

ANÁLISE DE DESLOCAMENTO EM UMA MINA A CÉU ABERTO

Patrício Alcota Aguirre¹
Camil Gemael²

Universidade Federal do Paraná
Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra
Centro Politécnico, Jardim das Américas, C.P. 19001, CEP 81531-990,
Curitiba-PR - Fone (0XX41) 3613153, Fax (0XX41) 266-2393.

¹e-mail: palcota@uantof.cl
²e-mail: k1000@geoc.ufpr.br

RESUMO

O presente trabalho visa analisar os deslocamentos ocorridos em uma mina a céu aberto localizada no norte de Chile. Os dados empregados para a pesquisa foram fornecidos pela Empresa Codelco-Chile, División Chuquicamata, obedecendo a um sistema de controle implantado para a avaliação dos deslocamentos. Foram utilizadas metodologias diferentes daquelas que têm sido aplicadas no local (sistema *Automatic Polar System*), a fim de que forneça uma ferramenta de comparação e avaliação das metodologias atualmente aplicadas. Os métodos utilizados para processar os dados foram baseados principalmente na teoria do Método dos Mínimos Quadrados aplicando-se testes de hipótese para avaliar os resultados e para verificar se os deslocamentos são significativos. Pode-se concluir baseando-se nos resultados e testes aplicados, que os deslocamentos realmente existem ao longo do tempo; podendo ser um indicativo para pesquisas posteriores com respeito à avaliação quantitativa do real deslocamento e qual é a porção dos erros sistemáticos que estão afetando os resultados.

Palavras-chave: deslocamento; método dos mínimos quadrados, testes de hipótese.

ABSTRACT

The present work seeks to analyze the displacements happened in a open pit mine located in the north of Chile. The data employees for the research were supplied by the Company Codleco-Chile, División Chuquicamata, obeying a control system implanted for the evaluation of displacements. A different methodology from those that have been applied in the place (*Automatic Polar System*) was used, so that it supplies a comparison tool and assesment of the methodologies. The methods used to process the data were mainly set in the Least Squares theory being applied hypothesis test to evaluate the results and to verify whether the displacements are significant. It can be concluded basing on the results and applied test, that the displacements really exist along the time; it could be an indicative one for posterior researches with regard to the quantitative evaluation of the real displacements and which is the portion of the systematic error that are affecting the results.

Keywords: displacements; least squares method, hypothesis test.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente uma das tarefas mais importantes nas minas a céu aberto é o monitoramento de redes para determinar as mudanças em corpos deformáveis, seja em forma, dimensão ou em posição. Estes deslocamentos são detectados, principalmente, pelas variações das coordenadas dos pontos observados.

Existem vários métodos para avaliar estes movimentos. Podem ser mencionados os métodos geodésicos convencionais, os fotogramétricos, os espaciais, os geotécnicos e os estruturais.

No caso em estudo, uma rede de monitoramento convencional foi implantada para este objetivo na mina de *Chuquicamata*, isto é, existem

marcos nos quais ângulos e distâncias têm sido medidos.

Segundo Ashkenazi et al. (1980), uma rede de monitoramento consiste em um determinado número de pontos de controle, horizontais, verticais, ou ambos, e uma grande quantidade de observações. Esta rede, assim constituída, é a única maneira de determinar movimentos com acurácia.

Na bibliografia existente sobre redes de monitoramento de deformações (*e.g.* Silva, 1997), o processo é dividido em quatro etapas, na seqüência, relacionadas.

A primeira etapa, denominada especificação, requer um conhecimento *a priori* da grandeza dos

movimentos, o qual é, também, uma condição para estabelecer a precisão dos equipamentos utilizados.

A segunda etapa, denominada concepção, visa atingir a melhor configuração das estações de controle e das estações de observação.

A terceira etapa, denominada implementação, é a etapa de maior custo, porque é a que envolve técnicas de medição e problemas tais como centragem do instrumento, pontaria aos alvos e nivelamento do equipamento.

