

# MÉTODOS DE MONITORAMENTO

## **O que é monitorado?**

Alterações de forma, tamanho e posição.

## **Aplicações do monitoramento:**

- obras de engenharia: pontes, barragens, edifícios
- movimento das placas tectônicas
- deformações em rochas
- soerguimento e subsidência da crosta.

## **O monitoramento pressupõe:**

- observações de alta precisão;
- repetibilidade das observações ao longo do tempo;
- às vezes requer a integração entre observações de diferentes tipos, obtidas a partir de diferentes equipamentos,
- análise cuidadosa dos dados.

# MÉTODOS DE MONITORAMENTO

## Métodos de monitoramento:

**GEODÉSICOS:** nivelamento; poligonação/triangulação; GPS/GNSS; gravimetria; fotogrametria; sensoriamento remoto, etc.

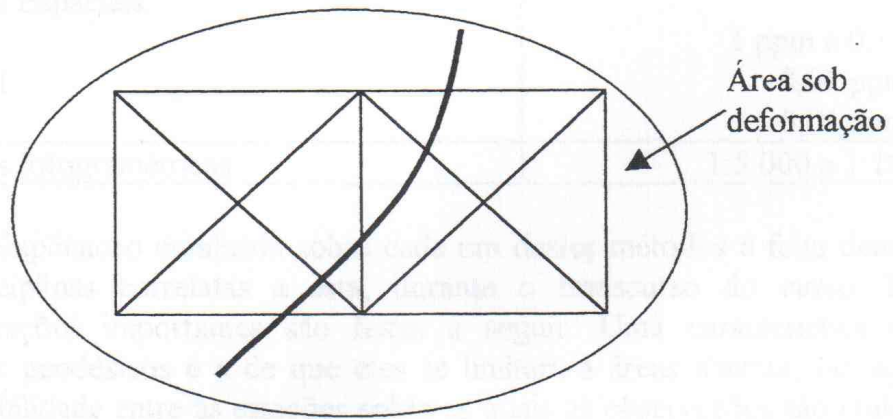
**NÃO GEODÉSICOS:** instrumentos geotécnicos que medem inclinações, extensões, alinhamentos, etc.

Os métodos geodésicos proporcionam a variação temporal das deformações/deslocamentos horizontais e verticais da própria rede ou de objetos externos à rede geodésica.

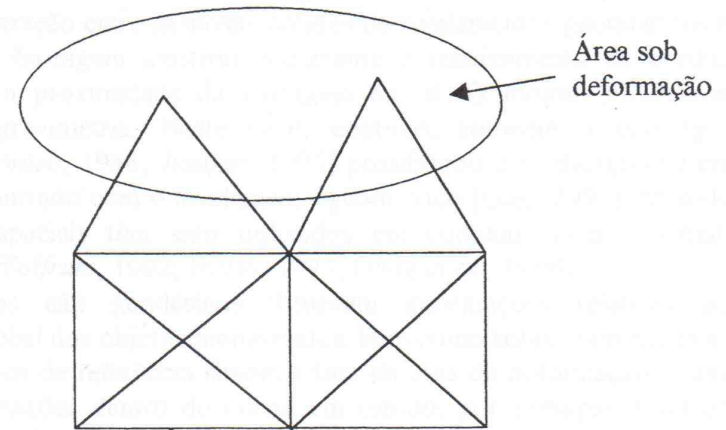
As redes de monitoramento classificam-se em:

- **Rede Relativa:** quando todos os pontos da rede estão localizados na área sujeita a deformação/deslocamento. Neste caso só é possível determinar deformações/deslocamentos relativos (1 ponto em relação ao outro).
- **Rede de Referência (absoluta):** alguns pontos estão fora da área sujeita a deformação. Neste caso é possível determinar a deformação/deslocamento de cada ponto individualmente.

# MÉTODOS DE MONITORAMENTO



(a) relativa



(b) referência

Rede de Monitoramento  
Fonte: SANTOS, 1999, p.58.

# MÉTODOS DE MONITORAMENTO

## Métodos Geodésicos de Monitoramento:

Proporcionam a variação das coordenadas de um ponto ou de um conjunto de pontos ao longo do tempo. É possível estimar deformações e/ou deslocamentos horizontais e verticais.

As principais **vantagens** dos métodos geodésicos são:

- fornecem o estado global de um corpo deformável;
- existe a possibilidade de verificação de resultados e precisão;
- os métodos são versáteis e podem ser adequados para qualquer meio ambiente e situação de operação.

As principais **desvantagens** ou problemas:

- os métodos são trabalhosos;
- requerem operadores treinados;
- repetidas observações em épocas distintas;
- dificuldade em garantir a estabilidade dos pontos fora da área de deformação.

# MÉTODOS DE MONITORAMENTO

## Métodos Geodésicos de Monitoramento

| Método                             | Precisão possível de ser obtida |
|------------------------------------|---------------------------------|
| Nivelamento geométrico de 1ª ordem | 0,5mm $\sqrt{k}$                |
| Distância com fita de ínvar        | 2ppm                            |
| Poligonação geodésica              | 1:30.000 a 1:150.000            |
| Triangulação geodésica             | 1:30.000 a 1:1.000.000          |
| Medição eletrônica de distância    | 0,1ppm a 5ppm                   |
| Nivelamento trigonométrico         | 2mm $\sqrt{k}$                  |
| GPS<br>VLBI e SLR                  | 1ppm a 0,1ppm<br>0,01ppm        |
| Técnicas fotogramétricas           | 1:5.000 a 1:100.000             |

Fonte: SANTOS, 1999, p. 59.

# MÉTODOS DE MONITORAMENTO

## Métodos Não Geodésicos de Monitoramento:

Fazem uso de instrumentos geotécnicos ou instrumentos próprios para medida de inclinações, alinhamentos, etc.

As principais **vantagens** dos métodos não geodésicos são:

- automação é facilitada;
- possibilidade de monitoramento contínuo.

As principais **desvantagens** ou problemas:

- monitoramento local e relativo
- sem possibilidade de verificação dos dados, a não ser por comparação com observações independentes.

# MÉTODOS DE MONITORAMENTO

## Métodos Não Geodésicos de Monitoramento

| Instrumentos                                                                                                                                                                                | Precisão típica                                                                          | Deformação              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| Inclínômetro de precisão:<br>Inclinômetro de mercúrio<br>Nível eletrônico<br>Talyvel<br>Nivelamento hidrostático:<br>Elwaag 001<br>Sistema Nivomatic<br>Pêndulo suspenso e invertido        | 0,0002"<br>0,25"<br>0,5"<br>0,03mm/40m<br>0,1mm/25m<br>0,1mm                             | Inclinações             |
| Extensômetros (fio ou fita):<br>Distômetro ISETH<br>Distinvar CERN<br>Rock spy<br>Extensômetros (tubo ou vara):<br>Pontos isolados<br>Pontos múltiplos<br>Torpedo<br>Interferômetro a laser | 0,05mm<br>0,05mm<br>0,02 – 0,2mm<br>0,01 – 0,02mm<br>0,01 – 0,02mm<br>0,1mm<br>0,0004ppm | Extensões e deformações |
| Alinhamento, métodos mecânicos:<br>Linha de aço<br>Linha de nylon<br>Alinhamento ótico<br>Alinhamento com laser                                                                             | 0,1mm<br>0,035 – 0,07mm<br>1 – 10ppm<br>0,1 – 1ppm                                       | Alinhamentos            |

Fonte: SANTOS, 1999, p. 60.

# Exemplo 1: MONITORAMENTO DA REDE SIRGAS

## Projeto de Redes Geodésicas:

Ordem zero (definição do referencial)

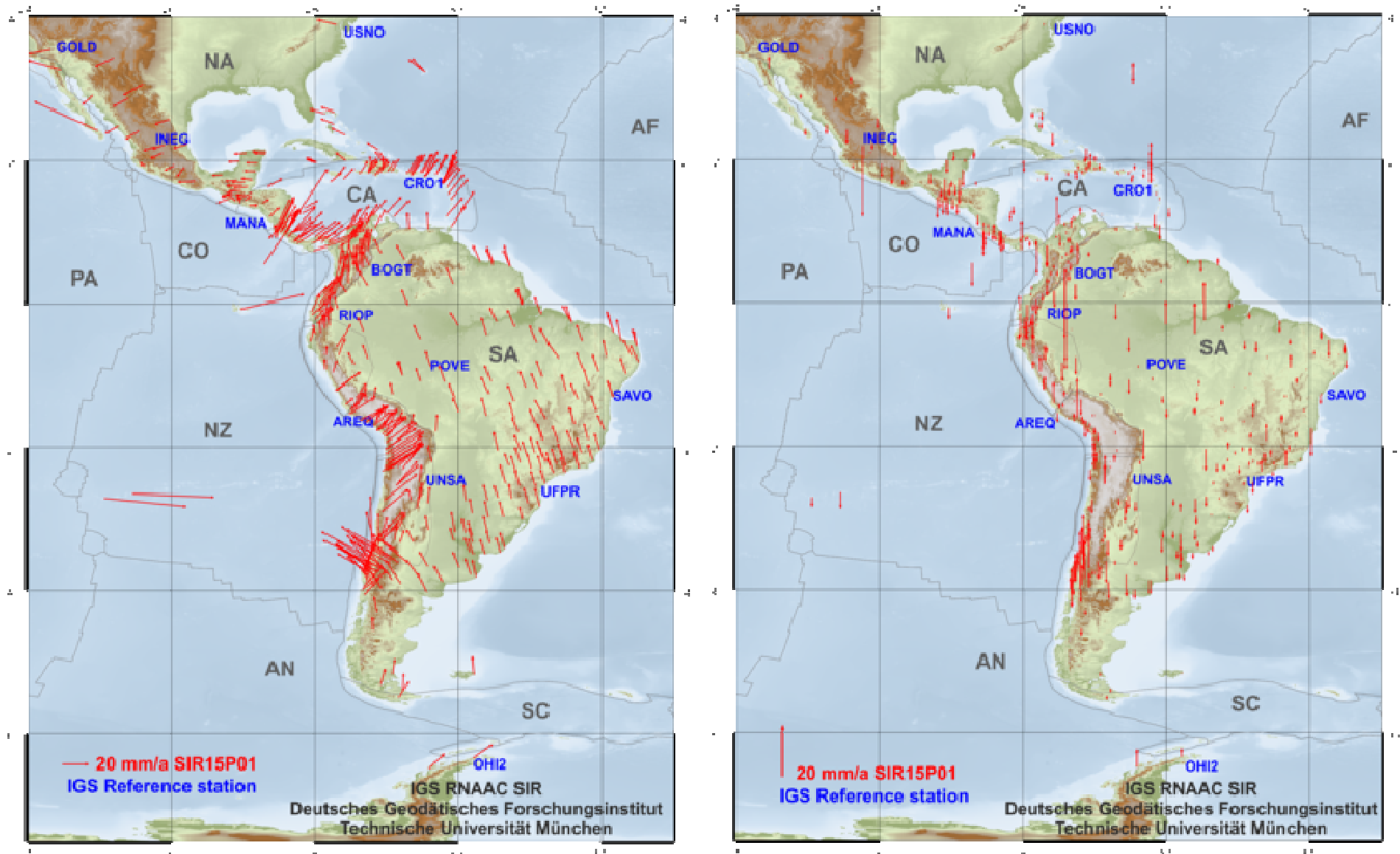
Primeira ordem (escolher a localização das estações – geometria da rede)

