÇÃO

As incertezas geológicas exigem constantes adaptações e alterações no projeto ou anteprojeto de uma obra subterrânea. O Acompanhamento Técnico da Obra (ATO) é decisivo para garantir a qualidade, a segurança, o prazo de execução e, consequentemente, o custo. A fim de se determinar soluções técnicas apropriadas de execução da escavação, o ATO deve reunir todos os envolvidos na obra tais como projetista, consultores, empreiteira e o proprietário, de forma a oferecer respostas às solicitações impostas pelos condicionantes geológico/geotécnicos do maciço no entorno da escavação subterrânea.

* Engenheira Civil, Bolsista de doutorado na Universidade Federal do Rio de Janeiro.
E-mail: talitamiranda@coc.ufrj.br
** Engenheiro Civil, D.Sc, Professor Associado IV, COPPE-Universidade Federal do Rio de Janeiro.
E-mail: mahler@coc.ufrj.br
*** Engenheira Civil, PhD, Professora, COPPE- Universidade Federal do Rio de Janeiro.
E-mail: alaura@coc.ufrj.br

O responsável geotécnico integrante do ATO deve participar do estabelecimento dos critérios para o desenvolvimento da obra, impondo as metodologias que garantam a sua correta execução, com as necessárias condições de segurança e de menor custo (Moreno Tallón, 1996).

As principais metodologias utilizadas para o acompanhamento técnico, conforme Kochen (2009), são: *(i)* análise prévia do projeto e das soluções propostas indicando possíveis alternativas e melhorias às soluções do projeto; *(ii)* estabelecimento dos planos gerais de acompanhamento e instrumentação e seus ajustes no decorrer da execução da obra; *(iii)* análise e interpretação dos dados obtidos durante a construção, avaliando o comportamento geotécnico da escavação e decidindo sobre a aplicação de alternativas para a adaptação do projeto às condições reais de execução; *(iv)* definição dos processos construtivos mais adequados para a escavação, suporte e tratamento dos terrenos, garantindo a estabilidade a curto e longo prazo; e, por fim, *(v)* análise e interpretação dos dados relativos ao controle de qualidade dos elementos de revestimento e métodos de execução.

Desta forma, o responsável pelo ATO em uma obra, é um profissional de importância vital para o adequado e eficiente andamento da escavação. A quantidade de variáveis (geológicas, logísticas, custo, segurança, entre outras), informações da instrumentação, modificação de projeto, requerem experiência e agilidade na interpretação e na tomada de decisão, já que na maioria das vezes o ritmo de construção é acelerado (Murakami, 2001).

Em caso de obras de túneis urbanos que envolvem várias frentes construtivas com centenas de instrumentos lidos diariamente e intervalos de respostas cada vez menores, Giannotti (2003) e Domingos *et al*. (1987) destacam a necessidade de criação e/ou uso de sistemas que permitam o gerenciamento das informações. Este gerenciamento incluiria as análises e interpretações imediatas dos dados coletados, permitindo uma avaliação mais dinâmica e rápida para a tomada das decisões.

Neste sentido, o desenvolvimento computacional de ferramentas para aglutinação das informações, além de ser de suma importância, traz agilidade e melhor interpretação dos resultados, influenciando diretamente no controle e na tomada de decisão, especialmente em eventos críticos na obra. Esta aglutinação e a apresentação gráfica destas informações atualmente são feitas através de plataformas que integram Sistemas de Base de Dados e Sistemas de Informação Geográfica. Além disto, associados a estas ferramentas computacionais, são acopladas metodologias de análise espacial de dados.

Este artigo apresenta uma ferramenta computacional baseada em plataforma *web*, desenvolvida para a disponibilização clara e rápida das informações da obra para os responsáveis, auxiliando diretamente na tomada de decisão. Apresenta também a aplicação da ferramenta desenvolvida para o controle e monitoramento da execução da escavação de um túnel na Cidade de Salvador, Bahia.

2 – SISTEMA DE ACOMPANHAMENTO TÉCNICO *ONLINE* DE SUPORTE À DECISÃO

O Sistema de Acompanhamento Técnico *Online* de Suporte à Decisão, intitulado GVX, foi desenvolvido e aplicado durante a execução de um túnel rodoviário na Cidade de Salvador, Bahia. Esse sistema nasceu da necessidade de aprimorar o ATO desta obra, em função das peculiaridades envolvidas na construção do túnel rodoviário curto, raso e em região densamente povoada.

A ideia inicial era disponibilizar os dados de forma a garantir o acesso às informações da obra ao maior número de pessoas envolvidas na execução (projetistas, consultores, fiscalização, construtor, proprietário da obra), além de servir como ferramenta de suporte à tomada de decisão. Estas informações poderiam ser disponibilizadas de duas maneiras: *software* ou *online* por meio de uma página da internet. Optou-se por uma plataforma *web* com o intuito de facilitar o uso da ferramenta, evitando os transtornos de instalação de *software* e a compatibilização de sistemas operacionais, associadas à aprendizagem e treinamento de profissionais para operação do novo *software*.

No decorrer da obra, o sistema de plataforma web sofreu diversos aprimoramentos em virtude de muitos fatores, destacando-se a variedade dos dados de instrumentação, os condicionantes geológicos enfrentados durante o processo de escavação do túnel e o reduzido tempo de execução da obra.

Dentre os aprimoramentos implementados, alguns podem ser considerados inovadores tais como a introdução de modelos geoestatísticos para a interpretação dos dados de instrumentação juntamente com as informações do processo construtivo e informação geológica-geotécnica. Este recurso representa um grande avanço quando comparado aos sistemas similares de acompanhamento técnico, tal como o sistema SACI (Sistema de Acompanhamento de Controle de Instrumentação), desenvolvido pela Companhia do Metropolitano de São Paulo.

A metodologia aplicada para o desenvolvimento do sistema compreendeu a construção de três módulos independentes na plataforma *web*. O primeiro módulo destina-se à coleta dos diferentes dados da obra, o segundo corresponde ao tratamento e análise das informações coletadas e, por fim, o processamento e visualização dos dados inseridos.

A Fig. 1 sintetiza as informações coletadas durante a construção do túnel. Essas informações são divididas em três categorias distintas: instrumentação geotécnica, informações geológicas e informações do cotidiano da obra.

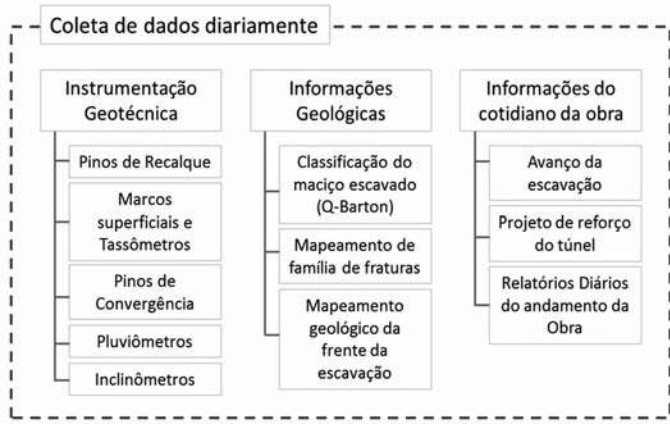


Fig. 1 – Conjunto de dados geotécnicos, geológicos e executivos coletados na obra.

