



ESTUDO DE OPTIMIZAÇÃO DE UMA REDE DE MONITORIZAÇÃO DE ESTRUTURAS BASEADO NA OBSERVAÇÃO DO MURO DE SUPORTE DO JARDIM BOTÂNICO DA U.L.

Carlos ANTUNES e João CALVÃO

LATTEX, IDL, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Resumo: O recurso às redes topométricas ou geodésicas de precisão para a monitorização de estruturas é muito comum e cada vez mais utilizado. Contudo, as condições de operacionalidade, intervisibilidade e estabilidade de referências, que por vezes se encontram no terreno, nem sempre garantem a situação ideal de aplicabilidade destas redes com qualidade e rigor. A rede implantada no Jardim Botânico da Universidade de Lisboa pelo Grupo de Engenharia Geográfica da FCUL é um bom exemplo destas más condições de observação. Por essa razão, para além de servir como laboratório de aulas práticas, esta rede está a ser alvo de um estudo de optimização matemática, com vista a obtenção de melhores resultados na aplicação deste tipo de redes locais muito condicionadas. A ausência de pontos de referência estáveis, a dinâmica do solo de argila sobre um declive topográfico considerável e a forte vegetação, por vezes de espécies protegidas, são os factores que constituíram o grande desafio deste trabalho de monitorização. Os resultados já obtidos para um período de um ano, com observações mensais, permitem já tirar conclusões, com razoável confiança, sobre a instabilidade do muro de suporte. São apresentados os resultados de um ano de observações, a abordagem de cálculo até agora adoptada, bem como os desenvolvimentos futuros com vista à optimização do modelo de ajustamento da rede.

Palavras-chave: monitorização de estruturas / redes topométricas de precisão / concepção e optimização de redes geodésicas / ajustamento constrangido.

1. INTRODUÇÃO

Em meados de 2007 surgiu a preocupação sobre a possível instabilidade do muro de suporte do Jardim Botânico da U.L. (JB), junto ao Observatório Astronómico (OA), e o risco que daí poderia resultar. O muro, com uma altura de cerca de 10 metros, apresenta uma deformação na forma de lomba na sua parte superior, acompanhada pelo arqueamento do coroamento do muro. O muro foi já sujeito a uma intervenção de reforço e escoramento há cerca de 20 anos e recentemente foram demolidas as antigas oficinas do OA, as quais ofereciam alguma resistência e suporte.

Face à necessidade de uma monitorização da estrutura, com vista à adequada avaliação dos potenciais riscos, e face às dificuldades do JB em suportar os elevados custos financeiros na contratação de especialistas profissionais, surgiu a ideia de se recorrer a especialistas académicos da FCUL para executar um estudo prévio da avaliação da estabilidade da estrutura. Nesse sentido, foram contactados para o efeito os docentes de Engenharia Geográfica da FCUL. Com recurso a equipamento de observação disponível e a métodos de processamento e análise de dados desenvolvidos na FCUL foi possível executar esta tarefa de tão grande responsabilidade, a um custo directo consideravelmente reduzido.

Para a concretização do trabalho de monitorização, o grupo de EG contou com um instrumento de medição de elevada precisão, a estação topo-geodésica LEICA TCA2003 gentilmente emprestada pelos Serviços de



Geodesia do Instituto Geográfico Português ao abrigo de um Protocolo de Cooperação, e de um nível digital de precisão, o Zeiss DiNi da FCUL. Um conjunto de 10 mini-prismas recto-reflectores, a serem distribuídos pelo muro e devidamente fixados, foi a única aquisição custeada pela instituição.

Os trabalhos iniciaram-se em Outubro de 2007, com a montagem da rede de monitorização, constituída pela materialização de 4 pontos de referência (pontos estação) e os 10 alvos reflectores (pontos objecto) devidamente fixados nos espigões de escoramento do muro. A localização destes pontos foi estudada previamente, de forma a, juntamente com o equipamento utilizado, garantir a precisão de 1 mm a 95% de confiança nos deslocamentos transversais detectados (sentido da deformação).

2. CONCEPÇÃO E MATERIALIZAÇÃO DA REDE DE OBSERVAÇÃO

O objectivo principal da monitorização topométrica do muro de suporte é a determinação da deformação transversal, visível a olho nu, e o eventual abatimento do coroamento por consequência do abaulamento do muro. Dado a elevada inclinação das visadas de observação, como consequência da elevada altura do muro e do curto avanço dos pontos de extensão da rede (Figura 1a), bem como, a dificuldade na colocação de prismas adequados a este tipo de visada (não redireccionáveis), optou-se apenas por uma rede de monitorização planimétrica para o estudo da deformação transversal e por nivelamento geométrico de precisão sobre o coroamento do muro e respectivo terreno adjacente para o estudo do eventual abatimento da estrutura.