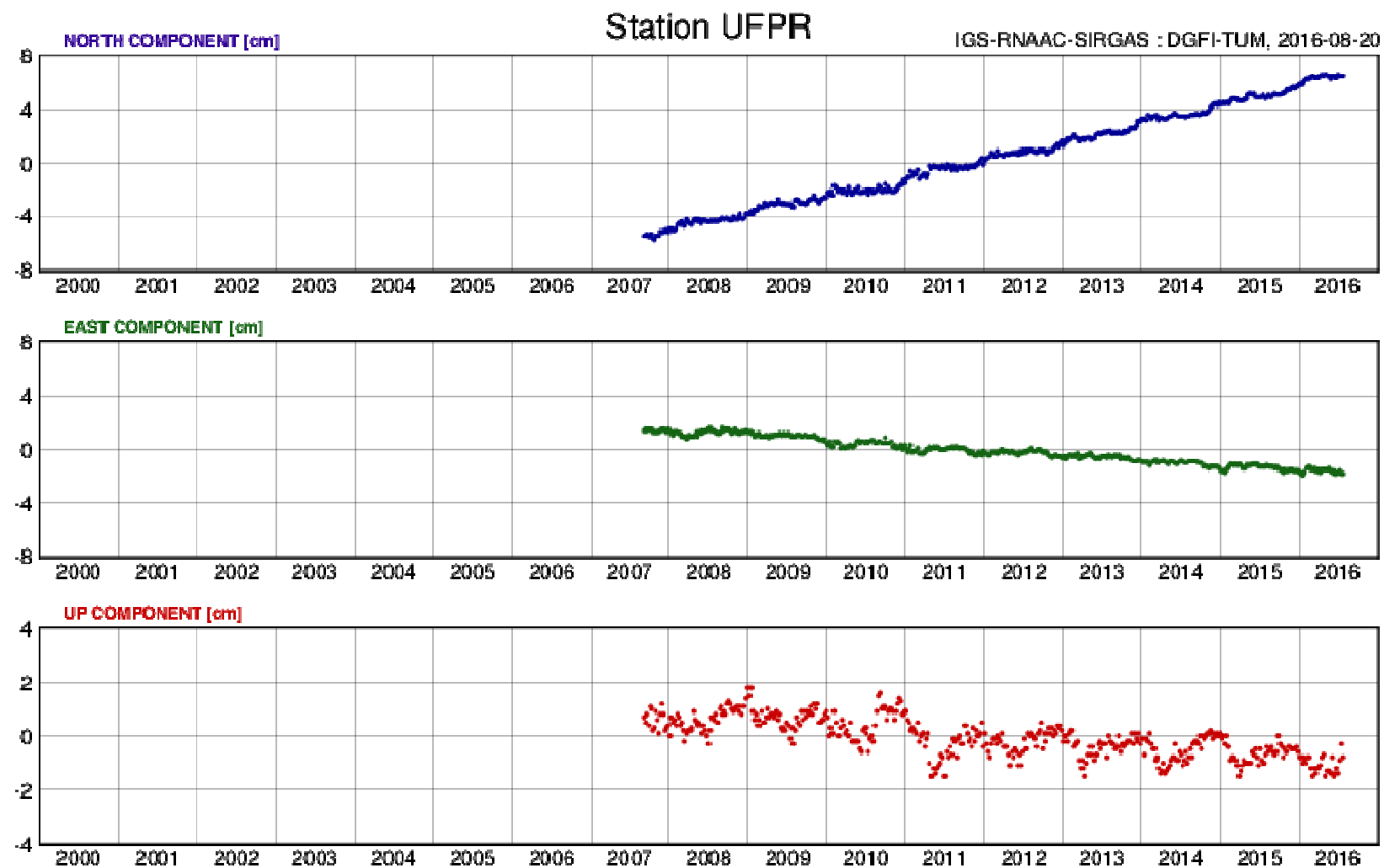
Segunda ordem (definir as observações e sua precisão)

Terceira ordem (melhoria da rede por meio da introdução de novas estações ou observações)

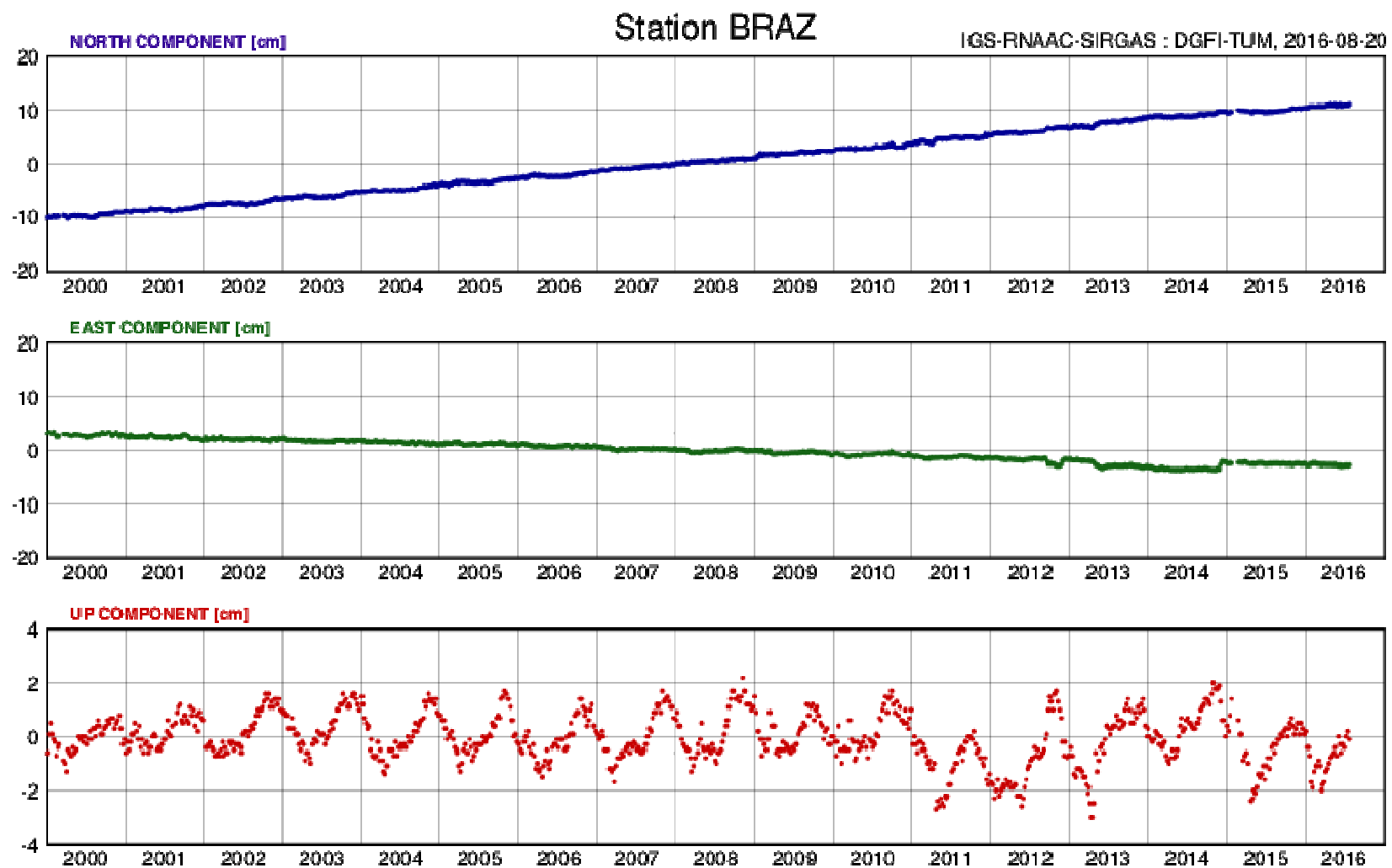
# Exemplo 1: MONITORAMENTO DA REDE SIRGAS

Fonte: [www.sirgas.org](http://www.sirgas.org)

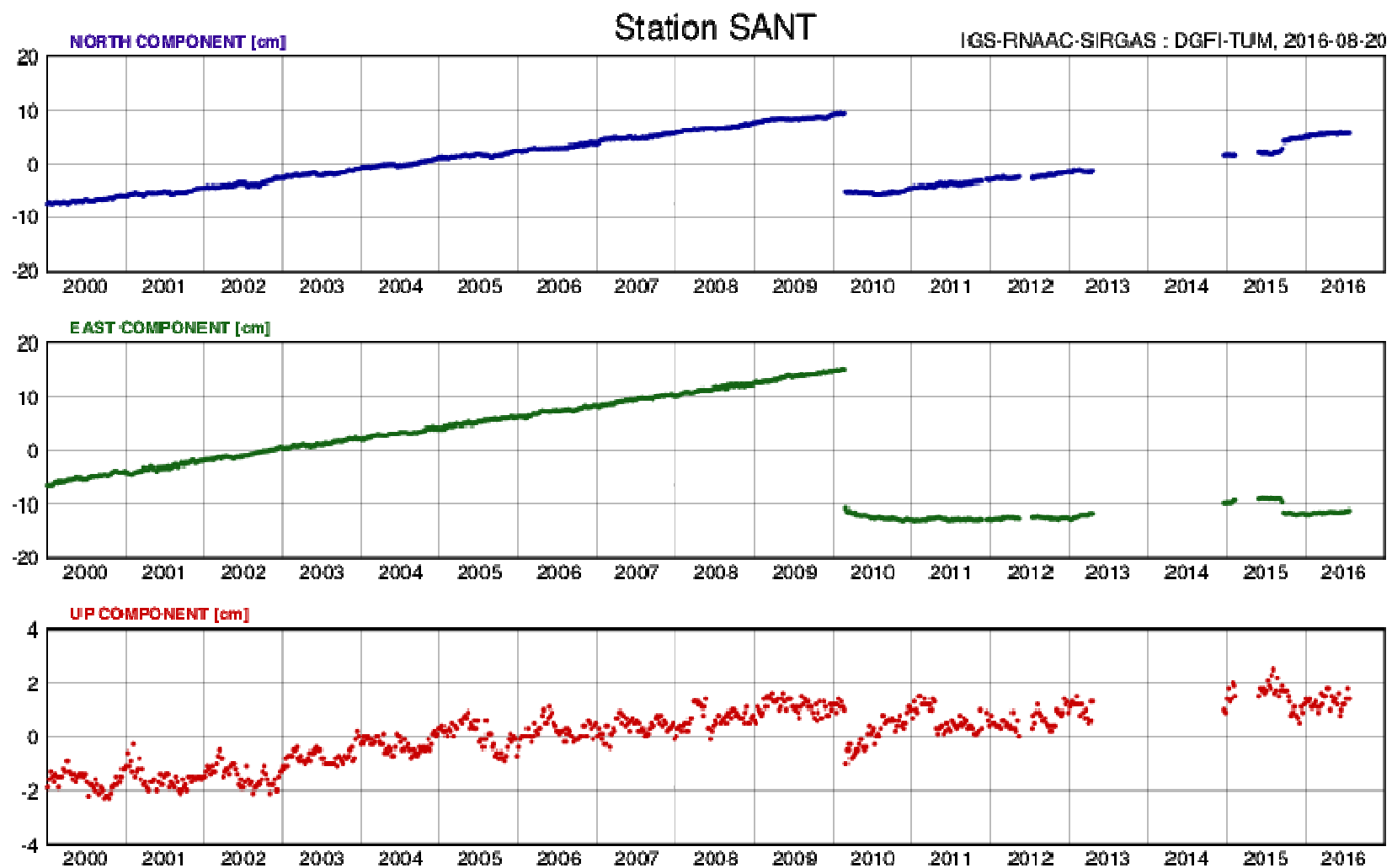




Fonte: [www.sirgas.org](http://www.sirgas.org)