A Fig. 2 apresenta as análises realizadas com as informações coletadas diariamente na obra. Os profissionais técnicos envolvidos eram alertados imediatamente pelo ATO atuante *in loco* na obra no caso de desconformidade dos dados, especialmente variações bruscas na tendência de comportamento indicada pela instrumentação (tanto ao longo do tempo quanto pela análise espacial por geoestatística), valores de instrumentação acima dos níveis de alerta da obra, ou avaliações geológicas que indicassem movimentações do maciço.

Após o tratamento dos dados, todas as informações eram integradas em um servidor *web* de dados espaciais com uma base de dados associada, ou seja, um Sistema de Informação Geográfica *online* (WebGIS). Em seguida ao processamento, as informações eram disponibilizadas e atualizadas diariamente no sistema *web* (Fig. 3). Destaca-se também a implementação de um "sistema de alerta simples", associado a esta plataforma. A informação coletada na obra é processada pelo sistema, que compara o valor medido aos estabelecidos pelas premissas de projeto, emitindo um sinal de "alerta" para os responsáveis pela obra via e-mail. Os níveis de alerta são identificados por sistema de cores onde:

(i) verde significa que o comportamento registrado pelo instrumento se situa na faixa de variação esperada;

(ii) amarelo correspondente ao estágio de "atenção", quando a primeira faixa de variação de leitura do instrumento é ultrapassada e, portanto, neste momento deve-se tomar alguma decisão em conjunto com os responsáveis da obra em relação à alteração do plano de avanço de escavação e ao plano de execução do reforço do túnel;

(iii) vermelho que representa o estágio crítico, indicando que o nível máximo de movimentação do instrumento foi ultrapassado e uma medida mitigadora deve ser tomada para garantir a segurança, especialmente no que diz respeito ao colapso da estrutura e do maciço.

Fig. 2 – Tratamento e análises dos dados monitorados durante a execução da obra.

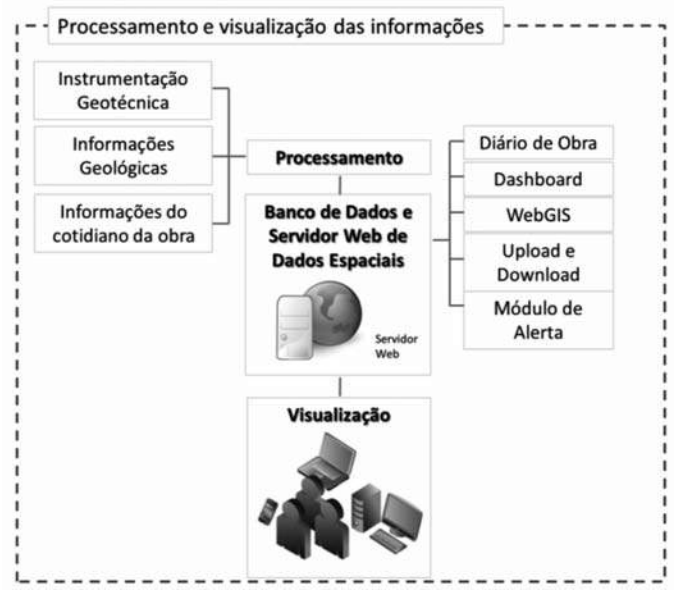


Fig. 3 – Processamento e visualização dos dados monitorados na obra.

Considerando esta metodologia, foram desenvolvidas as aplicações para o sistema na plataforma Web, divididas em seis grupos de funções: (i) Página principal; (ii) Diário de obra; (iii) Dashboard; (iv) WebGIS; (v) Gerenciador de arquivo; e (vi) Instrumentos.

2.1 – Página principal

Na página principal foi desenvolvido um acesso restrito aos responsáveis pela obra, através de *login* e senha, que garante o sigilo dos dados e contratos das obras. Além disto, as informações de acesso, representadas por responsável, data e hora, eram armazenadas e processadas. Em caso de variações súbitas ou quaisquer alterações de valores da instrumentação, verificadas pelos níveis de alerta ou por solicitação do ATO, o sistema emite mensagens (e-mails) de advertência para que o responsável acesse a nova informação.

Esta função fornece diariamente a visualização das imagens do andamento da obra, informações climatológicas e a indicação de alerta em função da análise dos dados da instrumentação, vistorias e acompanhamento técnico (Fig. 4). Também são apresentadas informações sobre a velocidade de avanço da escavação, mudanças de projeto, avaliação e surgimento de "surpresas geológicas", conforme o mapeamento de frente da escavação e, mudanças na escavação e sistema de suporte do túnel.

Fig. 4 – Página inicial do sistema na plataforma Web.

2.2 – Diário de obra

Permite o acompanhamento e o relato das atividades executadas *in loco* e controle da evolução do projeto, elaborado pelo ATO. Também permite ao usuário a inserção de comentários sobre o relato e de arquivos de imagem e vídeos (Fig. 5).

Fig. 5 – Exemplo de um dos Relatórios Técnicos da obra do Túnel Dois Leões.

2.3 – Dashboard

É o painel de integração dos dados para análise gráfica dinâmica de um ou mais instrumentos, e a consulta aos dados em forma de tabela, por um único ou por um grupo de leituras de instrumentos (Fig. 6).