Na quarta e última etapa, denominada análise, as observações são estatisticamente analisadas. Nesta etapa, a análise estatística consiste na detecção de erros grosseiros (*blunders*), estimativa de parâmetros e comparação entre os conjuntos de dados provenientes de épocas diferentes. Esta análise visa determinar as reais variações das coordenadas. Nesta etapa é feito também um estudo de otimização da rede do ponto de vista da confiabilidade interna.

As três primeiras etapas já estavam feitas na mina em estudo. Neste trabalho, apenas será feita a organização e geração das bases de dados e a análise estatística destes, aplicando modelos desenvolvidos e aplicados em Geodésia.

2. DESCRIÇÃO DA REDE DE MONITORAMENTO

Na atualidade, a configuração geral da rede de monitoramento de deformação utilizada em *Chuquicamata* obedece ao equipamento necessário para aplicar o sistema desenvolvido pela LEICA AG (WILD), chamado *Automatic Polar System* (APS), e cujas características, na seqüência, estão descritas.

- Estação de Controle

A Estação de Controle conhecida como APS Oeste, consiste em um local para a instalação do instrumento topográfico. Este local é provido de uma cabine de proteção climatizada e com grandes superfícies em vidro especial anti-refração, contém também o computador que gerencia toda a operação.

Utilizam-se equipamentos de precisão, consistindo em um teodolito eletrônico servomotorizado TM3000 de precisão 0,5" e de um distanciômetro eletrônico DIOR DI3000S de precisão 3 mm + 1 ppm da distância medida.

- Rede de Pontos Fixos

Estão fixados um conjunto constituído de 5 prismas de referência fora do local de observação, aos quais o equipamento faz pontaria para estabelecer um referencial local.

É importante situar estes pontos nos quais estão fixados os prismas, em marcos sólidos de concreto, em áreas estáveis e longe das influências da mina.

- Pontos de Observação

A fim de obter as observações que determinaram os deslocamentos, é empregado um conjunto de prismas num total de 70 unidades, situado na parede leste da mina (zonas 5, 6 e 7). Para este trabalho foram utilizados 36 prismas, cuja escolha foi baseada na existência de medidas para estes pontos em todas as épocas consideradas.

3. AJUSTAMENTO DA REDE DE PONTOS DE REFERÊNCIA E ESTAÇÃO DE CONTROLE, APLICANDO O MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS.

Uma das etapas na análise de deslocamento é o ajustamento das observações pelo método dos mínimos quadrados (MMQ).

No caso em estudo realizou-se um ajustamento considerando os pontos de referência como fixos para determinar as coordenadas da estação de controle (APS), considerando épocas de um mês. As observações de azimute, ângulo zenital e distância foram medidas desde a estação de controle aos pontos fixos (P1 a P5).

A finalidade deste ajustamento é determinar um ponto inicial confiável (*datum*), e verificar se houve deslocamento deste ponto. A partir da determinação deste ponto propagou-se as coordenadas aos pontos de observação para comprovar se existe deslocamento.

Devido à existência de superabundância de observações, o sistema de equações resultante não é compatível com o modelo funcional; isto é, não tem solução única. Portanto, as observações originais, representadas pelo vetor L_b devem ser substituídas por observações ajustadas (estimadas pelo ajustamento) L_a , para satisfazer o modelo.

Da diferença entre os valores estimados e os observados resulta o vetor (GEMAEL, 1994):

$$V = L_a - L_b, \quad (1)$$

que é chamado vetor de resíduo. A análise dos elementos deste vetor determina a confiabilidade do modelo.