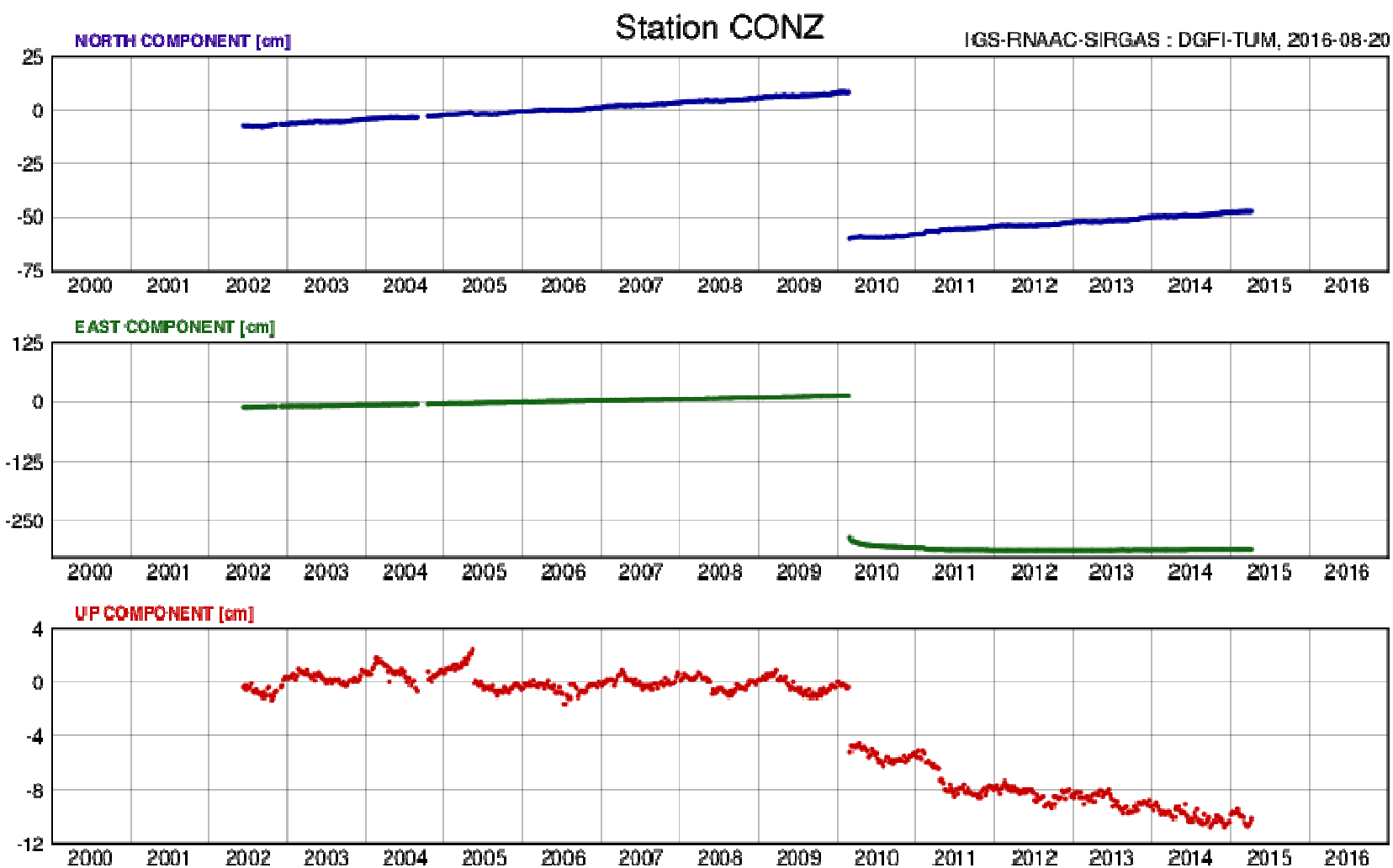


Fonte: [www.sirgas.org](http://www.sirgas.org)



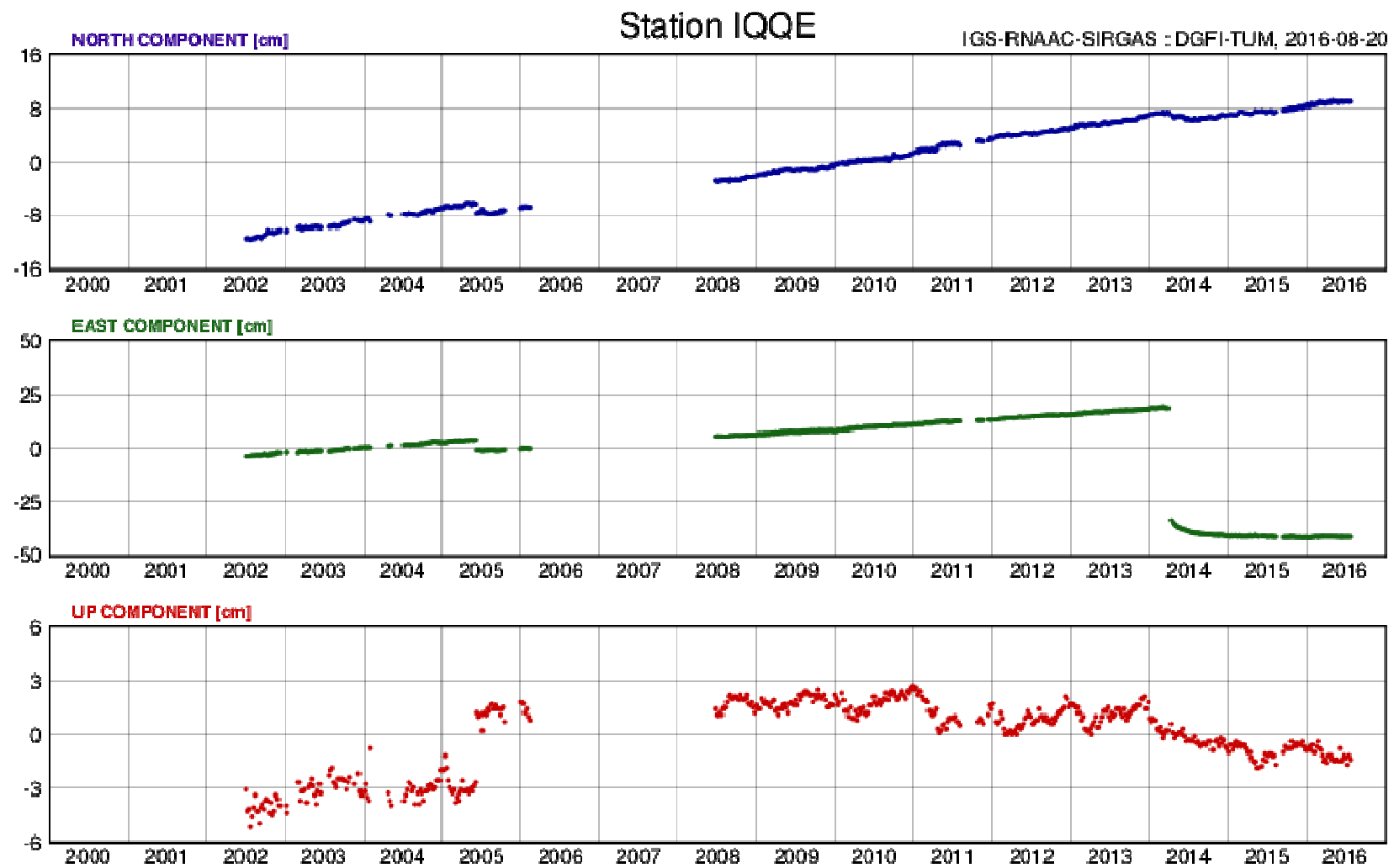
2010 – terremoto centro sul do Chile (8,8°)

Fonte: [www.sirgas.org](http://www.sirgas.org)



2010 – terremoto centro sul do Chile (8,8°)

Fonte: [www.sirgas.org](http://www.sirgas.org)



Fonte: [www.sirgas.org](http://www.sirgas.org)

2014 – 2 terremotos em Iquique (7,8° e 8,2°)

# **Exemplo 2: MONITORAMENTO GEODÉSICO DA USINA DE SALTO CAXIAS**

**Créditos: Pedro Luis Faggion**

## **Projeto de Ordem Zero:**

**Definição do sistema de referência ideal**

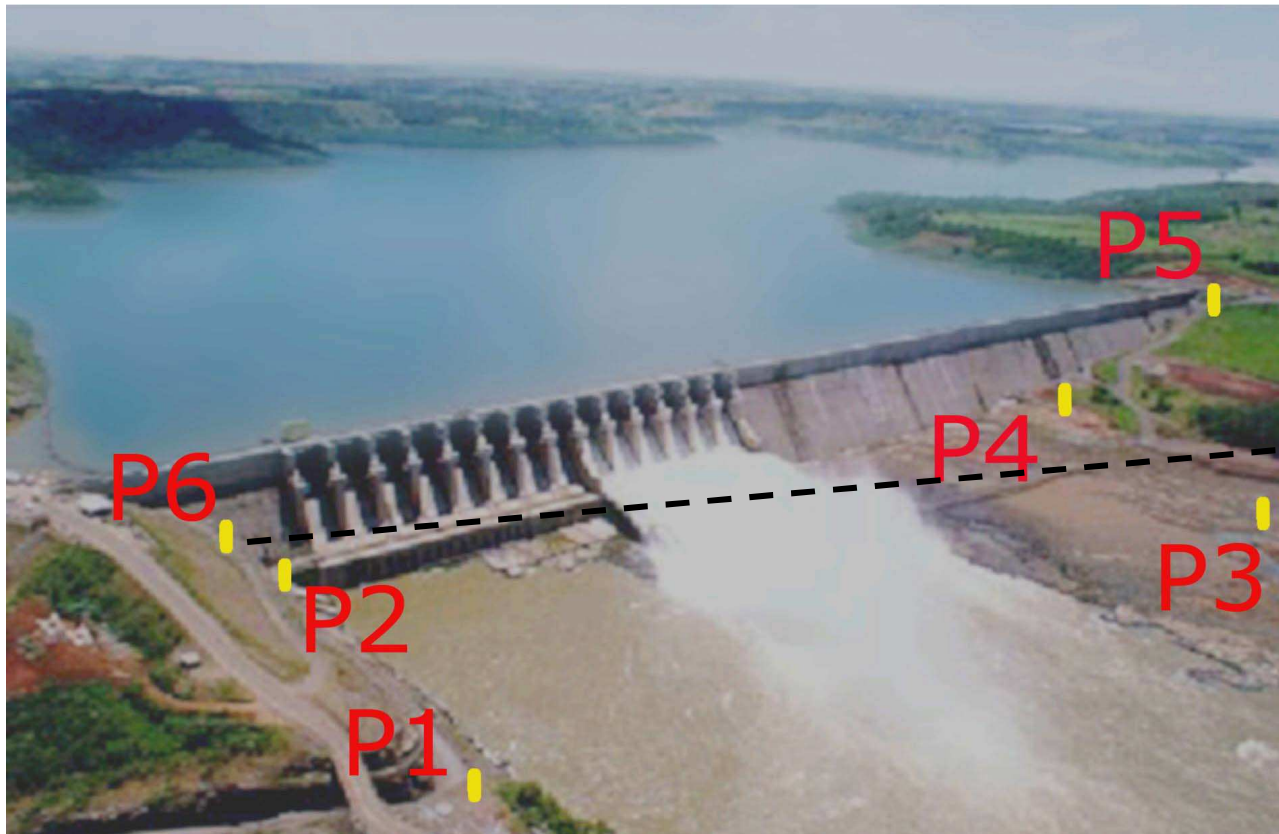
**KUANG (1996), considera que em relação ao:  
Referencial:**

**Não há problema de projeto de ordem zero nas redes de monitoramento. Os deslocamentos e/ou deformações são determinados comparando-se as coordenadas obtidas em campanhas distintas.**

**Necessidade de manter o sistema de referência ao longo das diferentes campanhas**

## Projeto de Primeira Ordem:

Escolha da melhor localização para as estações da rede



A configuração da Rede em questão não pode ser alterada, tendo em vista a necessidade dos levantamentos no local, tais como:

Geografia da Região



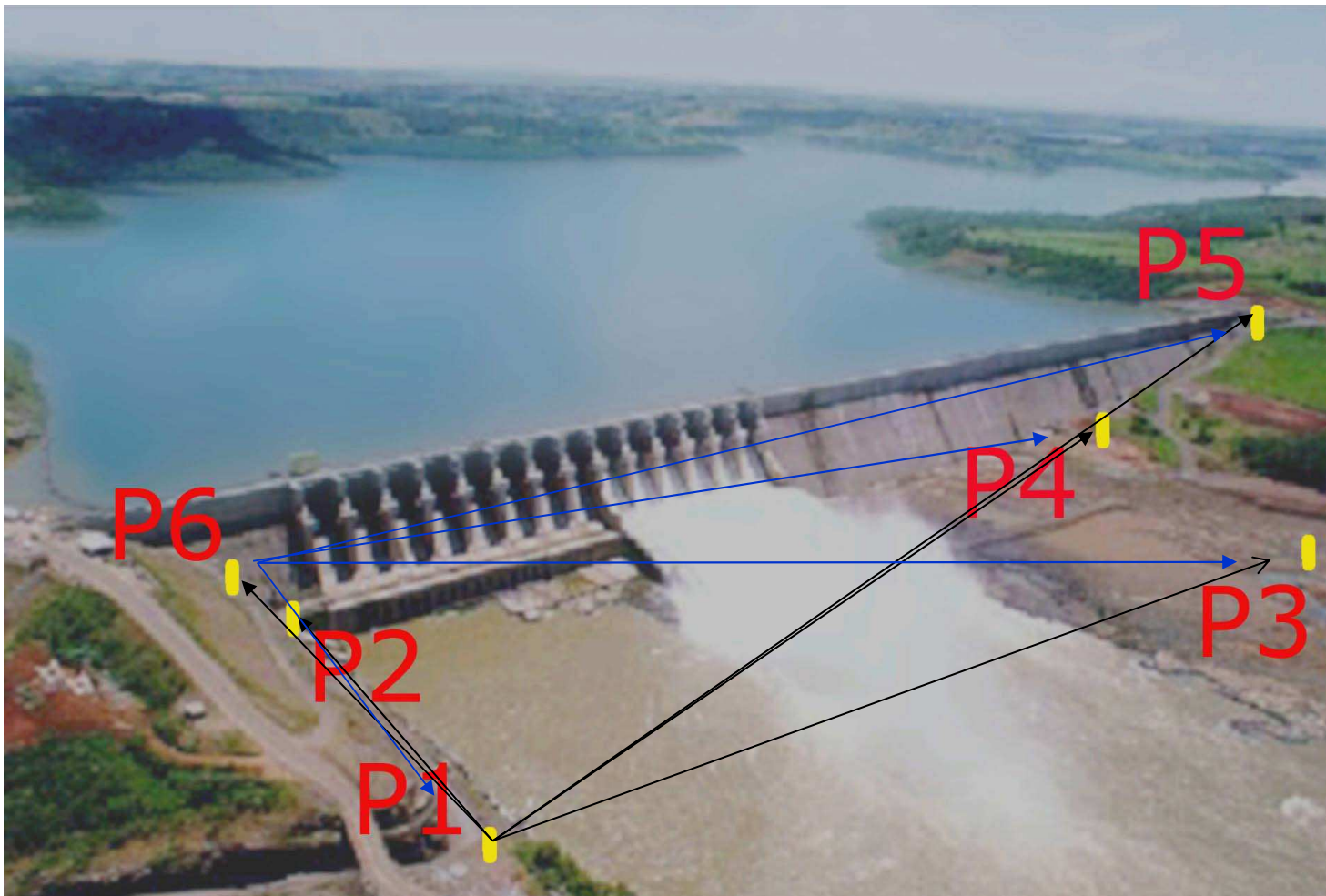
A configuração da Rede em questão não pode ser alterada, tendo em vista a necessidade dos levantamentos no local, tais como:

Apoio ao levantamento das galerias de inspeção



## Projeto de Segunda Ordem:

Escolha das observações a serem realizadas, bem como seus respectivos níveis de precisão





**Obtenção das direções - Método de Séries de Pares Conjugados (direta e indireta) repetidas vezes**

**Distâncias entre os vértices da rede medidos nos dois sentidos:**

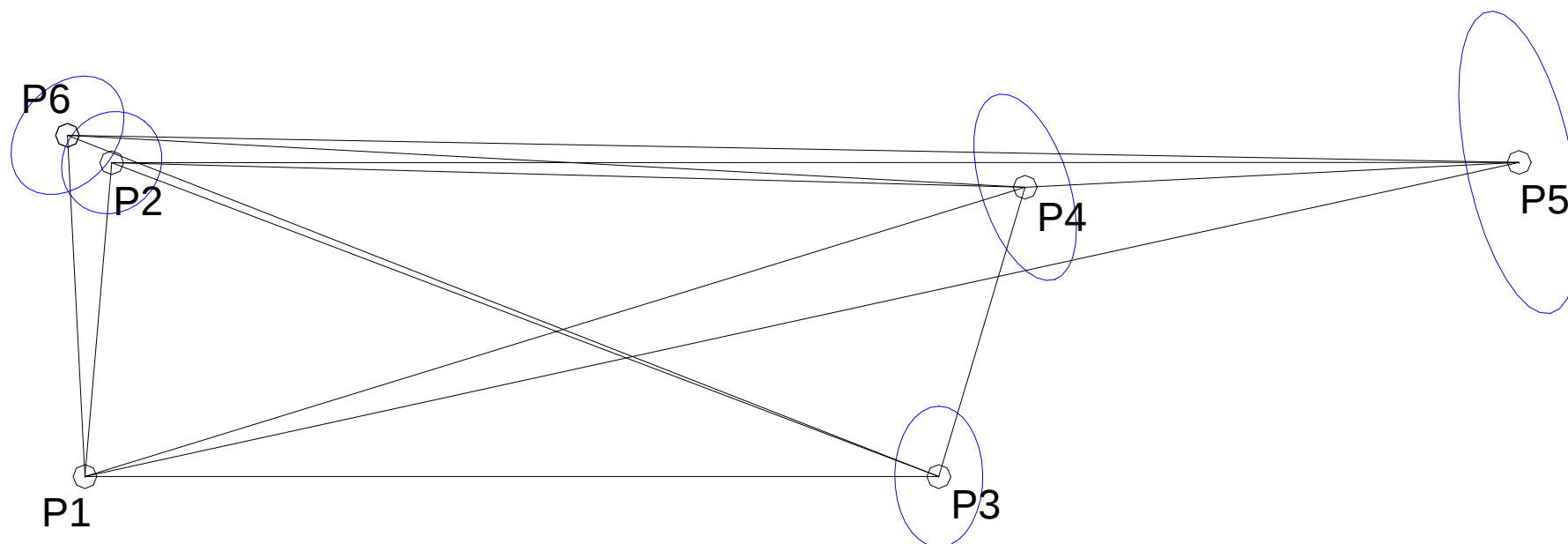
**$P1 - P2$  e  $P2 - P1$**

## **Modelo matemático:**

Variação de Coordenadas (aplicação do método paramétrico ao ajustamento de uma triangulação, trilateração, poligonação ou combinação destes métodos): neste método as coordenadas ajustadas são obtidas no próprio processo de ajustamento. As incógnitas são as correções que são aplicadas as coordenadas aproximadas atribuídas aos vértices da rede.

# Resultados Preliminares

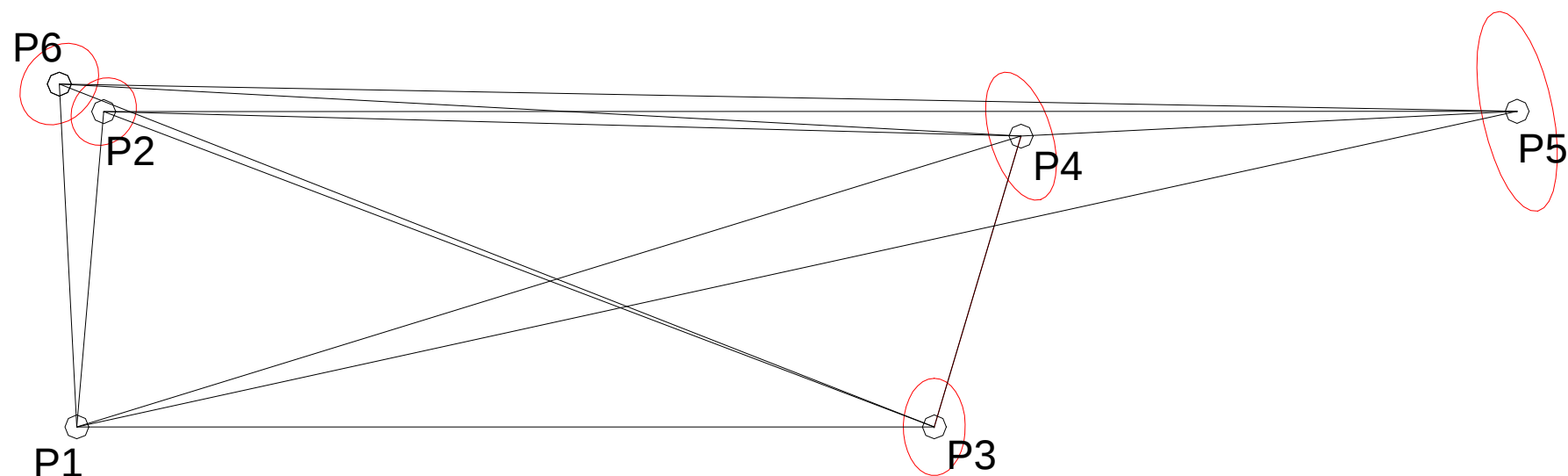
## Campanha Agosto de 2005



| Pilar | Norte    | Leste    | $\delta n$ | $\delta e$ | Su     | Sv     | Rotação |
|-------|----------|----------|------------|------------|--------|--------|---------|
| P2    | 1213.869 | 1018.212 | 0.0011     | 0.0011     | 0.0012 | 0.0010 | 38.19°  |
| P3    | 1000.000 | 1581.868 | 0.0016     | 0.0010     | 0.0016 | 0.0010 | 180.00° |
| P4    | 1197.186 | 1640.683 | 0.0022     | 0.0012     | 0.0022 | 0.0010 | 162.82° |
| P5    | 1214.043 | 1977.340 | 0.0034     | 0.0013     | 0.0035 | 0.0012 | 168.34° |
| P6    | 1232.502 | 988.081  | 0.0014     | 0.0013     | 0.0015 | 0.0011 | 40.49°  |

# Resultados Preliminares

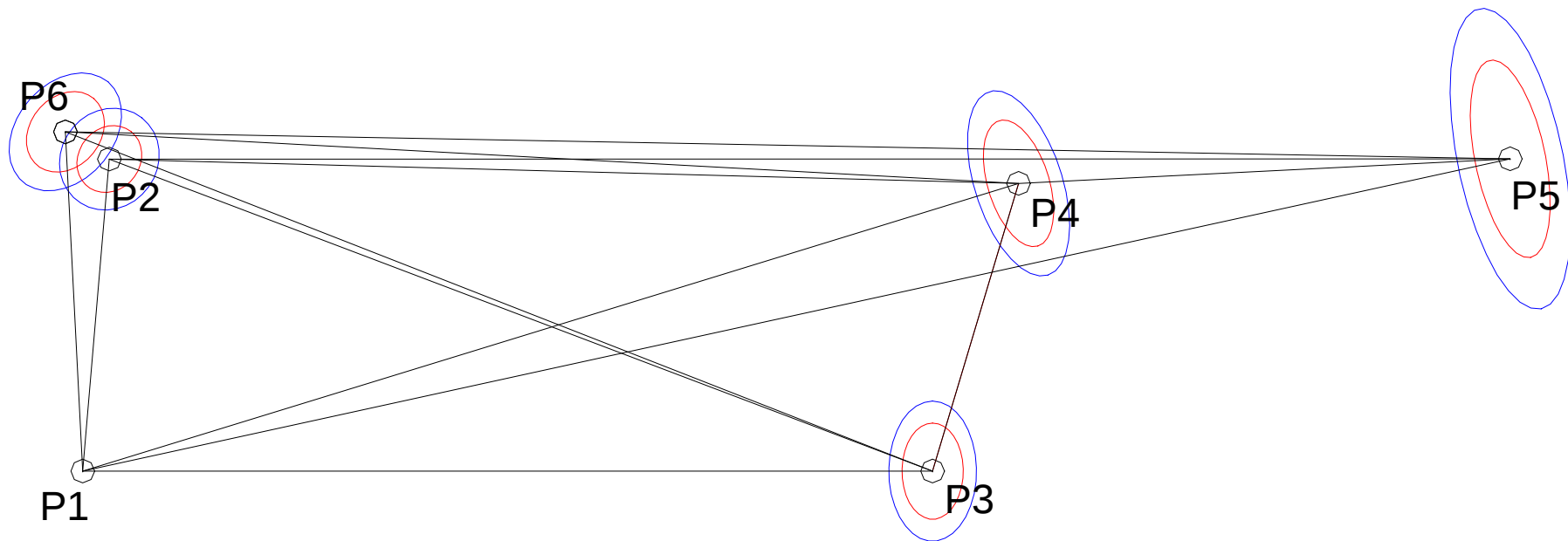
## Campanha maio de 2006



| Pilar | Norte    | Leste    | $\delta n$ | $\delta e$ | Su     | Sv     | Rotação |
|-------|----------|----------|------------|------------|--------|--------|---------|
| P2    | 1213.873 | 1018.211 | 0.0008     | 0.0007     | 0.0008 | 0.0007 | 38.20°  |
| P3    | 1000.000 | 1581.868 | 0.0011     | 0.0007     | 0.0011 | 0.0007 | 0.00°   |
| P4    | 1197.189 | 1640.684 | 0.0014     | 0.0008     | 0.0015 | 0.0007 | 162.82° |
| P5    | 1214.041 | 1977.344 | 0.0022     | 0.0009     | 0.0023 | 0.0008 | 168.34° |
| P6    | 1232.506 | 988.083  | 0.0009     | 0.0009     | 0.0010 | 0.0008 | 40.49°  |