A intensa arborização e vegetação típica do JB formam as condições difíceis na concepção de uma rede robusta e fiável, pela impossibilidade de se definirem livremente visadas com perfeita intervisibilidade. Adicionalmente, não existe no local qualquer tipo de afloramento rochoso ou estrutura capaz de suportar de forma perfeitamente estável a materialização, por centragem forçada ou outra, de pontos de referência. Assim, a solução encontrada foi a figura de um quadrilátero de apoio (Figura 1b) com dois pontos de referência na base, materializados com rosca chumbada em estruturas rochosas não solidárias com o terreno, e dois pontos intermédios, materializados com espigões cimentados no solo. Estes 4 pontos são os únicos de estacionamento e observação. A partir de 2 pontos desta figura são então observados os 10 pontos objecto fixados no muro com visadas cruzadas com convergência entre os 30° e os 40° na direcção transversal ao muro.

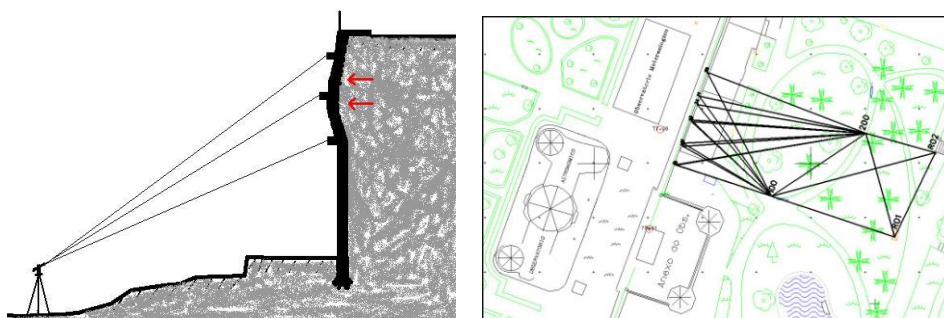


Figura 1- a) Secção transversal do muro (esquerda); b) localização da rede de monitorização do muro de suporte (à direita a negro) junto ao Observatório Astronómico no Jardim Botânico da U.L.

A definição do sistema de referência local (coordenadas planimétricas (x,y)) e sua orientação foi concebida de forma a que a componente do eixo OY ficasse orientada na direcção da deformação, a direcção perpendicular ao muro. Desta forma os deslocamento estimados entre épocas de observação, expressos na componente Y, correspondem exactamente, em valor absoluto, à deformação transversal do muro. A localização da sua origem foi definida sobre o ponto de referência R01 à época de referência, de modo a posicionar toda a rede no primeiro quadrante do sistema de coordenadas. Este ponto de referência R01, materializado com uma rosca de centragem chumbada num bloco rochoso, seria à partida a referência mais estável (fixa) em relação à qual seriam estimados os deslocamentos dos restantes pontos da rede. Tal não se veio a verificar, devido a uma



grande instabilidade do monumento de suporte causada pelo eventual deslizamento do terreno argiloso e forçado por um acentuado declive, pelo que esta referência deixou de ser considerada como fixa. Contudo, a marca desempenha um papel fundamental na geometria e robustez da rede.

A componente de deslocamento vertical é apenas observada através de nivelamento geométrico na zona de influência do patamar superior, em marcas cravadas no coroamento do muro, sobre o lancil do passeio e no terreno a cerca de 4 m do muro. Tirando partido de uma marca de nivelamento existente na escadaria do OA, a observação de nivelamento é realizada com visadas simples, num único estacionamento, e com abertura e fecho do nivelamento na marca de Observatório.

3. CAMPANHAS DE OBSERVAÇÃO

Após a calibração do equipamento (estação TCA2003) e duas campanhas prévias de observação para avaliar a qualidade dos dados, iniciou-se o processo de monitorização com a campanha “Zero” (de referência) em meados de Novembro, exactamente antes do início das primeiras chuvas da estação de inverno, factor que mais contribui para a deformação da estrutura, devido à pressão que resulta da expansão horizontal da argila.