4. EQUACÕES DE OBSERVAÇÃO

O modelo escolhido foi gerado considerando o vetor L_b como as coordenadas dos pontos fixos (P1 a P5) e é apresentado a seguir.

$$X_{p_i a} = X_a + D_i \cdot \text{sen}(Az_i) \cdot \text{sen}(Av_i), \quad (2)$$

$$Y_{p_i a} = Y_a + D_i \cdot \text{cos}(Az_i) \cdot \text{sen}(Av_i), \Rightarrow i = 1.. 5 \quad (3)$$

$$Z_{p_i a} = Z_a + D_i \cdot \text{cos}(Av_i). \quad (4)$$

Correspondendo X_{p_i} , Y_{p_i} e Z_{p_i} às coordenadas dos pontos fixos, e X_a , Y_a e Z_a às coordenadas da estação de controle APS.

5. OBTENÇÃO DAS COORDENADAS DOS PONTOS DE OBSERVAÇÃO

As equações usadas para propagar as coordenadas desde a estação de controle ajustada aos pontos de observação, são:

$$X_{P.OBS}^i = X_{APS} + Di_i \cdot |\text{sen } Av_i| - A \cdot Di_i^2 \cdot \cos Av_i \cdot |\text{sen } Av_i| \cdot \text{sen}(Az_i), \quad (5)$$

$$Y_{P.OBS}^i = Y_{APS} + Di_i \cdot |\text{sen } Av_i| - A \cdot Di_i^2 \cdot \cos Av_i \cdot |\text{sen } Av_i| \cdot \cos(Az_i), \quad (6)$$

$$Z_{P.OBS}^i = Z_{APS} + Di_i \cdot \cos Av_i + B \cdot (Di_i \cdot |\text{sen } Av_i|)^2 \quad (7)$$

para $i = 1, \dots, 36$;
em que:

$$A = (1-k)/R = 1,47 \cdot 10^{-7} \text{ [m}^{-1}\text{]},$$

$$B = (1-k)/2 \cdot R = 6,83 \cdot 10^{-8} \text{ [m}^{-1}\text{]},$$

$$k = 0,13,$$

$$R = 6,37 \cdot 10^6 \text{ m (raio da Terra).}$$

Os coeficientes A e B são as correções para os efeitos da curvatura e refração terrestre.

Neste caso tem-se quatro grupos de observações que consistem de azimute, ângulo vertical e distância inclinada. Devido ao fato de ter quatro coordenadas por ponto, calculou-se a média e o desvio padrão para cada um destes.

6. DETERMINAÇÃO, TESTES E INTERPRETAÇÃO DOS POSSÍVEIS DESLOCAMENTOS

Com as coordenadas dos pontos de observação para cada época, calculam-se as diferenças entre duas, considerando como referência a época 1 (mês de janeiro). Uma vez obtidas as diferenças entre as épocas é importante determinar se estas correspondem realmente a um deslocamento, ou são efeitos dos erros sistemáticos e grosseiros não modelados. Esta tarefa foi realizada aplicando um teste estatístico, com o nível de significância ($\alpha=5\%$) e baseado numa distribuição F de Snedecor.

O teste a aplicar pertence à análise estatística multivariada para o caso de comparações emparelhadas, que se descreve a seguir.

Hipótese básica:

$$H_0 : \tilde{d} = \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} : \text{não existe diferença}$$

significativa entre as componentes ao longo de um ano.

Hipótese Alternativa:

$$H_1 : \tilde{d} = \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} \neq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} : \text{existe diferença significativa}$$

entre as componentes ao longo de um ano.

No enunciado das hipótese básica e alternativa, tem se:

d_x = vetor da componente X, resultante da diferença entre a época 1 (janeiro) e as outras épocas (fevereiro a dezembro);

d_y = vetor da componente Y, resultante da diferença entre a época 1 (janeiro) e as outras épocas (fevereiro a dezembro);

d_z = vetor da componente Z, resultante da diferença entre a época 1 (janeiro) e as outras épocas (fevereiro a dezembro).

$$\bar{d} = \begin{bmatrix} \bar{d}_x \\ \bar{d}_y \\ \bar{d}_z \end{bmatrix}; \text{ vetor médio das diferenças entre}$$

componentes.