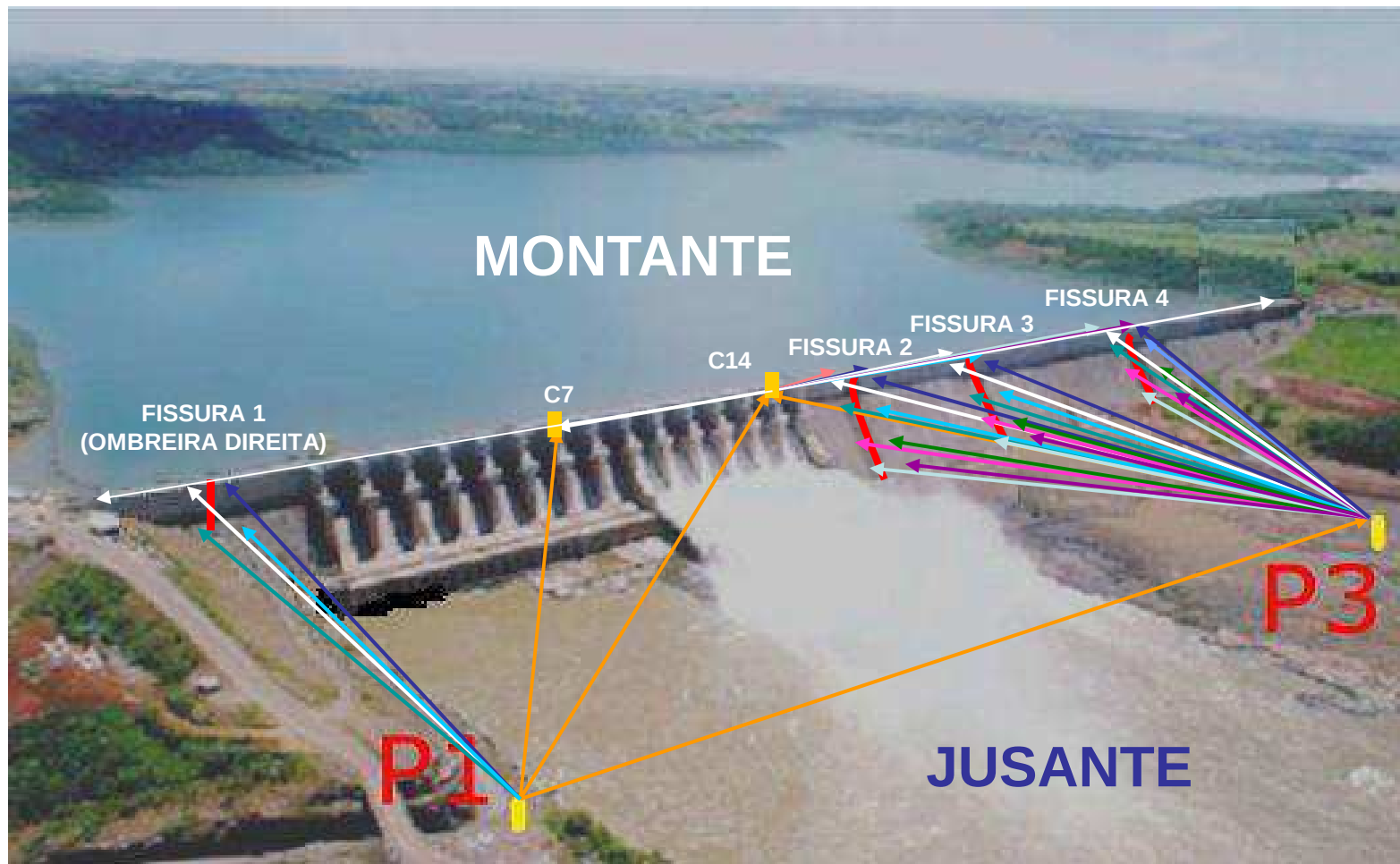
## Resultados Preliminares

Campanha agosto de 2005 (azul) e maio de 2006 (vermelho)

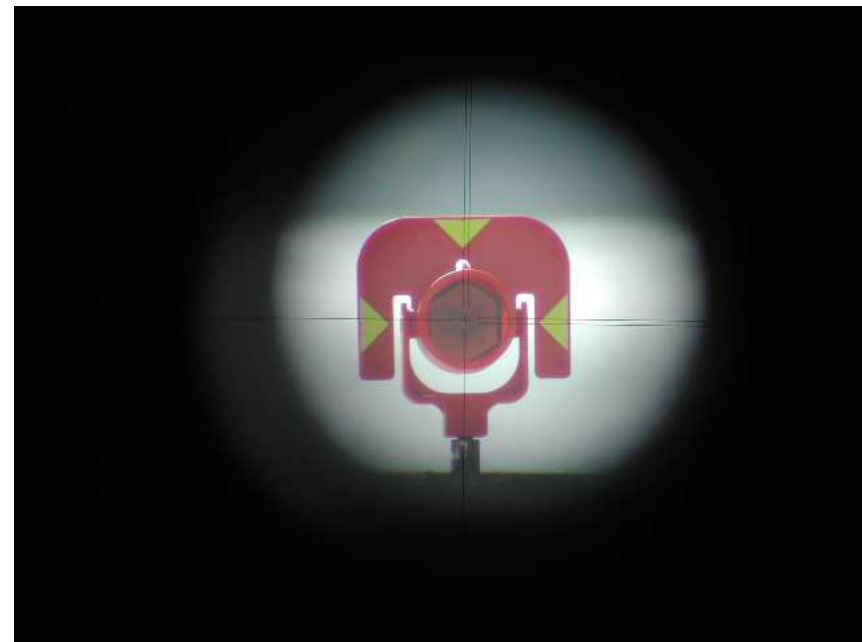


| Pilar | Norte  | Leste  |
|-------|--------|--------|
| ===== |        |        |
| P2    | -0,004 | 0,001  |
| P3    | 0,000  | 0,000  |
| P4    | -0,003 | -0,001 |
| P5    | 0,002  | -0,004 |
| P6    | -0,004 | -0,002 |