A época de observação de referência estabelece a posição de referência dos pontos objecto em relação à qual serão determinadas diferenças ou desvios nas épocas de observação subsequentes. Esta diferença de posição dos pontos entre uma dada época de observação e a época de referência dita o deslocamento acumulado da deformação. Para que seja considerado deslocamento efectivo, a diferença numérica estimada das coordenadas tem de ser superior a 1 mm, margem de erro a 95% de confiança. O deslocamento transversal do muro é a componente de deslocamento horizontal mais importante e sobre a qual a rede garante maior rigor de posicionamento, dada a sua geometria (facto tido em consideração na concepção da rede).

Paralelamente a esta monitorização horizontal, embora iniciada mais tarde, é também feita uma monitorização vertical com nivelamento geométrico na zona de influência sobre o patamar superior. No primeiro ano de observação foram efectuadas 13 campanhas de observação planimétrica, uma por mês, e 6 campanhas de nivelamento geométrico. Estas em menor número por se ter verificado uma estabilidade na componente vertical.

4. MODELO MATEMÁTICO

O conjunto de observações colhidas neste tipo de redes é formado por distâncias inclinadas, medidas angulares azimutais e medidas angulares zenitais. Sendo o modelo definido no espaço bidimensional (rede planimétrica) as distâncias zenitais servirão apenas para a redução das distâncias lineares inclinadas a distâncias horizontais. Pelo que, o sistema de equações se resume, essencialmente, a um conjunto de equações de distância e um conjunto de equações de direcção azimutal.

A opção que recaiu sobre a escolha de equações de direcção azimutal deve-se, de entre várias razões, ao facto de estas simplificarem a respectiva matriz peso, reduzindo-a a uma matriz diagonal, e de simplificarem em parte o cálculo matricial na resolução do sistema pelo Método de Mínimos Quadrados (MMQ). Contudo, apresenta um inconveniente, facilmente ultrapassável, o de adicionar um conjunto de parâmetros inúteis, os rumos de orientação dos giros azimutais.

4.1. Modelo funcional

Fazendo uso de um programa de ajustamento de redes já desenvolvido na FCUL, que segue o modelo de ajustamento constrangido pelo método paramétrico ou de variação dos parâmetros, o modelo funcional é definido então pelo sistema de equações linearizadas de distâncias e direcções azimutais. Dado não se tratar de um ajustamento com constrangimento mínimo, houve a necessidade de se fixar um ponto de referência (cuja escolha pode eventualmente variar entre épocas consecutivas) e acrescentar dois rumos de orientação da rede. O sistema de equações lineares é então representado pelas equações genéricas de direcção azimutal, distância e rumo, definidas respectivamente em (1):



$$\begin{aligned}
 & -\frac{\cos R_{ev}^0}{D_{ev}^0} dX_e + \frac{\sin R_{ev}^0}{D_{ev}^0} dY_e - \frac{\cos R_{ve}^0}{D_{ev}^0} dX_v + \frac{\sin R_{ve}^0}{D_{ev}^0} dY_v - dR_0|_e = dAz_{obs} + (R_0)_E^0 - R_{ev}^0 + \nu_{dz} \\
 & -\sin R_{ev}^0 dX_e - \cos R_{ve}^0 dY_e - \sin R_{ve}^0 dX_v + \cos R_{ve}^0 dY_v = D_{obs} - D_{ev}^0 + \nu_D \quad (1) \\
 & -\frac{\cos R_{ev}^0}{D_{ev}^0} dX_e + \frac{\sin R_{ev}^0}{D_{ev}^0} dY_e - \frac{\cos R_{ve}^0}{D_{ev}^0} dX_v + \frac{\sin R_{ve}^0}{D_{ev}^0} dY_v = R_{obs} - R_{ev}^0 + \nu_R
 \end{aligned}$$

A utilização das equações de direcção azimutal, em detrimento das equações de ângulos azimutais, obriga ao uso de uma técnica de eliminação de parâmetros inúteis, por exemplo, a regra de Schreiber, para suprimir o rumo de orientação de cada giro azimutal, cuja aplicação nesse caso, implica a adição de uma equação soma por cada giro observado ou considerado. A aplicação desta regra prende-se essencialmente com a simplificação, ou redução, dos grandes sistemas de equações gerados por grandes redes geodésicas nacionais ou regionais. Embora não sendo esse o caso desta rede, é a estratégia adoptada pelo programa usado.

Esta regra traz o inconveniente de transformar o sistema de equações num sistema truncado equivalente, cujos elementos matriciais não correspondem aos elementos do sistema original. Tal facto obriga no final à recuperação desses elementos, nomeadamente, aos resíduos verdadeiros e à matriz de configuração de primeira ordem (matriz dos coeficientes) para o cálculo, por exemplo, dos números de redundância e de absorção local utilizados no estudo de fiabilidade e robustez da rede (Casaca, 2001).