(8)

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \tilde{d}_j ; \quad (9)$$

$$S_d = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (\tilde{d}_j - \bar{d})(\tilde{d}_j - \bar{d})^T . \quad (10)$$

Estatística do Teste:

$$\hat{O}^2 = n \cdot (\bar{d} - \tilde{d})^T \cdot (S_d)^{-1} \cdot (\bar{d} - \tilde{d}). \quad (11)$$

Como:

$$T^2 \sim \frac{(n-1)p}{n-p} F_{p, n-p} ; \quad (12)$$

Sendo:

n = número de diferenças,

p = número de variáveis.

Rejeita-se H_0 , se:

$$T^2 > \frac{(n-1)p}{n-p} F_{p, n-p} . \quad (13)$$

7. RESULTADOS DA ESTAÇÃO DE CONTROLE

Fazendo a diferença da época 1 (janeiro) com cada uma das outras épocas (fevereiro até dezembro), gerou-se o vetor de diferenças para cada uma das componentes (X, Y, Z).

A seguir apresentam-se os resultados do teste de comparações emparelhadas, para determinar se existe

uma diferença significativa nas variações das componentes das coordenadas da estação de controle (APS), durante o ano 1996.

Para $\alpha = 0,05$,

- Valor Teórico:

$$\frac{p(n-1)}{n-p} F(\alpha)_{p, n-p} = \frac{3(11-1)}{11-3} F(0,05)_{3,8} \cong 15,26$$

- Valor calculado:

$$S_d = \begin{bmatrix} 0,0003418436364861 & -0,00016492000000658 & 0,0004273781818434 \\ -0,00016492000000658 & 0,000505730000009255 & -0,000370780000003158 \\ 0,0004273781818434 & -0,000370780000003158 & 0,00144314090908889 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{d} = \begin{bmatrix} -0,0125818181816984 \\ 0,01050000000000721 \\ -0,0390090909091172 \end{bmatrix}$$

$$\hat{O}^2 = 1,059$$

Como:

$$\hat{O}^2 = 1,059 < \frac{p(n-1)}{n-p} F(\alpha)_{p, n-p}, \text{ aceita-se a}$$

hipótese básica H_0 no nível de significância de $\alpha=5\%$, que não existe diferença significativa entre os valores das componentes no ano 1996.

Na Tab. 1 apresentam-se as variações das componentes das coordenadas ao longo do ano 1996.

TABELA 1 – VARIAÇÃO DAS COMPONENTES DO PONTO DE CONTROLE APS AJUSTADO.

MÊS	X	Y	Z
JAN.	1812,628	4295,219	3015,919
FEV.	1812,659	4295,201	3015,904
MAR.	1812,693	4295,193	3015,991
ABR.	1812,661	4295,225	3015,906
MAI.	1812,657	4295,190	3015,916
JUN.	1812,639	4295,229	3015,901
JUL.	1812,674	4295,209	3015,922
AGO.	1812,691	4295,177	3015,993
SET.	1812,651	4295,168	3015,970
OUT.	1812,688	4295,168	3015,909
NOV.	1812,665	4295,180	3015,914
DEZ.	1812,675	4295,164	3015,960

8. RESULTADOS DOS PONTOS DE OBSERVAÇÃO

Para os pontos de observação também aplicou-se o teste de comparações emparelhadas para determinar se as variações dos 36 pontos eram significativas.

Para este propósito foram calculadas as diferenças tomando como referência a época 1, aplicando o teste com cada uma das outras épocas.

A seguir apresentam-se os resultados para as diferenças entre as épocas 1 e 2 (janeiro e fevereiro) e 1 e 3(janeiro e março).