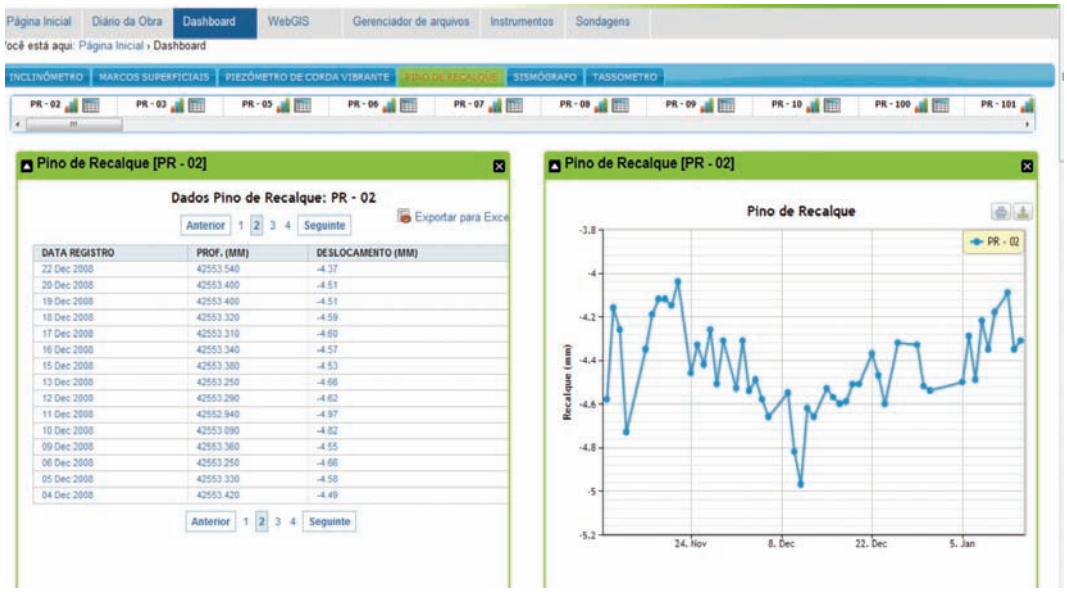


Fig. 6 – Exemplo de visualização dos dados do Pino de Recalque PR-02.

2.4 – WebGIS

Esta aplicação apresenta o Sistema de Informação Geográfica *Online* (Fig. 7), contendo: mapas dinâmicos em planta da configuração da obra (estaqueamento, topografia, avanço da escavação, etc.) e mapas do entorno da obra (ruas, edificações e estado de conservação das mesmas); distribuição espacial de ícones com a instrumentação geotécnica (associado a *links* para acesso ao *Dashboard* e Módulo de Alerta); e mapas de análise espacial dos dados da instrumentação (geoestatística e zonas de região sísmica).

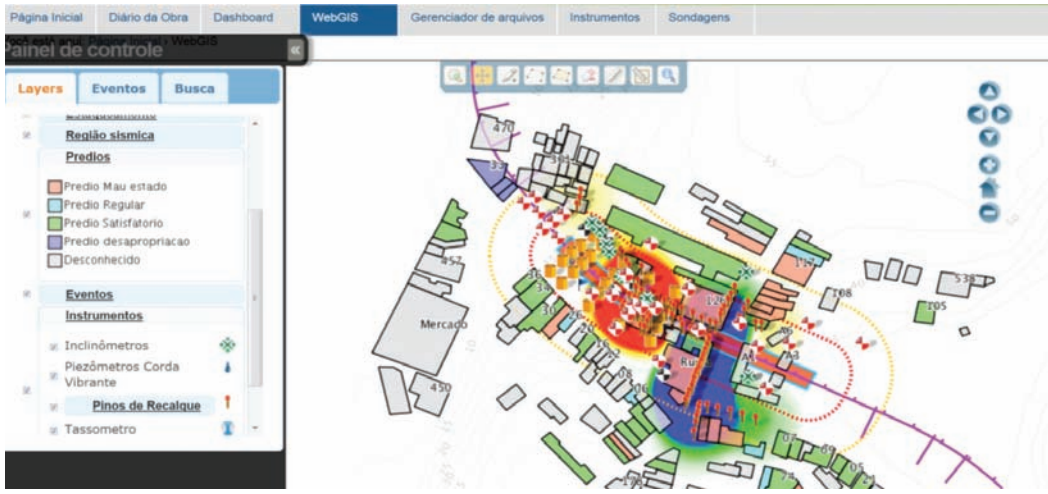


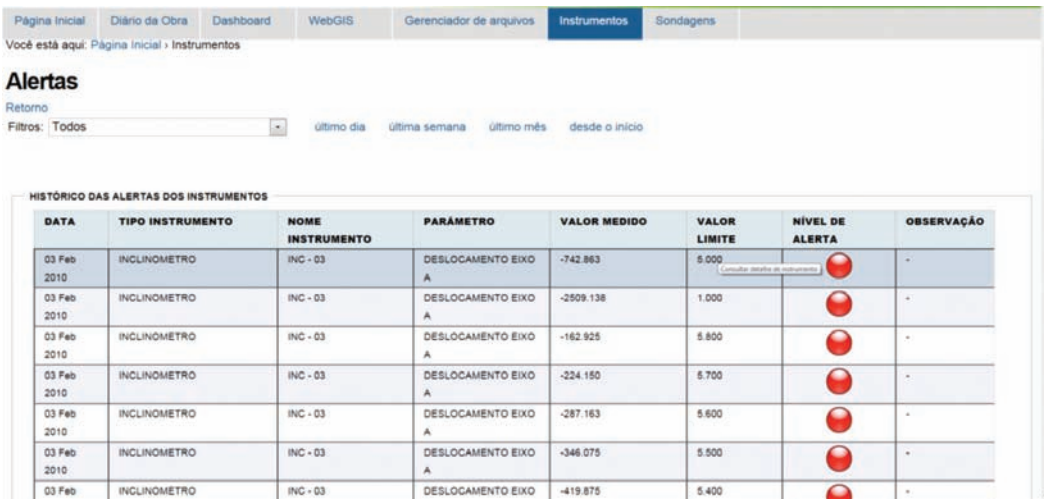
Fig. 7 – WebGIS do Túnel Dois Leões em Salvador - Brasil.

2.5 – Gerenciador de arquivo

Permite o ingresso ou descarregamento de todos os tipos de arquivos e imagens associadas ao projeto ou ao cotidiano da obra, dados de instrumentação, gerenciamento e configuração por instrumento.

2.6 – Instrumentos

O módulo de alerta do acompanhamento da obra permite a configuração de valores de níveis de alerta para cada tipo de instrumento e a localização do mesmo. Executa a verificação dos valores e a classificação de alerta das leituras diárias (Fig. 8).



DATA	TIPO INSTRUMENTO	NOME INSTRUMENTO	PARÂMETRO	VALOR MEDIDO	VALOR LIMITE	NÍVEL DE ALERTA	OBSERVAÇÃO
03 Feb 2010	INCLINOMETRO	INC - 03	DESLOCAMENTO EIXO A	-742.863	5.000		-
03 Feb 2010	INCLINOMETRO	INC - 03	DESLOCAMENTO EIXO A	-2509.138	1.000		-
03 Feb 2010	INCLINOMETRO	INC - 03	DESLOCAMENTO EIXO A	-162.925	5.800		-
03 Feb 2010	INCLINOMETRO	INC - 03	DESLOCAMENTO EIXO A	-224.150	5.700		-
03 Feb 2010	INCLINOMETRO	INC - 03	DESLOCAMENTO EIXO A	-287.163	5.600		-
03 Feb 2010	INCLINOMETRO	INC - 03	DESLOCAMENTO EIXO A	-346.075	5.500		-
03 Feb	INCLINOMETRO	INC - 03	DESLOCAMENTO EIXO	-419.875	5.400		-

Fig. 8 – Alertas emitidos quando a informação de um instrumento passa de um limite estabelecido.