## Monitoramento das fissuras da Barragem de Salto Caxias (Irradiação)

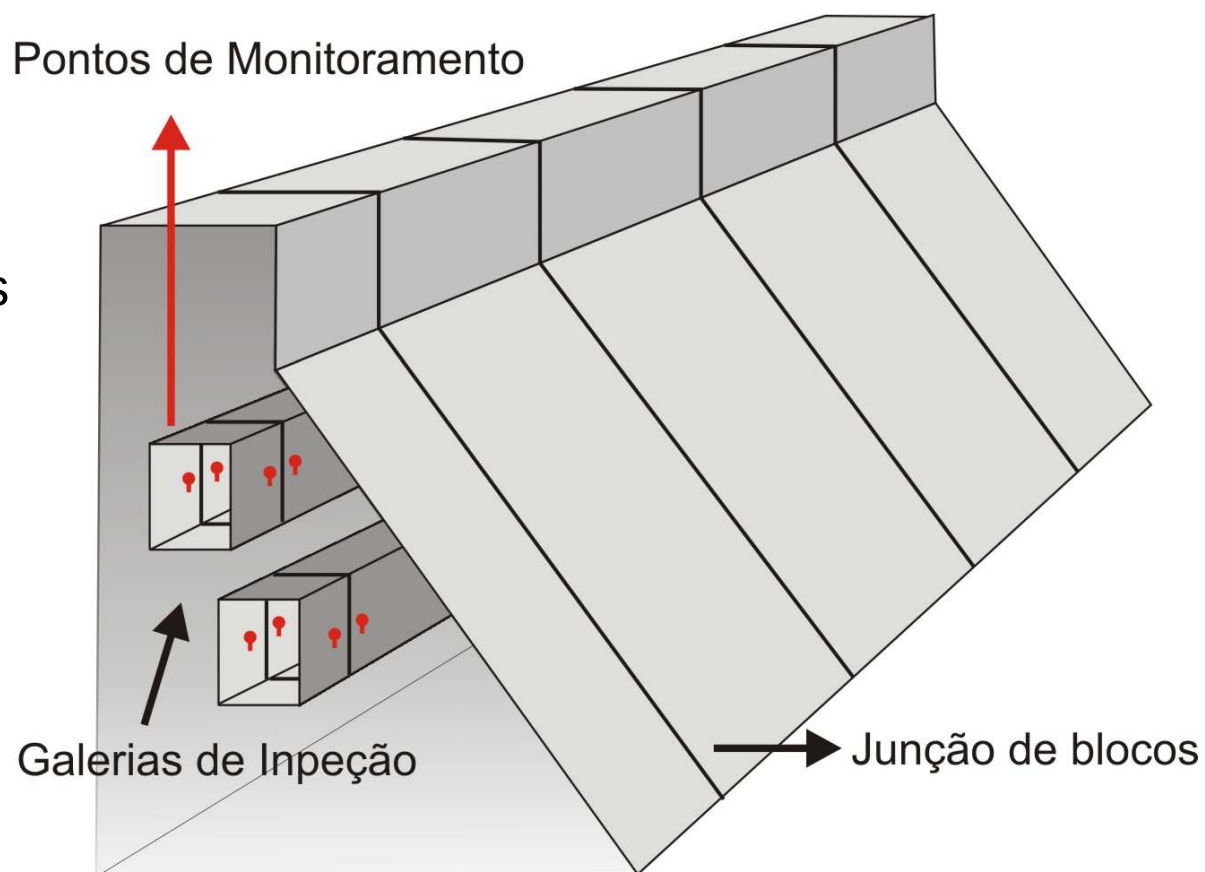


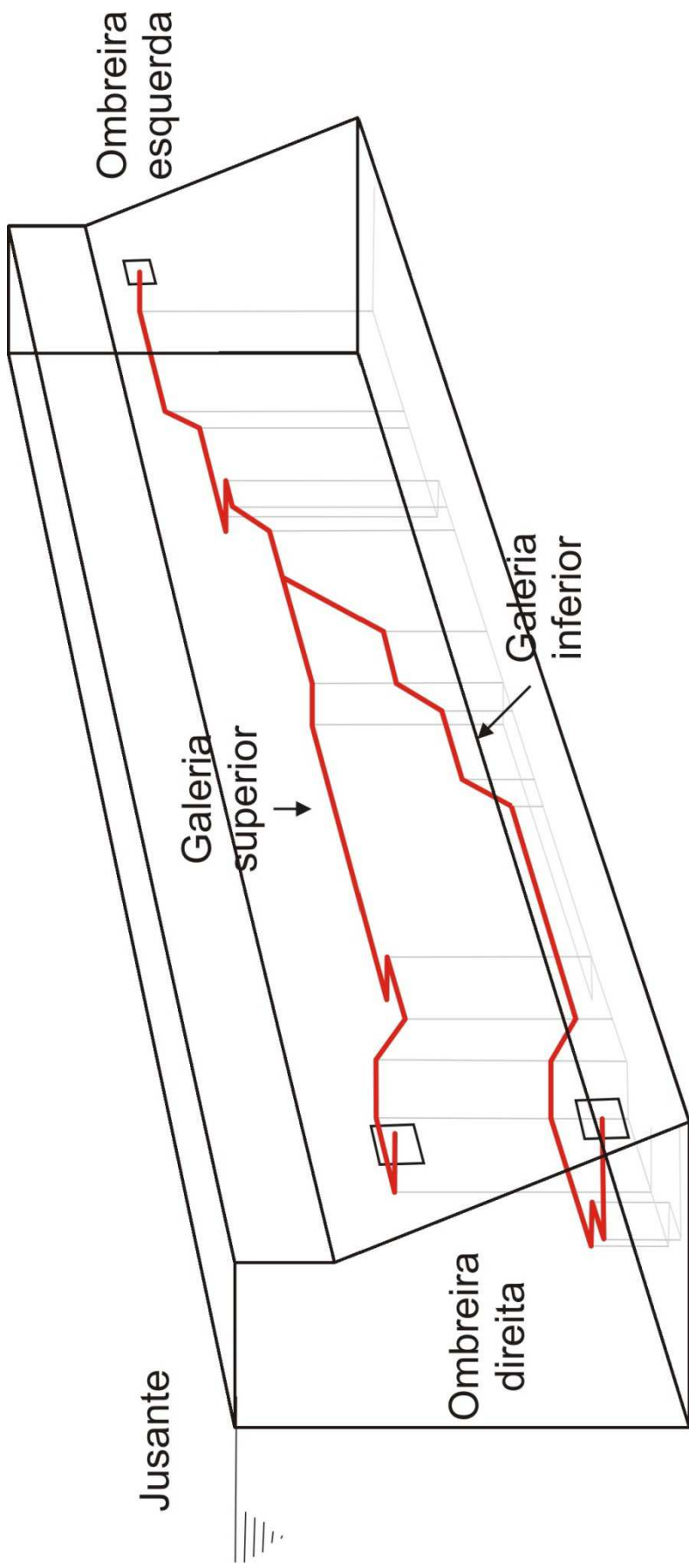
Pontaria nos alvos instalados próximos as fissuras a jusante da barragem.



## Levantamentos Realizados nas Galerias de Inspeção (Poligonação)

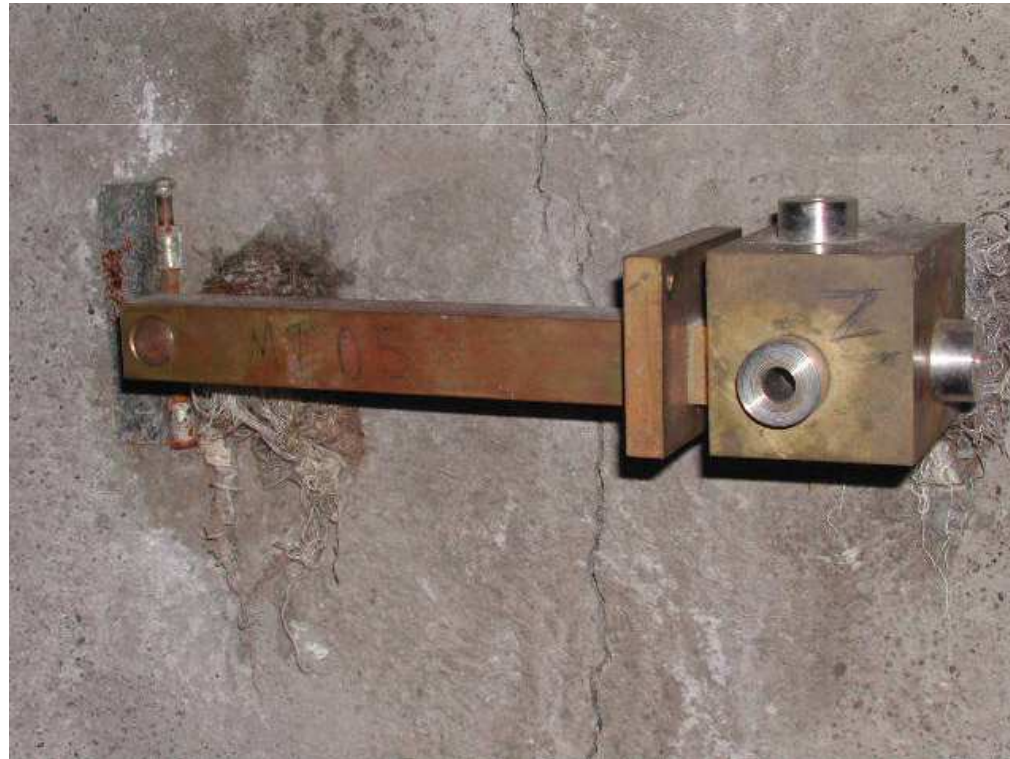
As galerias de inspeção são utilizadas para visitas técnicas, manutenção e leituras dos instrumentos específicos de monitoramento da barragem





Os medidores triortogonais possibilitam a medição dos três componentes dos deslocamentos diferenciais entre blocos:

- abertura e fechamento de junta;
- recalque diferencial entre blocos;
- deslizamento horizontal entre blocos.



**Levantamentos  
Altimétricos**

Métodos Diretos

Nivelamento Hidrostático

Nivelamento Geométrico \*

Métodos Indiretos

Nivelamento Barométrico

Nivelamento Utilizando GPS

Nivelamento Trigonométrico\*

# Exemplo 3: MONITORAMENTO DE RECALQUES – EDIFÍCIO THE ROYAL PLAZA

**Créditos: Projeto final de Thiago Schroeder Salomão - 2008**

**Objetivo:** determinação de desníveis com nivelamento geométrico de primeira ordem para determinação de recalques em elementos pré-definidos da estrutura (pilares) pela comparação temporal dos desníveis obtidos.





## MONITORAMENTO DE RECALQUE

O monitoramento auxilia na verificação da interação estrutura-solo.

Recalque (r)

$$r = h_{t1} - h_{t2}$$

É a diferença de cota num ponto em dois instantes quaisquer (NBR 6122 – projeto e execução de fundações)

## NECESSIDADE DE PONTOS FIXOS

Bench-marks: referência de nível profunda. Utilizados para controle de recalques.



## PONTOS A SEREM MONITORADOS



## ALGUNS RESULTADOS

Recalques obtidos em duas campanhas distintas

14/12/07 e 08/01/08 (25 pontos monitorados)

Recalque mínimo: 0,4mm

Recalque máximo: 1,1mm

08/01/08 e 08/05/08 (20 pontos monitorados)

Recalque mínimo: 0,01mm

Recalque máximo: 4,8mm

# **Exemplo 4: PROJETO DE MONITORAMENTO DE UMA VIGA**

**Créditos: Prof. Carlos Aurélio Nadal (Disciplina de Topografia Industrial)**

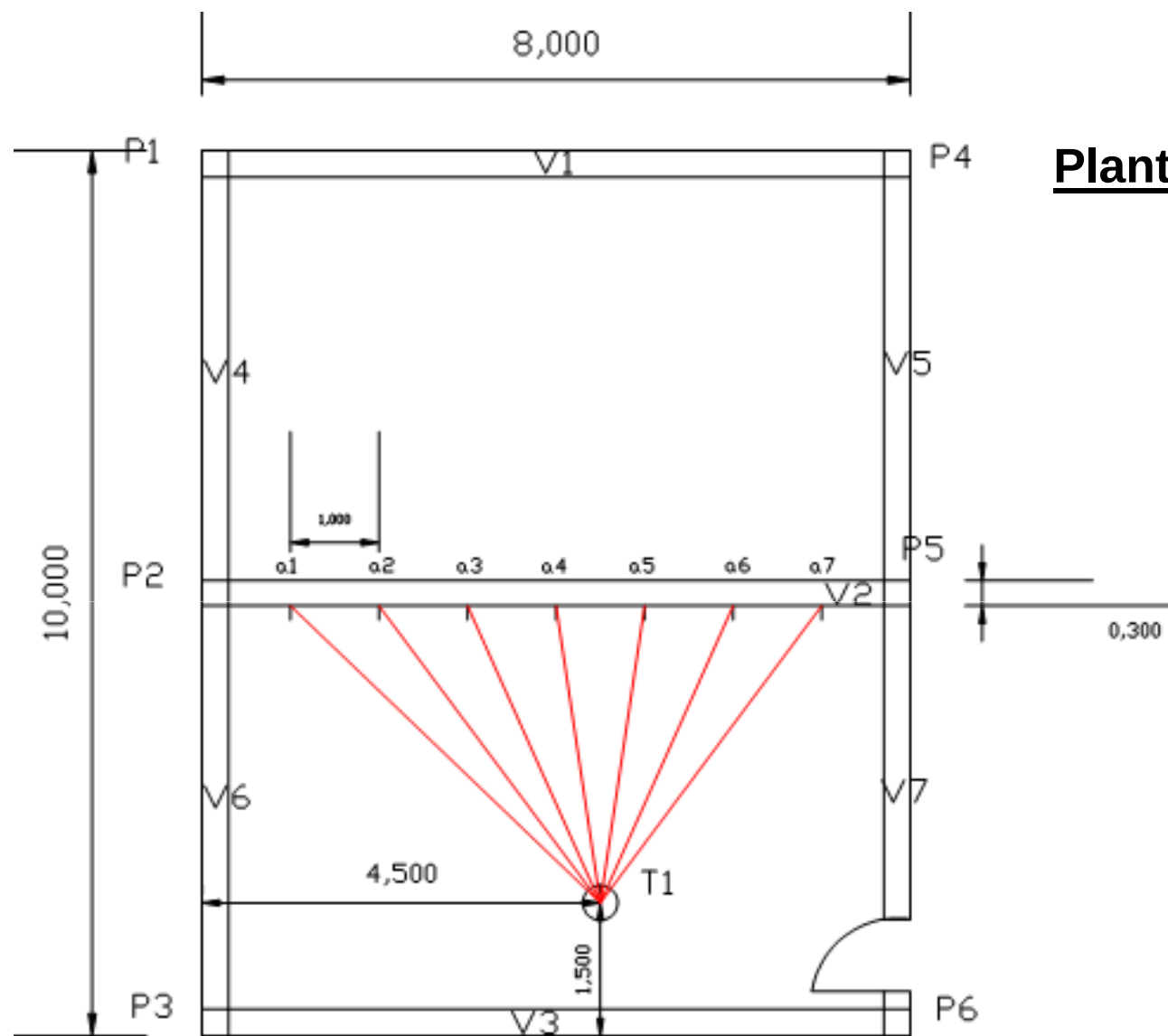
## **MONITORAMENTO DE UMA VIGA**

Seja monitorar os deslocamentos de uma viga de seção retangular (0,30mx0,50m) situada em um pórtico, no centro de uma sala conforme a planta e elevação fornecidos a seguir.

Será utilizada estação total a ser instalada no ponto T1, para visar os alvos a1, a2..., a7 situados no centro da face da viga.

A precisão nominal angular da estação utilizada é de 5", já sua precisão nominal linear é de  $3\text{mm} \pm 3\text{ppm}$ . A precisão da medida da altura da estação total é igual a  $\pm 1\text{mm}$ .

Calcular qual a precisão das coordenadas dos alvos projetando o levantamento.