- Época 1 – Época 2 :

$$\frac{p(n-1)}{n-p} F(\alpha)_{p, n-p} = \frac{3(36-1)}{36-3} F(0,05)_{3,33} \cong 9,21$$

- Valor calculado:

$$S_d = \begin{bmatrix} 0,0191126456111111 & -0,00454416727777778 & -0,00236751758730159 \\ -0,00454416727777778 & 0,0103322646587302 & 0,00342611911111111 \\ -0,00236751758730159 & 0,00342611911111111 & 0,00315862634920635 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{d} = \begin{bmatrix} -0,0641694444444444 \\ -0,0288138888888889 \\ 0,00137777777777777 \end{bmatrix}$$

$$\hat{O}^2 = 16,22$$

Como:

$$\hat{O}^2 = 16,22 > \frac{p(n-1)}{n-p} F(\alpha)_{p, n-p}, \text{ rejeita-se a}$$

hipótese básica H_0 a um nível de significância de $\alpha=5\%$; que existe diferença significativa entre os valores das épocas 1 e 2 do ano 1996.

- Época 1 – Época 3 :

$$\frac{p(n-1)}{n-p} F(\alpha)_{p, n-p} = \frac{3(36-1)}{36-3} F(0,05)_{3,33} \cong 9,21$$

- Valor calculado:

$$S_d = \begin{bmatrix} 0,0528157702539683 & -0,0217279424920635 & -0,00820758244444444 \\ -0,0217279424920635 & 0,0262640898015873 & 0,00854974325396826 \\ -0,00820758244444444 & 0,00854974325396826 & 0,00658845920634921 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{d} = \begin{bmatrix} -0,107705555555556 \\ -0,0273861111111111 \\ -0,087227777777778 \end{bmatrix}$$

$$\hat{O}^2 = 83,70.$$

Como:

$$\hat{O}^2 = 83,70 > \frac{p(n-1)}{n-p} F(\alpha)_{p, n-p}, \text{ rejeita-se a}$$

hipótese básica H_0 a um nível de significância de $\alpha=5\%$, o que significa que existe diferença significativa entre os valores das componentes das épocas 1 e 3 do ano 1996.

Nas tabelas 2 e 3 apresentam-se os resultados obtidos tomando como referência a época 1 e comparando com as épocas 2 e 3:

TABELA 2 – DIFERENÇAS ENTRE AS COMPONENTES DOS PONTOS DE OBSERVAÇÃO ENTRE A ÉPOCA 1 E ÉPOCA 2.

PTO	DIF.X	DIF.Y	DIF.Z	PTO	DIF.X	DIF.Y	DIF.Z
511	0,0044	0,0339	0,0145	635	-0,0551	-0,0606	0,0143
515	-0,0351	-0,0111	-0,0537	638	-0,083	-0,1626	-0,0409
550	0,0002	0,0083	0,0209	642	-0,0356	0,0219	0,0148
559	-0,017	-0,0126	-0,0139	643	-0,027	-0,0227	0,0092
569	-0,0467	0,0123	0,0159	644	-0,0275	0,0203	0,0208
575	-0,0069	-0,0228	-0,0221	712	-0,1983	-0,2119	-0,0144
611	-0,0277	-0,0248	0,0003	714	-0,0987	-0,0649	0,0143
613	0,0896	-0,0232	-0,0047	750	0,0018	0,0286	0,0839
614	-0,0745	-0,1382	-0,1416	755	-0,2537	-0,2624	-0,0127
615	-0,1134	-0,1451	0,0335	756	-0,0079	-0,0119	-0,0082
623	-0,0202	-0,1174	0,062	757	-0,0868	-0,0226	0,0343
624	-0,059	-0,1257	-0,0232	758	-0,1103	-0,0596	0,0049
625	-0,0954	-0,1663	-0,2067	759	-0,0142	0,028	0,0261
626	-0,0246	0,0262	0,0257	760	0,0795	-0,0753	-0,039
627	-0,0423	0,0467	0,0406	761	-0,0241	0,0372	0,0181
629	-0,0481	-0,0038	-0,0171	762	-0,0425	-0,0029	-0,0062
630	0,0342	0,0241	0,0189	772	-0,7813	0,3483	0,1416
632	-0,0401	0,0581	0,0214	778	-0,0228	0,0172	0,018

TABELA 3 – DIFERENÇAS ENTRE AS COMPONENTES DOS PONTOS DE OBSERVAÇÃO ENTRE A ÉPOCA 1 E ÉPOCA 3.