3 – ESTUDO DE CASO: ACOMPANHAMENTO TÉCNICO DE UMA ESCAVAÇÃO SUBTERRÂNEA

3.1 – Túnel Dois Leões

O Túnel Dois Leões está localizado na cidade de Salvador/Bahia em uma região do centro histórico densamente povoada. A maior parte dos imóveis encontra-se em péssimo estado de conservação e com sérios problemas estruturais. Além disto, o túnel atravessa a "Falha de Salvador", correspondente à principal falha geológica da cidade de Salvador, de características muito complexas. Além do mais a geometria do túnel atravessa áreas de rocha muito fraturada, rocha branda e saprolito com baixa capacidade de suporte.

Esta obra é a primeira etapa de um projeto abrangente, chamado de Via Expressa de Acesso ao Porto de Salvador, que interligará o Porto de Salvador à rodovia BR 324, principal estrada para acesso à cidade. Esta obra compreende a construção de um túnel em NATM, interligando duas partes distintas da cidade, conhecidas por Cidades Alta e Baixa.

A principal dificuldade no desenvolvimento da obra é a garantia de estabilidade e da menor movimentação possível do maciço escavado, devido às características peculiares da região, tanto geológicas quanto geográficas.

O túnel possui 153 metros de extensão; 10,7 metros de largura média; 7,7 metros de altura e 6,50 metros de raio de curvatura. Ressalta-se que esta obra se iniciou em 2003 e foi paralisada em 2007 após a escavação de 100 metros da abóbada do túnel. A construção foi retomada em dezembro de 2008 com as escavações iniciadas em fevereiro e concluídas em julho de 2009. Este artigo apresenta o acompanhamento técnico durante o período de retoma da obra. Ressalta-se ainda que, concomitantemente com a escavação do túnel, foi construída uma cortina ancorada na saída do

emboque próximo ao acesso para a Cidade Baixa, que também foi monitorada pelo sistema de acompanhamento desenvolvido neste trabalho.

3.2 – Instrumentação

A instrumentação empregada na obra está dividida em três grupos principais:

(i) Instrumentação interna ou de profundidade, para a verificação do desempenho construtivo e sua relação com as hipóteses de projeto e dimensionamento dos revestimentos. Os elementos de instrumentação correspondem aos pinos para medidas de convergência/divergência e nivelamento interno;

(ii) Instrumentação externa para avaliação dos deslocamentos verticais e medidas de poropressão. Os elementos utilizados para medição foram os marcos de recalque profundo (tassômetros) e marcos superficiais para avaliação dos deslocamentos verticais, pinos de recalques para avaliação dos recalques diferenciais nas estruturas das edificações próximas à obra e piezômetros para avaliação da poropressão devida à construção ou aos sistemas de rebaixamento sobre os níveis freáticos;

(iii) Instrumentação externa voltada para avaliação dos deslocamentos horizontais em profundidade na região do emboque/desemboque e escavação de cortina ancorada. Os instrumentos utilizados para este tipo de leitura foram os inclinômetros.

A leitura da instrumentação era diária, com o envio de boletins parciais à medida que cada um dos instrumentos era lido. Após a finalização das leituras era fornecido um boletim completo das leituras realizadas no dia. O ATO avaliava, inseria e disponibilizava estas informações no sistema de acompanhamento técnico *online*.

A frequência de leitura de cada elemento era relacionada aos fatores externos tais como, posicionamento da frente de escavação, comportamento do maciço escavado, ocorrência de indícios visuais (trincas em paredes ou estruturas, aclive em piso, entre outros), variação acentuada de leitura de algum elemento, ações especiais da equipe de produção, reclamação/solicitação dos moradores ou qualquer outro tipo de situação anormal em relação ao comportamento previsto em projeto ou pelo ATO.

Desta forma, a definição da periodicidade e frequência de leitura foi definida em comum acordo entre a equipe de instrumentação, o ATO, a empreiteira e o projetista. Em alguns momentos críticos, determinados elementos instrumentados foram lidos até três vezes ao dia, fornecendo subsídio para a interpretação da evolução das movimentações do maciço e para a tomada de decisão.

3.3 – Acompanhamento técnico da obra

Além das funções habituais de um ATO, descritas na literatura e vivenciadas na prática (Moreno Tallón, 1996; Kochen, 2009; Murakami, 2001; Cândido, 2010; Ribeiro Neto, 1999), devido à complexidade geológica, geográfica e social da obra, foram desenvolvidas ferramentas computacionais via web, para auxiliar o acompanhamento técnico, descrito anteriormente. Durante a execução desta obra o sistema foi criado, aprimorado e testado em relação à sua aplicabilidade.

Além disto, técnicas de geoestatística foram aplicadas para auxiliar o ATO na interpretação das informações da instrumentação e a relação entre as leituras dos diversos instrumentos. Isto resultou em uma ferramenta eficiente para avaliar a variabilidade espacial do dado e, desta forma, fornecer subsídios para uma tomada de decisão.

3.3.1 – Aplicação do sistema de suporte à decisão

O Sistema de Acompanhamento Técnico *Online* de Suporte à Decisão aplicado ao Túnel Dois Leões foi um sistema adicional ao trabalho do ATO. Comparando com o ATO habitual e os *softwares* existentes para a interpretação dos dados de instrumentação, as seguintes vantagens foram observadas:

- Acesso restrito e seguro somente para os responsáveis pela obra (projetistas, consultores, fiscalização, construtor e proprietário da obra);
- Ferramenta amigável e versátil, em função de ser uma página online, com links intuitivos às informações, não exigir a instalação de software e não necessitar de cursos técnicos para o uso;
- A associação de um WebGIS a uma base de dados permite organizar e acessar todas as informações da instrumentação da obra de forma eficiente e rápida. Além da inserção da planta de localização da obra *(as built)* e da instrumentação, o WebGIS possibilita visualizar as análises geoestatísticas dos dados da instrumentação;
- O Relatório Diário de Obra online permite o compartilhamento das informações e comentários diários sobre o andamento da obra entre todos os responsáveis, além da descrição das análises da leitura dos instrumentos, observações das vistorias, do plano de escavação e do andamento da obra feitos pelo ATO;
- O acesso ao banco de dados e a combinação gráfica de vários instrumentos, conforme a necessidade do usuário, foi um grande diferencial possibilitando análises mais específicas e comparativas das leituras da instrumentação;
- A aglutinação de todas as informações em um só lugar, tanto do cotidiano da obra quanto da instrumentação e sua avaliação, foi de suma importância para tomadas de decisão, intervindo diretamente na logística, na velocidade de avanço da escavação do túnel e na execução do reforço.