4.2. Modelo estocástico

Na definição do modelo estocástico, há essencialmente a preocupação de definir correctamente o conjunto de pesos a atribuir às observações, em função das respectivas precisões definidas *a priori*. Os pesos são factores que constituem os elementos de uma matriz puramente diagonal, por se considerar um sistema de equações não correlacionadas. O modelo de pesos adoptado é dado pela relação de constante proporcionalidade definida entre o peso e a variância de cada observação:

$$p_1 \cdot \sigma_1^2 = p_2 \cdot \sigma_2^2 = \dots = p_n \cdot \sigma_n^2 = \sigma_0^2 \quad (2)$$

A simplicidade deste modelo resulta, não só do facto das observações serem independentes, mas também porque ao considerarem-se as direcções de igual precisão e, por convenção, de peso unitário obtém-se a igualdade entre a variância de referência (σ_0^2 – variância de unidade de peso) e a variância das direcções azimutais. Ao considerar-se o peso unitário para as direcções azimutais resulta facilmente, a partir da relação (2), a expressão para o cálculo do peso das distâncias:

$$p_{dist} = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{dist}^2} = \frac{\sigma_{dir}^2}{\sigma_{dist}^2} \quad (3)$$

Com base nos valores de precisão instrumental indicados pelo fornecedor, iniciou-se o cálculo com os valores *a priori* de 0.5" de precisão angular e 1 mm + 1 ppm de precisão das distâncias. Após testes de análise de variância *a posteriori* verificou-se que a incerteza acumulada na medição angular é de 0.9" e de 1.5 mm para as distâncias. Esta degradação de precisão face aos valores instrumentais deve-se ao facto de se efectuarem pontarias em modo manual, devida à geometria da posição dos prismas e ao tipo e qualidade dos prismas. Foram estes então, com pequenas variações entre épocas, os valores *a priori* usados no cálculo da matriz ao longo das várias campanhas de observação, com ligeiros ajustes de forma a resultar positivo o teste de hipóteses da análise de variâncias, após a optimização da matriz peso.



4.3. Optimização do modelo de ajustamento

As várias fases de concepção, observação e cálculo da rede de monitorização deste tipo de estruturas comportam diferentes tipos de optimização matemática. Baseado em alguma literatura disponível, da qual se destaca (Schmitt, 1985), podem-se assumir 4 ordens de problemas de optimização de redes geodésicas. Tem-se, o problema de Ordem Zero, optimização do *datum* (referencial); o problema de Primeira Ordem, optimização da configuração geométrica; o problema de Segunda Ordem, optimização dos pesos das observações; e, o problema de Terceira Ordem, optimização de melhoria da configuração.

Logo no início, ao nível da concepção, a definição da configuração geométrica é uma aplicação do problema de optimização de 1ª Ordem e deve garantir simultaneamente uma geometria com fiabilidade, permitindo a fácil detecção de observações erradas, e com robustez, garantindo que as observações exactas não sejam contaminadas pelas observações erradas. Este tipo de optimização faz-se com o recurso à análise dos números de redundância local (valores mais próximos de 1) e os números de absorção local (valores mais próximos de zero) (Casaca, 2001; Caspary, 1988).

Durante o processo de cálculo e ajustamento, são aplicados os problemas de 2ª Ordem e de Ordem Zero. Inicia-se com a escolha do melhor conjunto de observações, rejeitando as observações erradas através da análise de resíduos, e optimizam-se os pesos das observações. Finaliza-se com a optimização do *datum* através da escolha adequada de pontos a fixar ou de pontos de referência (não fixos) e da orientação da rede, em função do resultado das coordenadas e das suas variâncias. Neste último caso a escolha tem recaído pela fixação de um ponto, de entre os dois pontos mais estáveis da rede cujas condições do terreno reduzem a expansão horizontal do solo. Dado que esta não é a melhor metodologia de optimização, nesse sentido, está a ser feito um trabalho de melhoria do programa de cálculo, com o objectivo de permitir um ajustamento de constrangimento mínimo, i.e., com pontos de referência e de variância mínima em vez de fixar um ponto.

5. RESULTADOS OBTIDOS NO PRIMEIRO ANO DE OBSERVAÇÃO

5.1. Planimetria – componente transversal

No primeiro período de observação, iniciado em Novembro de 2007, foram feitas observações mensais terminadas ao fim de um ano para avaliar o comportamento de deformação sazonal ao longo desse período. Resultou uma taxa média estimada de expansão transversal do muro, a qual servirá para fazer uma análise prévia do risco, juntamente com os resultados dos períodos de observação posterior.