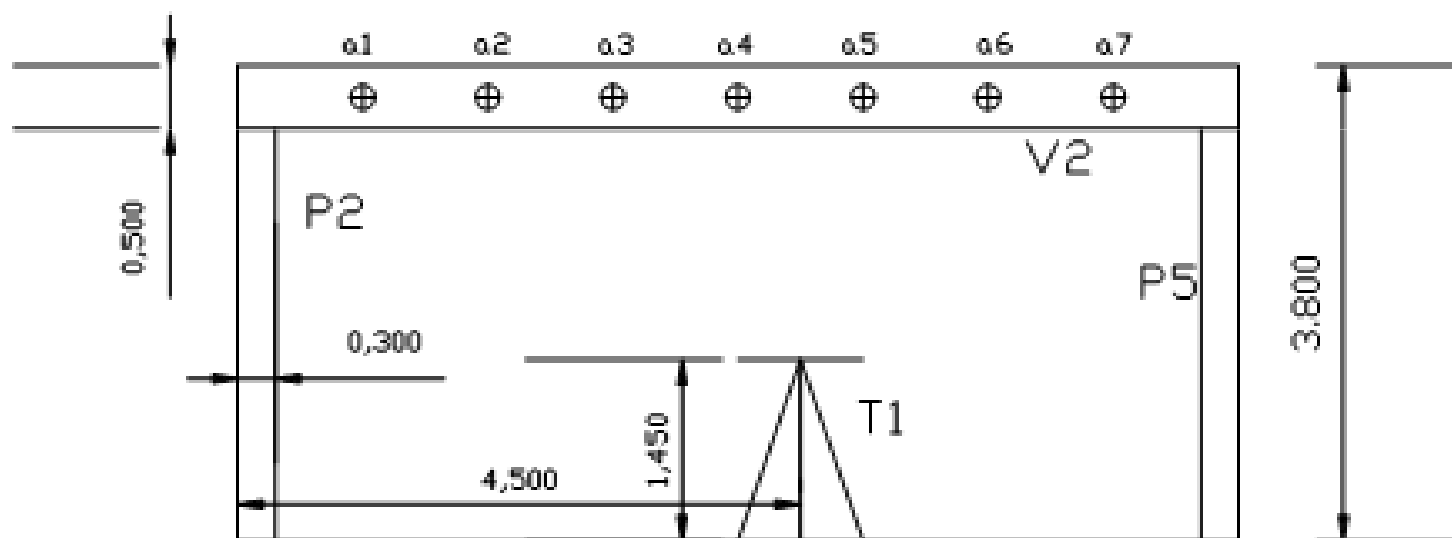
## Planta da sala

Projeto de monitoramento da viga V2

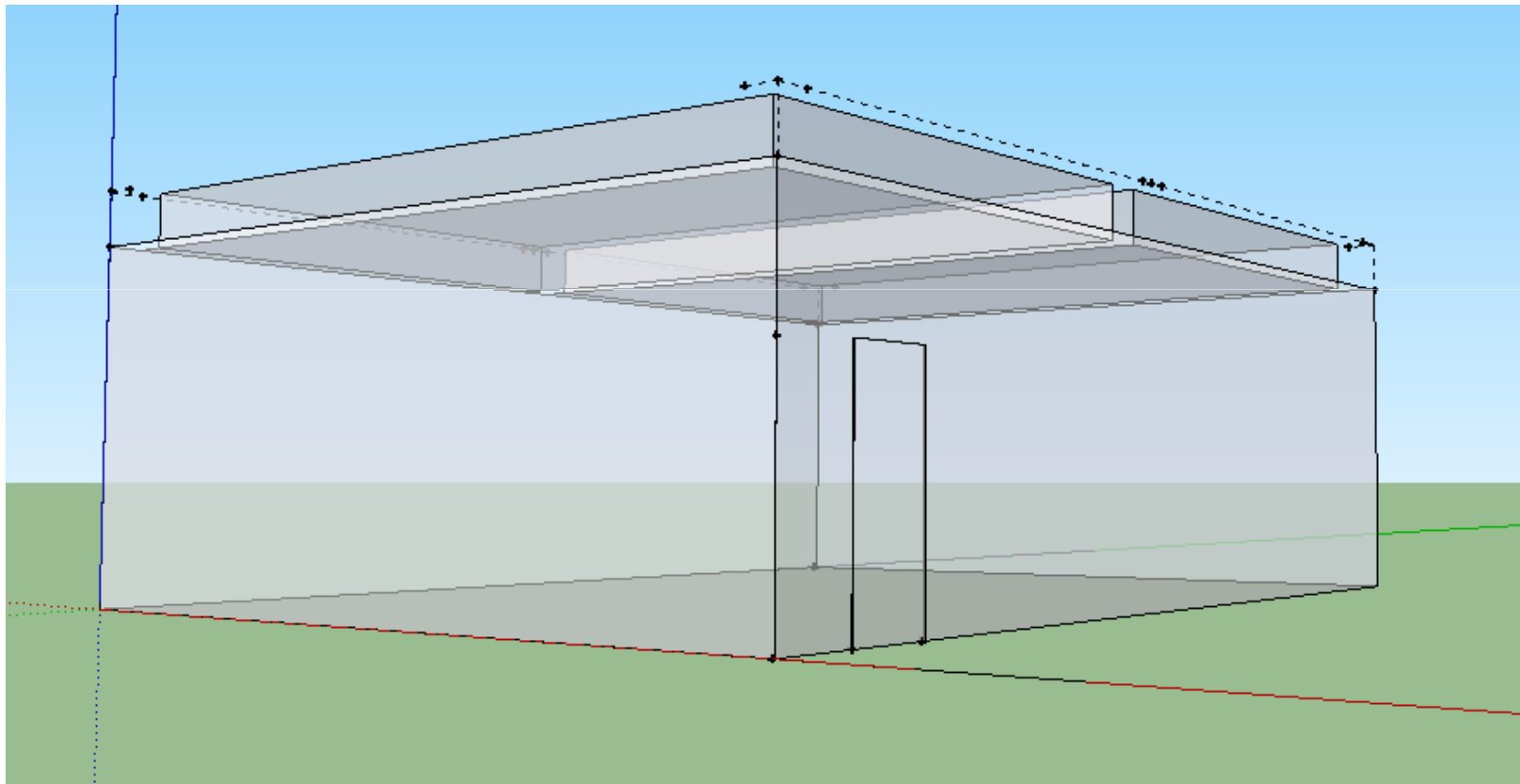
Convenções:

P1 pilar V1 viga a1 alvo T1 Estação total

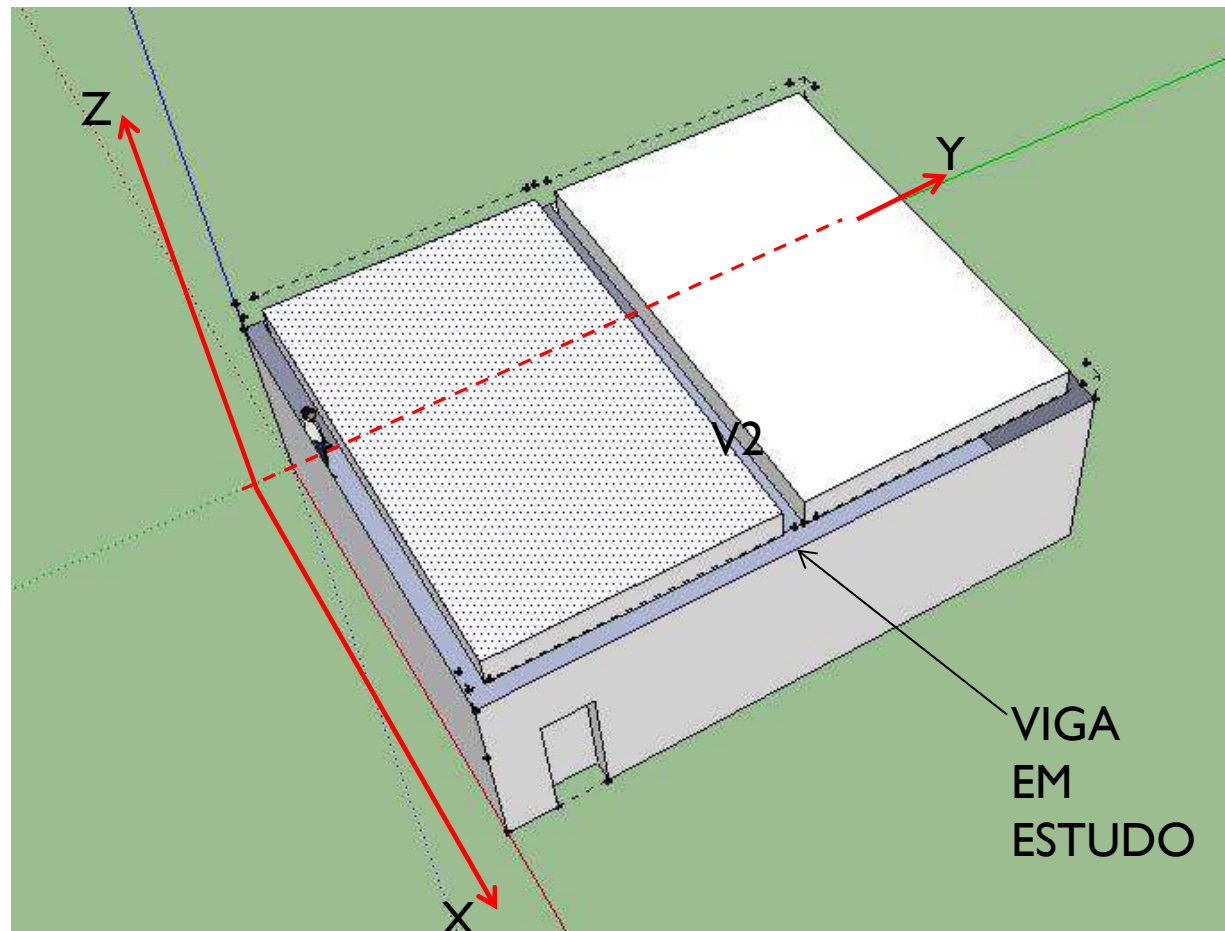
## Elevação da sala



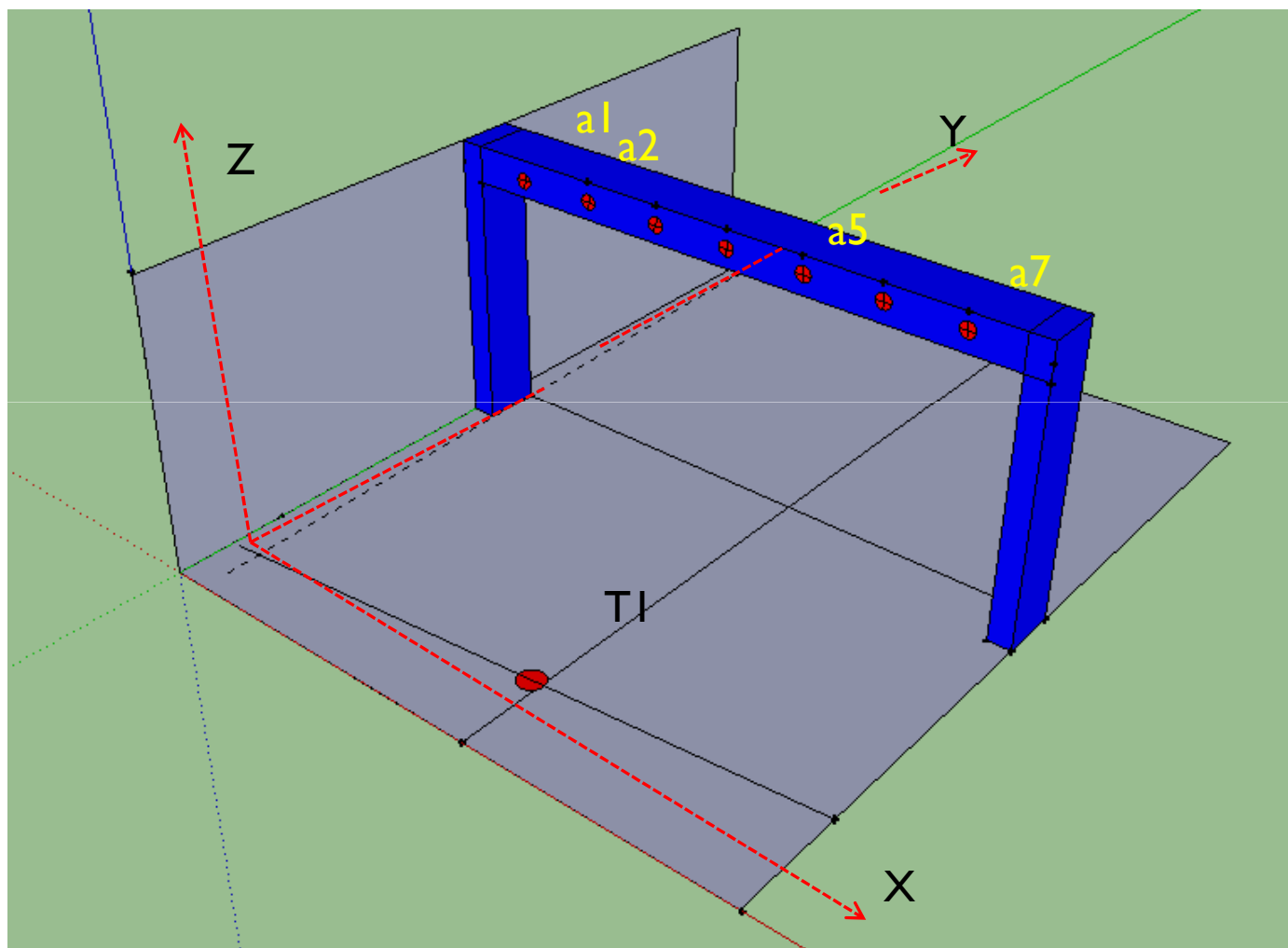
# VISÃO TRIDIMENSIONAL DA SALA



Colocando-se um sistema de coordenadas cartesianas tridimensionais na sala conforme esquematizado abaixo pode-se obter as coordenadas iniciais aproximadas dos pontos, supondo o eixo Y como origem das contagens de azimutes