Algumas desvantagens também foram identificadas tais como: os dados de convergência não foram disponibilizados para o usuário no WebGIS em planta e em seção, pois a inserção da leitura era manual e não havia ferramenta para análise geoestatística no próprio WebGIS. Outra desvantagem importante foi a ausência de parâmetros de alerta para alguns instrumentos pelos responsáveis da obra. Portanto, não foi possível aplicar este recurso para emissão de alertas, tampouco verificar se as condições reais de movimentação do maciço e de capacidade de suporte do reforço se encontravam na faixa de valores previstos em projeto.

3.3.2 – Análise geoestatística

A geoestatística tem tido aplicação crescente na geotecnia tanto no Brasil quanto no exterior. A maioria dos trabalhos avalia a variação espacial de parâmetros de resistência do solo (Schuler *et al.*, 2007; Miqueletto e Dyminski, 2004; Dyminski *et al*., 2002; Carvalho e Cavalheiro, 2000; Xavier, 1999; Sturaro, 1994; Mackean e Rosenbaum, 1990). Na engenharia de túneis, Veldkamp *et al*. (2001) mostram a aplicação das técnicas de geoestatística, krigagem e simulação estocástica, em informações de banco de dados de ensaios CPT do túnel de *Heinenoord* na Holanda. Os autores obtêm um modelo de malha tridimensional de resistências, indicando as zonas de elevada e baixa resistência atravessadas pelo túnel. Com isto, nota-se que a geoestatística tem sido aplicada na geotecnia habitualmente para avaliar e caracterizar um determinado parâmetro de resistência e sua variação espacial.

Esta pesquisa propõe o uso de técnicas de análise espacial do dado para auxiliar o ATO na interpretação do dado da instrumentação. O objetivo deste tipo de análise é verificar, para uma mesma data de leitura, o comportamento de vários instrumentos de mesmo tipo (por exemplo, pinos de recalque em edificações) e avaliar a variação espacial do dado em função do avanço da escavação. Dentre os diversos métodos de avaliação da variação espacial do dado, optou-se por utilizar a metodologia de krigagem ordinária, uma vez que representa o método que permite estimar o valor desconhecido associado a um ponto, área ou volume, a partir de um conjunto de n dados disponíveis.

Para a análise geoestatística foi utilizado a função do ArcGIS: Geostatistical Analyst & Geostatistical Wizard, com geração e calibração do semi-variograma, determinação dos dados "vizinhos" e por fim a análise da validade do modelo adotado através dos gráficos do modelo de previsão, erro associado a este modelo, erro normalizado e do gráfico Normal QQPlot, o qual plota o valor do dado real e do erro normalizado.

Neste trabalho, a krigagem ordinária foi aplicada para diferentes dados de instrumentação externa da obra: *(i)* Pinos de Recalque com o intuito de avaliar a variação à movimentação diferencial das edificações e *(ii)* Marcos e Tassômetros com o intuito de avaliar o adensamento do maciço. Para esta análise, foi utilizado o *software* ArcGIS 8.0 para a geração do mapa de isovalores dos dados de recalque, que em seguida era inserido no WebGIS.

Esta metodologia foi aplicada diariamente, com a chegada da informação da instrumentação. Tendo em vista o grande volume de dados analisados, este trabalho apresenta somente os resultados em algumas datas específicas, conforme indicadas no Quadro 1. Estas datas foram escolhidas em função do histórico de movimentação do maciço.

Quadro 1 – Datas específicas para apresentação da análise geoestatistica.

Datas	**Evento Ocorrido na Obra**
17/2/2009	Início do Acompanhamento Técnico da Obra
03/03/2009	Execução das linhas de enfilagens no Emboque Rainha
31/03/2009	Início da escavação do Emboque Porto
19/05/2009	Proximidade do encontro das duas frentes de escavação, grande movimentação da instrumentação de recalque (Marcos e Tassômetros e Pinos de Recalque)
02/06/2009	Abertura total do túnel e reforço
08/07/2009	Término da execução do rebaixo e última leitura da instrumentação

3.3.2.1 – Análises geoestatísticas dos marcos e tassômetros das seções de instrumentação externas

Alguns resultados das análises geoestatísticas em datas específicas da obra, considerando os dados das Seções Externas de Instrumentação, são apresentadas no Quadro 2. Comparando as Figuras 9 e 10, observa-se a evolução do assentamento do maciço e o valor do recalque máximo atingido em relação à localização das seções de instrumentação.

Quadro 2 – Resumo dos resultados da análise geoestatística dos marcos e tassômetros - Seções Externas.

Datas	Faixa de valores máximos de recalque (mm)	Área crítica
17/2/2009	10,62 - 12,00	Seção SE-07 entre os MS-03 e MS-04, incluindo o TS-01
03/03/2009	11,00 - 12,40	Seção SE-07 entre os MS-03 e MS-05, incluindo o TS-01
31/03/2009	19,10 - 21,40	Seção SE-07 entre os MS-03 e MS-06, incluindo o TS-01
19/05/2009	27,66 - 30,90	Seção SE-08 entre os MS-03 e MS-04, incluindo o TS-01
02/06/2009	45,50 - 50,70	Seção SE-08 entre os MS-03 e MS-04, incluindo o TS-01
08/07/2009	48,76 - 54,30	Seção SE-08 entre os MS-03 e MS-05, incluindo o TS-01

Considerando os resultados obtidos nas análises geoestatísticas dos marcos e tassômetros das seções externas com as informações coletadas durante o acompanhamento técnico da obra, observa-se que:

- A região mais crítica de escavação já era esperada no trecho do túnel onde estão localizadas as seções SE-07 e SE-08. Isto se deve ao fato do maciço de cobertura apresentar, no máximo, 12 metros e ainda se situar na região da falha geológica de Salvador, com materiais de baixa capacidade de suporte (saprolito e rocha alterada mole). A cada avanço da escavação, comparava-se a evolução da distribuição espacial dos recalques. Os resultados indicaram que as seções SE-07 e SE-08 sofreram os maiores recalques durante a execução da escavação da calota e do rebaixo. O estudo geoestatístico dos dados indicou ao ATO a localização e os tipos de instrumentos nos quais as leituras deviam ser obtidas com maior frequência e, principalmente, identificou a região crítica que deveria receber maior atenção durante a visita técnica diária;

- Entre os dias 19/05/2009 e 22/06/2009, os instrumentos da seção SE-08 apresentaram a maior variação dos recalques, atingindo aproximadamente 51mm. Durante este período, a escavação foi executada muito rapidamente e os reforços previstos em projeto não foram instalados conforme as recomendações. A análise geoestatística foi fundamental para o ATO justificar os riscos impostos pela escavação. Por duas vezes, a escavação foi interrompida para a execução dos reforços faltantes e a estabilização das leituras da instrumentação. Além disto, o projeto foi revisto e ajustado com menor espaçamento entre as cambotas e maior rigidez do concreto;

- A análise do dia 08/07/2009 com os últimos dados coletados da instrumentação, após o término da escavação do túnel e execução de todos os reforços estruturais, indicou que o maciço atingiu o valor máximo de recalque, de aproximadamente 55mm, no marco superficial MS-04 da seção SE-08. Este valor é muito elevado quando comparado com o estabelecido em projeto, de apenas 1mm. A análise geoestatística também permitiu identifi - car que os instrumentos que mais recalcaram (MS-03, MS-04 e TS-01 da SE-08) estavam exatamente no eixo do túnel e próximos a sua abóbada, indicando uma área específica de plastificação do maciço.