PTO	DIF.X	DIF.Y	DIF.Z	PTO	DIF.X	DIF.Y	DIF.Z
511	-0,0025	0,0588	-0,0728	635	-0,0958	-0,0763	-0,0729
515	-0,0702	-0,0068	-0,1657	638	-0,1244	-0,1838	-0,1437
550	-0,0083	0,0086	-0,0578	642	-0,0729	0,0335	-0,0722
559	-0,0469	-0,0118	-0,1053	643	-0,0585	-0,0331	-0,0781
569	-0,0932	0,0157	-0,0702	644	-0,0571	0,0296	-0,0644
575	-0,0298	-0,0225	-0,1136	712	-0,2457	-0,2491	-0,1134
611	-0,0609	-0,0314	-0,0902	714	-0,1417	-0,0717	-0,0662
613	0,1538	-0,0314	-0,1071	750	-0,0128	0,0441	0,0375
614	-0,1318	-0,2019	-0,3239	755	-0,3154	-0,3324	-0,1218
615	-0,1954	-0,2313	-0,0385	756	-0,0242	-0,0286	-0,1136
623	-0,0485	-0,1776	-0,0012	757	-0,1348	-0,023	-0,0372
624	-0,0986	-0,1459	-0,1221	758	-0,152	-0,0589	-0,1015
625	-0,1195	-0,1808	-0,3213	759	-0,0348	0,0442	-0,0438
626	-0,0551	0,04	-0,0567	760	0,136	-0,1434	-0,1547
627	-0,0871	0,0746	-0,0299	761	-0,0534	0,0587	-0,0666
629	-0,0848	-0,0009	-0,1068	762	-0,0808	-0,0047	-0,1099
630	0,0487	0,0314	-0,0668	772	-1,3503	0,6992	0,1594
632	-0,0825	0,0954	-0,0615	778	-0,0462	0,0276	-0,0657

9. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Para a estação de controle (APS), os testes aplicados nas diferenças entre duas épocas sendo a de referência a época 1, determinou que aquelas variações nas coordenadas não eram significativas a um nível de significância $\alpha=5\%$, podendo ser produzidas pela influência dos erros sistemáticos não modelados. Pode-se mencionar entre estes erros, a distorção do sinal do equipamento produzida pela poluição e fatores ambientais. Diferente foi o caso dos pontos de observação cujas variações acusaram ser significativas; concluindo então, que existiram deslocamentos.

Das análises das coordenadas dos pontos de observação, conclui-se que a zona 5 (pontos 511-575) é a mais estável, detectando-se deslocamentos máximos em alguns pontos isolados tais como 511 e 550, de aproximadamente 0,20 m em todas as componentes (X, Y, Z); recomendando a instalação de pontos de observação adicionais para determinar a condição das regiões próximas a estes pontos. Na zona 6 pode-se concluir que os deslocamentos aumentam em magnitude, chegando até um máximo de 1,13 m na componente X, 0,40 m na componente Y e 0,60 m na componente Z, ao longo do ano. Igualmente acontece na zona 7 onde os deslocamentos máximos ao longo do ano correspondem a 3,81 m na componente X, 2,33 m na componente Y e 0,66 m na componente Z.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCOTA AGUIRRE., P. **Análise de Deslocamentos em uma mina a céu aberto**. Curitiba 2000. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas)-Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, 2000.
- ASHKENAZI, V., DODSON A. H. ; CRANE S. A. Monitoring deformations to millimeter accuracy. **Proceedings of the Industrial and Engineering Survey Conference**. London. September, 2-4, 1980.
- GEMAE, C. **Introdução ao ajustamento de observações**. Aplicações geodésicas. Curitiba, UFPR, 1994.
- LEICA AG HEERBRUGG. **APS for Windows**. Versão 1.2, 1995.
- SILVA, A. S. **Optimisation of surveying monitoring networks**. Thesis (Doctor of Philosophy), University of Nottingham, 1997.