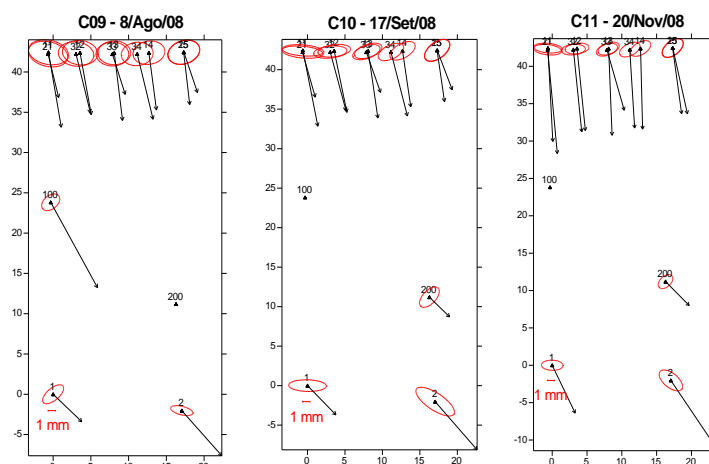


Figura 2 - Deslocamentos acumulados nas três últimas épocas de observação em 2008, relativamente à época "zero", e respectivas elipses de incerteza a 95% de confiança



Os resultados são conclusivos, o muro apresentou um deslocamento transversal médio acumulado de $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, com uma taxa média de $7,8 \text{ mm/ano} \pm 0,14 \text{ mm/ano}$. Apesar de se verificar, em termos gerais, alguma uniformidade de tendência nos deslocamentos, a parte superior do muro, mais superficial ao nível do terreno, apresentou uma recuperação da expansão após o período chuvoso. Esta recuperação, apenas na parte superior do muro, poder-se-á dever à contracção da argila mais superficial, em princípio, mais exposta às variações sazonais da humidade no solo, factor que mais influencia o seu comportamento de expansão/contracção.

5.2. Nivelamento – componente vertical

Das 6 épocas de observação de nivelamento geométrico os resultados mostram a inexistência de qualquer assentamento do coroamento e lancil, embora no terreno seja perceptível uma variação, sem qualquer tendência definida, na ordem de 1 mm, com uma incerteza padrão de 0,5 mm. Um valor perfeitamente aceitável ao nível a expansão/contracção vertical da argila. Contudo, há que encontrar, do ponto de vista da Geotecnia, uma explicação que enquadre este comportamento face à evidente deformação transversal do muro.

6. CONCLUSÕES

Relativamente à conclusão sobre a estabilidade do muro, apesar da confiança dos resultados preliminares, será necessário esperar pelas campanhas de observação subsequente para concluir sobre o risco associado.

No que diz respeito à metodologia de cálculo de ajustamento, dada a instabilidade e dinâmica dos pontos de referência e observação, a qual dificulta a definição e fixação de um *datum* que seja o mais inercial possível, isto é, que não acompanhe os movimentos relativos dos pontos de referência, é extremamente importante que se venha a introduzir, no futuro imediato, a capacidade de se efectuarem ajustamentos de constrangimento mínimo (sem pontos fixos). Espera-se que essa metodologia de ajustamento permita uma melhor solução para o problema de Ordem Zero, ou seja, uma solução de optimização do *datum* mais adequada e realista.

Agradecimentos

Agradecemos ao Instituto Geográfico Português pelo empréstimo da estação total Leica TCA2003 que tornou possível a realização deste trabalho de monitorização.

Referências

- Casaca, J. (2001). O método da variação de coordenadas na observação geodésica de barragens. Ed. LNEC, Série ICT, ITB 21.
- Caspary, W.F. (1988). Concepts of network deformation analysis. Ed. Rüeger, J.M., 2nd Impression, Monograph 11, School of Surveying, University of New South Wales, Kensington, Australia.
- Schmitt, G. (1985). Review of networks designs: criteria, risk functions, design ordering. In Grafarend, E.W. and Sansò, F. (Eds.): Optimization and design geodetic networks. Berlin, Edinburgh, New York, Tokyo, 1985, p. 6-10.

Contactos

Carlos ANTUNES
cmantunes@fc.ul.pt
LATTEX, IDL, Faculdade de Ciências da U.L.
<http://www.lattex.fc.ul.pt>
Portugal