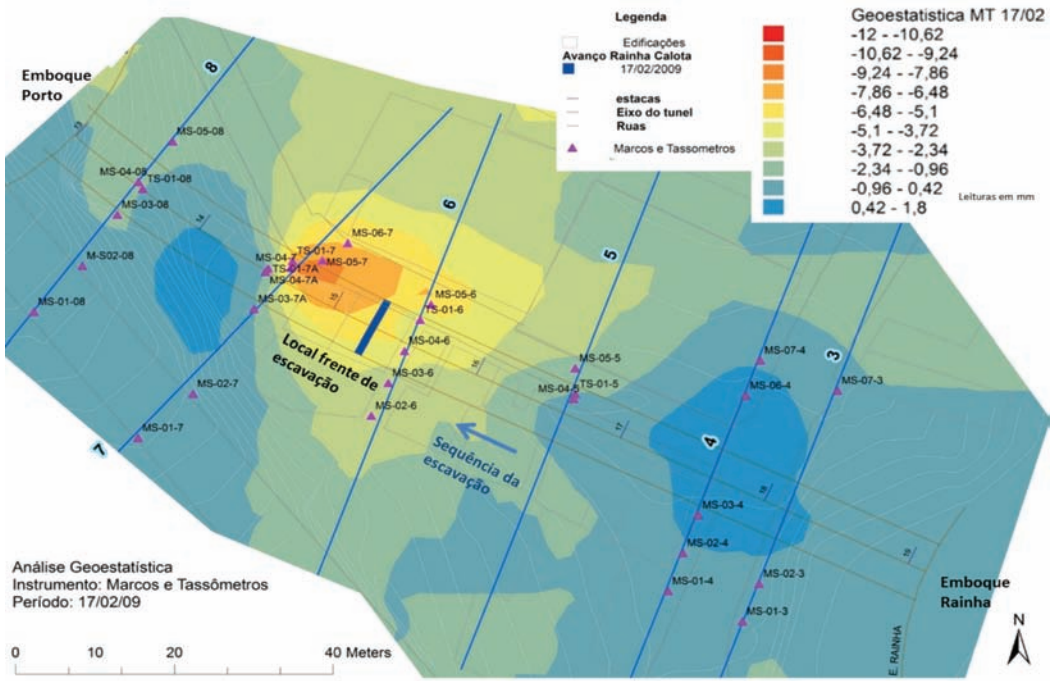


Fig. 9 – Análise geoestatística dos recalques medidos por marcos e tassômetros - 17/02/2009.

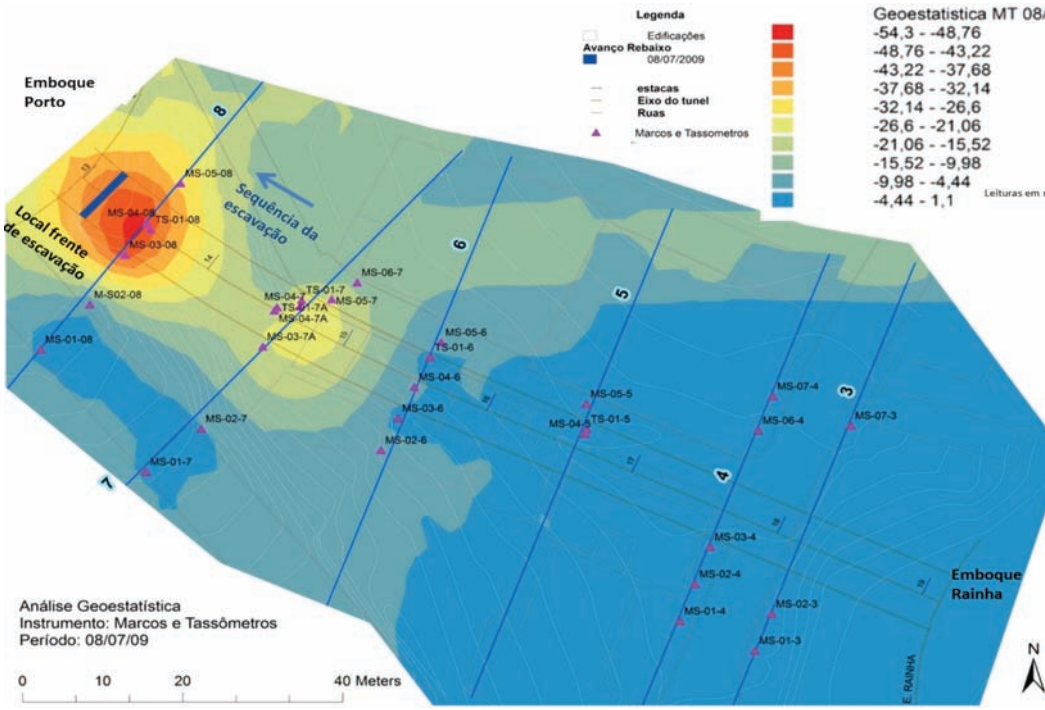


Fig. 10 – Análise geoestatística dos recalques medidos por marcos e tassômetros - 08/07/2009.

3.3.2.2 – Análises geoestatísticas dos pinos de recalque nas edificações

As análises geoestatísticas dos pinos de recalques em datas específicos da obra, considerando os dados das Seções Externas de Instrumentação, são apresentadas no Quadro 3. Comparando as Figuras 11 e 12, observa-se a evolução do assentamento do maciço, o recalque diferencial nas edificações e o valor do recalque máximo atingido em relação à localização das seções de instrumentação.

Quadro 3 – Resumo dos resultados da análise geoestatística dos pinos de recalque - Seções Externas.

Datas	**Faixa de valores máximos de recalque (mm)**	**Área crítica**
17/2/2009	5,63 - 6,90	Pinos PR-106, PR-100, PR-89 e PR-88
03/03/2009	6,26 - 7,60	Pinos PR-106, PR-100, PR-90, PR-89, PR-88 e PR-87
31/03/2009	13,70 - 15,94	Pinos PR-100, PR-91, PR-90, PR-89, PR-88 e PR-87
19/05/2009	14,24 - 16,50	Pinos PR-90 e PR-89
02/06/2009	18,4 - 21,10	Pinos PR-100, PR-90 e PR-89
08/07/2009	18,52 - 21,00	Pinos PR-100, PR-90 e PR-89

Considerando os resultados obtidos das análises geoestatísticas dos pinos de recalque das edificações e as informações coletadas durante o acompanhamento técnico da obra, observa-se que:

- A análise da leitura inicial em 17/02/009 mostrou que os pinos dos edifícios A e B apresentaram os maiores recalques, mesmo não sendo os pinos mais próximos da frente de escavação. Isto indicou ao ATO os edifícios que já apresentavam recalque diferencial e que mereceriam maior controle e vistorias;

- Com o avanço da frente de escavação e a variação de rocha sã para rocha alterada, individualizada no mapeamento geológico/geotécnico, a análise geoestatística mostrou uma aceleração na evolução dos recalques diferenciais nos edifícios A e B, especialmente no período de 17/02/2009 a 31/03/2009. Isto ocorreu em virtude da frente de escavação avançar exatamente abaixo destes edifícios;

- A análise geoestatística do dia 31/03/2009 indicou que, mesmo com a frente de escavação já distante das edificações de cerca de 30m, os mesmos ainda sofriam recalques, sem tendência de estabilização. Em virtude disto, a obra foi interrompida para a realização de um reforço na área de ocorrência dos recalques. Estas informações foram fundamentais para o ATO justificar a interrupção da escavação e a execução dos reforços faltantes até a estabilização das leituras da instrumentação;

- Após este período crítico, com o reforço completamente executado, as leituras dos pinos de recalque se estabilizaram, não mais sendo influenciados pelo avanço da frente de escavação. No entanto, ressalta-se que o recalque diferencial, especialmente no Edifício B, atingiu cerca de 21mm, resultando no aparecimento de trincas nas paredes destas edificações.

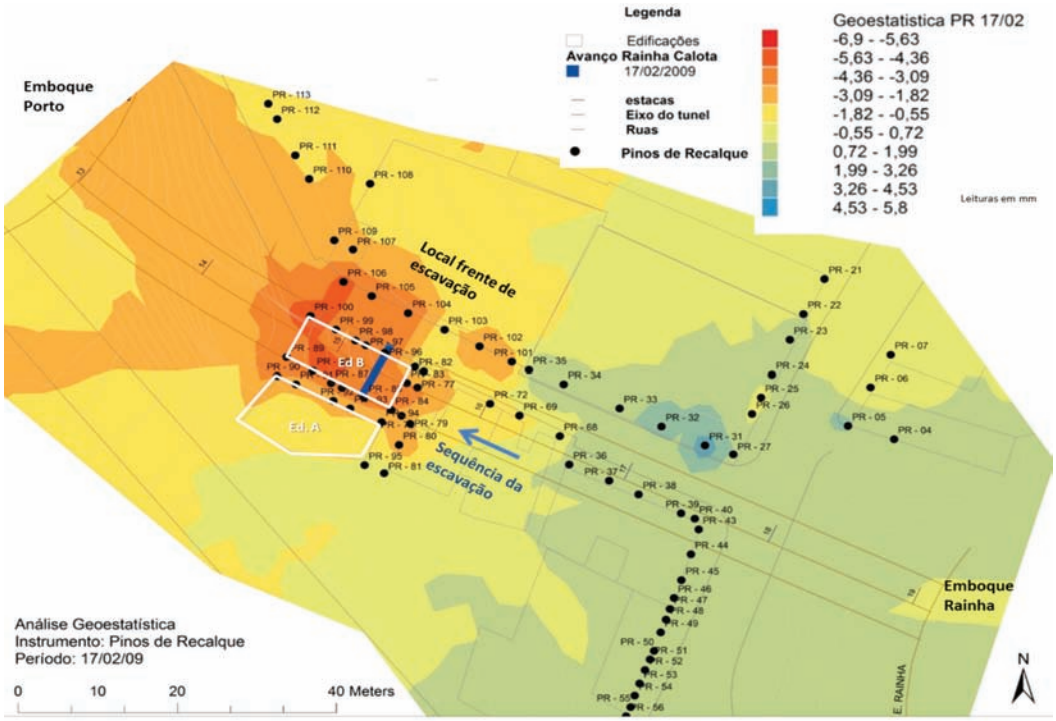


Fig. 11 – Análise geoestatística dos recalques medidos por pinos – 17/02/2009.

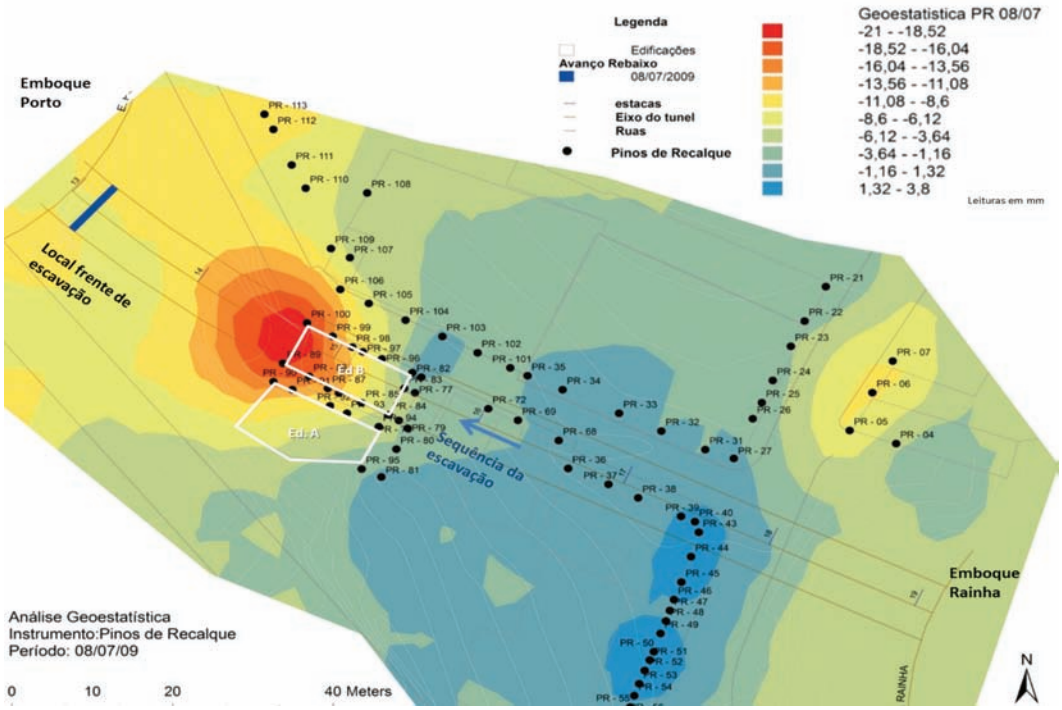


Fig. 12 – Análise geoestatística dos recalques medidos por pinos - 08/07/2009.

3.3.2.3 – Análise da aplicação da geoestatística

As principais contribuições da aplicação da geoestatística para a avaliação diária da variação espacial dos dados durante o acompanhamento técnico da execução do Túnel Dois Leões, foram:

- Identificação da zona de influência da frente de escavação e a sua movimentação espacial;
- Avaliação da influência da frente de escavação em relação a ocorrência de recalques diferenciais das edificações e orientação do ATO quanto à frequência de vistorias das estruturas;
- Avaliação temporal da evolução da movimentação do maciço, através da comparação das análises diárias;
- Identificação das zonas do maciço menos resistentes e/ou mais deformáveis, indicando a necessidade de atenção ao plano de avanço da escavação e reforço estrutural;
- Possibilidade de análise da evolução dos dados de recalque em diferentes tipos de instrumentos, no caso comparação entre os Pinos de Recalque e as Seções de Instrumentação Externas (Marcos e Tassômetros). Mesmo apresentando magnitudes diferentes de medidas, pode-se avaliar, conforme o avanço da escavação, a zona de influência da obra, no maciço e nas edificações;
- Neste estudo as análises das seções de instrumentação externas, compostas por marcos superficiais e tassômetros, indicaram que as maiores movimentações ocorreram nas seções SE-07 e SE-08 e que o instrumento que mais se movimentou foi o marco superficial MS-04 nas duas seções analisadas, atingindo um valor máximo de recalque igual a 54,3mm. A análise dos pinos de recalque também indicaram que os Edifícios A e B sofreram recalques diferenciais da ordem de 10mm em direção ao eixo do túnel.

4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Sistema de Acompanhamento Técnico *Online* de Suporte à Decisão, desenvolvido neste trabalho foi fundamental para o monitoramento da execução do Túnel Dois Leões, na cidade de Salvador. O sistema facilitou o entrosamento e a comunicação entre a construtora, o projetista e o acompanhamento técnico. As decisões em relação ao andamento da obra, projeto, logística, plano de fogo, avanço da escavação e execução de reforço de projeto do túnel foram tomadas em conjunto, visto a facilidade de visualização e de integração dos dados oferecida pela ferramenta amigável e versátil.

Este trabalho não teve como objetivo comparar metodologias de análise espacial de dados, apenas indicou a possibilidade do uso de geoestatística para auxiliar o ATO. Utilizando tal análise como subsídio técnico para avaliar a distribuição dos recalques, tanto no maciço quanto nas estruturas do entorno da obra. Pois, juntamente com a base de dados em GIS, permitiram a identificação e acesso a informações dos instrumentos próximos a frente de escavação pelo ATO. Além disto auxiliou na identificação de locais que mereciam uma vistoria mais cuidadosa e atenta, principal - mente na detecção de trincas em paredes e pisos.

Destacam-se ainda os benefícios tecnológicos relacionados com a aplicação deste sistema na obra do Túnel Dois Leões: *(i)* Redução do risco envolvido na operação e, consequentemente, a maxi - mização do investimento e aumento da segurança na obra; *(ii)* Grande contribuição para a tomada de decisão por meio da integração da equipe técnica responsável, uma vez que todas as informações da obra e da empresa são armazenadas em um único ambiente; e *(iii)* Ferramenta de fácil acesso, ágil, clara e integradora de todos os documentos, arquivos, imagens e leituras de instrumentação.

5 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES-MEC pelo apoio à pesquisa e o auxílio das empresas: Terratek, Odebrecht e GeoVoxel.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cândido, M.A.F. (2010). *Contributo para a gestão do risco geotécnico na construção de túneis*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Geológica (Geotecnia), Dep. Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 235 p.

Carvalho, J.M.C.M.; Cavalheiro, A.A.T. (2000). *Geostatistics applied to SPT data – A case study*. Geostats 2000, Cape Town, South Africa.

Domingos, L.C.S.; Burin, S.M.; Celestino, T.B.; Esquivel, E.R. (1987). *SACI - Sistema para Acompanhamento e Controle de Instrumentação.* Congresso Latino Americano e Ibérico sobre Métodos Computacionais para Engenharia. Rio de Janeiro, PUC-Rio.

Dyminski, A.S.; Romanel, C.; Veiga, J.E.; Inoue, N. (2002). *Distribuição espacial dos valores de NSPT por métodos geoestatísticos e redes neurais*. Anais do XII COBRAMSEG, São Paulo.

Giannotti, W.J. (2003). *Instrumentação de Túneis Urbanos.* TFC Engenharia Civil - Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo.

Kochen, R. (2009). *Gerenciamento de riscos em obras subterrâneas de engenharia*. Engenharia, v. 595, pp. 100-107.

Mackean, R.A.N.; Rosenbaum, M.S. (1990). *Geostatistical Characterisation of the SPT.* 6th Int. Congress IAEG. Balkema, Rotterdam.

Miqueletto, M.; Dyminski, A.S. (2004). *Mapeamento do NSPT do subsolo da região central de Curitiba usando modelo neural de dois estágios.* IV Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul – Geosul 2004, ABMS–NRPR/SC, Curitiba/PR.

Moreno Tallón, E. (1996). *La assistência técnica durante la construcción de túneles*. Revista Ingeopres, Madrid.

Murakami, C.L. (2001) *Noções Básicas para o acompanhamento técnico de obras de túne*is. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Ribeiro Neto, F. (1999). *Segurança, ruptura e colapso de túneis urbanos em NATM.* Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Schuler, A.R.; Bastos, C.A.B.; Folle, D.E.; Ribeiro, K. (2007). *Abordagens estatísticas do subsolo de Rio Grande/RS a partir de um sistema de informações geográficas de sondagens do SPT e CPT dinâmico.* Ijuí/RS: GEO-RS, Congresso Regional de Geotecnia.

Sturaro, J.R. (1994). *Mapeamento geoestatístico de propriedades geológico-geotécnicas obtidas de sondagens de simples reconhecimento*. São Carlos-SP: Tese de Doutorado em Geotecnia, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos.

Veldkamp, J.G.; Bremmer, C.N.; Hack, H.R.G.K.; Hendriks, M.A.N.; Kronieger, R.; Ozmutlu, S.; Van Deen, J.K. (2001). *Combination of 3D GIS and FEM modelling of the 2nd Heinenoord tunnel, the Netherlands*. In: Int. Symp. Engineering Geological Problems of Urban Areas, EngGeoCity 2001, Yekaterinburg, Russia. IAEG/IUGS/UralTICIZ, p. 8.

Xavier, S.R. (1999). *Estudo Geoestatístico do Subsolo da Usina Nuclear de Angra 2*, RJ. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Brasil, 229 p.