# DISPOSIÇÃO ESQUEMÁTICA DOS ALVOS



### Coordenadas aproximadas dos alvos

| ponto | X(m)  | Y(m)  | Z(m)  |
|-------|-------|-------|-------|
| a1    | 1,000 | 4,850 | 3,550 |
| a2    | 2,000 | 4,850 | 3,550 |
| a3    | 3,000 | 4,850 | 3,550 |
| a4    | 4,000 | 4,850 | 3,550 |
| a5    | 5,000 | 4,850 | 3,550 |
| a6    | 6,000 | 4,850 | 3,550 |
| a7    | 7,000 | 4,850 | 3,550 |

### Coordenadas aproximadas da estação

| ponto | X(m)  | Y(m)  | Z(m)  |
|-------|-------|-------|-------|
| T1    | 4,500 | 1,500 | 1,450 |

## **Cálculo dos valores aproximados das observações:**

- Cálculo da distância espacial entre os pontos T1 e ai

$$d_{T1ai} = [(x_{ai} - x_{T1})^2 + (y_{ai} - y_{T1})^2 + (z_{ai} - z_{T1})^2]^{1/2}$$

- Cálculo do ângulo zenital entre T1 e ai

$$V_{T1ai} = \arccos \frac{z_{ai} - z_{T1}}{[(x_{ai} - x_{T1})^2 + (y_{ai} - y_{T1})^2 + (z_{ai} - z_{T1})^2]^{1/2}}$$

- Cálculo do azimuth entre os pontos T1 e ai

$$A_{T1ai} = \arctg \frac{x_{ai} - x_{T1}}{y_{ai} - y_{T1}}$$

- Cálculo das direções horizontais

$$H_{T1ai} = A_{T1ai} - A_{T1a1}$$

$$A_{T1a1} = \text{azimute da direção estação alvo a1}$$

## Cálculo dos valores aproximados das observações:

| <b>direção</b> | <b>Azimute<br/>graus</b> | <b>Ang.<br/>Vertical<br/>graus</b> | <b>Distância<br/>(m)</b> | <b>Direção<br/>Horizontal<br/>graus</b> |
|----------------|--------------------------|------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|
| T1-a1          | 313,7455°                | 66,56565°                          | 5,280388                 | 0                                       |
| T1-a2          | 323,2672°                | 63,32546°                          | 4,677873                 | 9,521625                                |
| T1-a3          | 335,879°                 | 60,2248°                           | 4,228771                 | 22,13347                                |
| T1-a4          | 351,5111°                | 58,20117°                          | 3,985285                 | 37,76551                                |
| T1-a5          | 8,488944°                | 58,20117°                          | 3,985285                 | 54,7434                                 |
| T1-a6          | 24,12098°                | 60,2248°                           | 4,228771                 | 70,37543                                |
| T1-a7          | 36,73283°                | 63,32546°                          | 4,677873                 | 82,98728                                |

Para estudo de propagação de variâncias num projeto de levantamentos, adota-se o preconizado por Chrzanowski 1977 "*Design and error analysis of surveying projects*", a tolerância (erro máximo admissível) igual a  $3\sigma$ , equivalente a probabilidade normal de 99,9%.

Tolerância angular = 15"

Tolerância linear = 9mm±9ppm

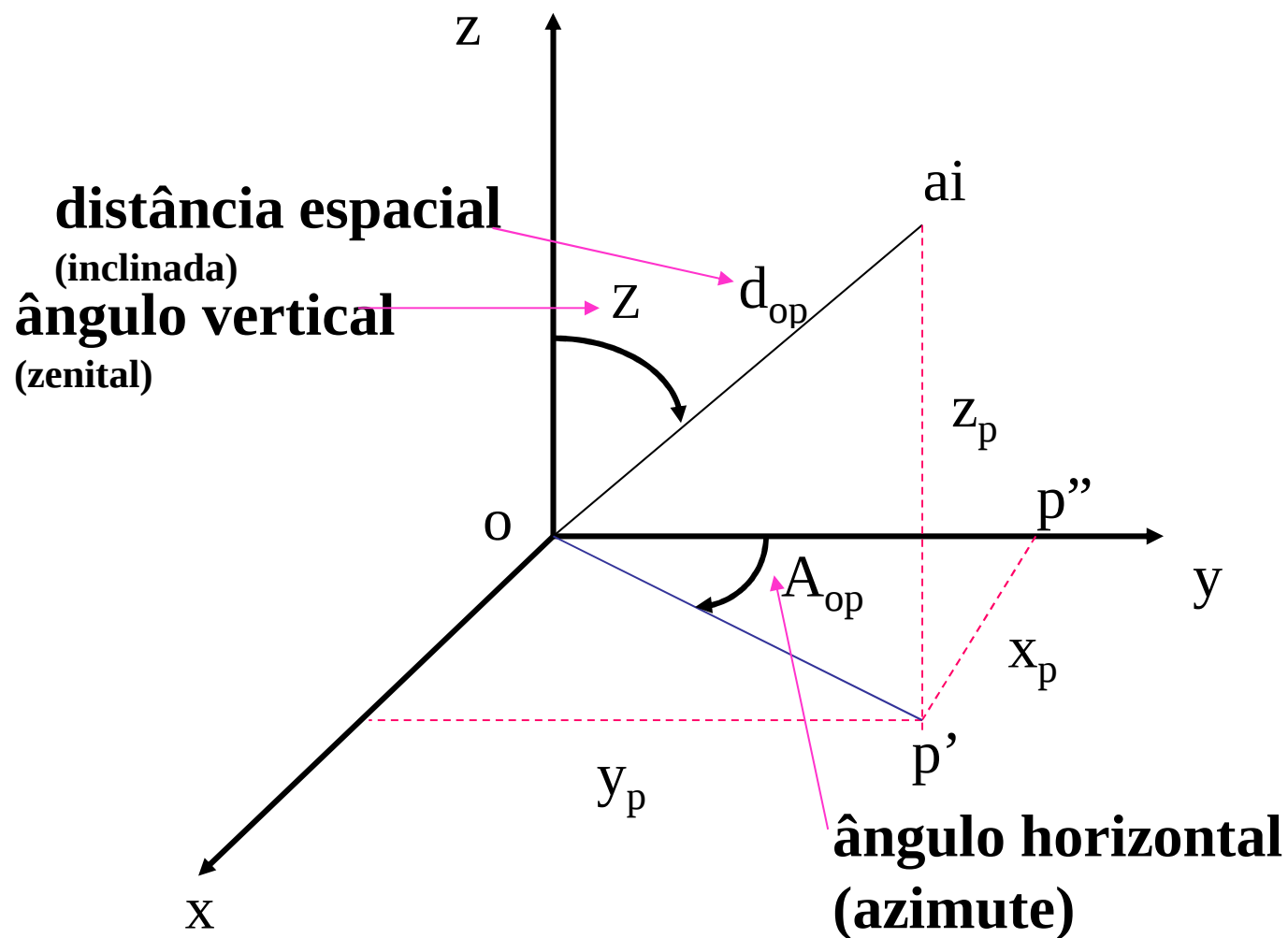
Tolerância na altura da estação = 3mm

$1\sigma \approx 68\%$

$2\sigma \approx 95\%$

$3\sigma \approx 99,7\%$

Considerando um sistema de coordenadas com origem no ponto cardã (O)



## Equações do posicionamento neste sistema

$$x_{ai} = d_{T1ai} \sin Z_{T1ai} \sin A_{T1ai}$$

$$y_{ai} = d_{T1ai} \sin Z_{T1ai} \cos A_{T1ai}$$

$$z_{ai} = d_{T1ai} \cos Z_{T1ai}$$

Que pode ser simplificado na forma:

$$x=d \sin Z \sin A$$

$$y=d \sin Z \cos A$$

$$z=d \cos Z$$

## A Lei de Propagação de Covariâncias

$$\Sigma_Y = G \Sigma_X G^T$$

Onde  $G$  é a matriz das derivadas parciais da função original (matriz jacobiana) e  $\Sigma_X$  é a matriz variância covariância das observações ( $d, Z, A, I$ ). Para um alvo:

$$G = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial d} & \frac{\partial x}{\partial Z} & \frac{\partial x}{\partial A} & \frac{\partial x}{\partial I} \\ \frac{\partial y}{\partial d} & \frac{\partial y}{\partial Z} & \frac{\partial y}{\partial A} & \frac{\partial y}{\partial I} \\ \frac{\partial z}{\partial d} & \frac{\partial z}{\partial Z} & \frac{\partial z}{\partial A} & \frac{\partial z}{\partial I} \end{bmatrix}$$

$$\Sigma_X = \begin{bmatrix} \sigma_d^2 & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \sigma_Z^2 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \sigma_A^2 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \sigma_I^2 \end{bmatrix}$$

## Derivadas parciais das funções

$$\frac{\partial x}{\partial d} = \text{sen}Z \text{sen}A$$

$$\frac{\partial y}{\partial d} = \text{sen}Z \cos A$$

$$\frac{\partial z}{\partial d} = \cos Z$$

$$\frac{\partial x}{\partial Z} = d \cos Z \text{sen}A$$

$$\frac{\partial y}{\partial Z} = d \cos Z \cos A$$

$$\frac{\partial z}{\partial Z} = -d \text{sen}Z$$

$$\frac{\partial x}{\partial A} = d \text{sen}Z \cos A$$

$$\frac{\partial y}{\partial A} = -d \text{sen}Z \text{sen}A$$

$$\frac{\partial z}{\partial A} = 0$$

$$\frac{\partial x}{\partial I} = 0$$

$$\frac{\partial y}{\partial I} = 0$$

$$\frac{\partial z}{\partial I} = 1$$

Resultados para o Alvo a1:

$$\Sigma_{a1} = 10^{-4} \begin{pmatrix} 0.3566 & -0.3401 & -0.2131 \\ -0.3401 & 0.3268 & 0.2040 \\ -0.2131 & 0.2040 & 0.3094 \end{pmatrix}$$

Erros nas coordenadas:

$$e_x = 6,0\text{mm}$$

$$e_y = 5,7\text{mm}$$

$$e_z = 5,6\text{mm}$$

| alvo | Erro em X<br>(mm) | Erro em Y<br>(mm) | Erro em Z<br>(mm) |
|------|-------------------|-------------------|-------------------|
| a1   | 6,0               | 5,7               | 5,6               |
| a2   | 4,8               | 6,4               | 5,9               |
| a3   | 3,2               | 7,1               | 6,2               |
| a4   | 1,2               | 7,6               | 6,4               |
| a5   | 1,2               | 7,6               | 6,4               |
| a6   | 3,2               | 7,1               | 6,2               |
| A7   | 4,8               | 6,4               | 5,9               |

**Conclusão:** com um instrumento desta qualidade somente será possível detectar deslocamentos superiores a 05mm em média.

## **Exemplo 5: CONSTRUÇÃO DO BURJ KHALIFA – Dubai, Emirados Árabes**

- 828m de altura, ~160 andares
- Integração GPS + Estação Total + Sensores de inclinação



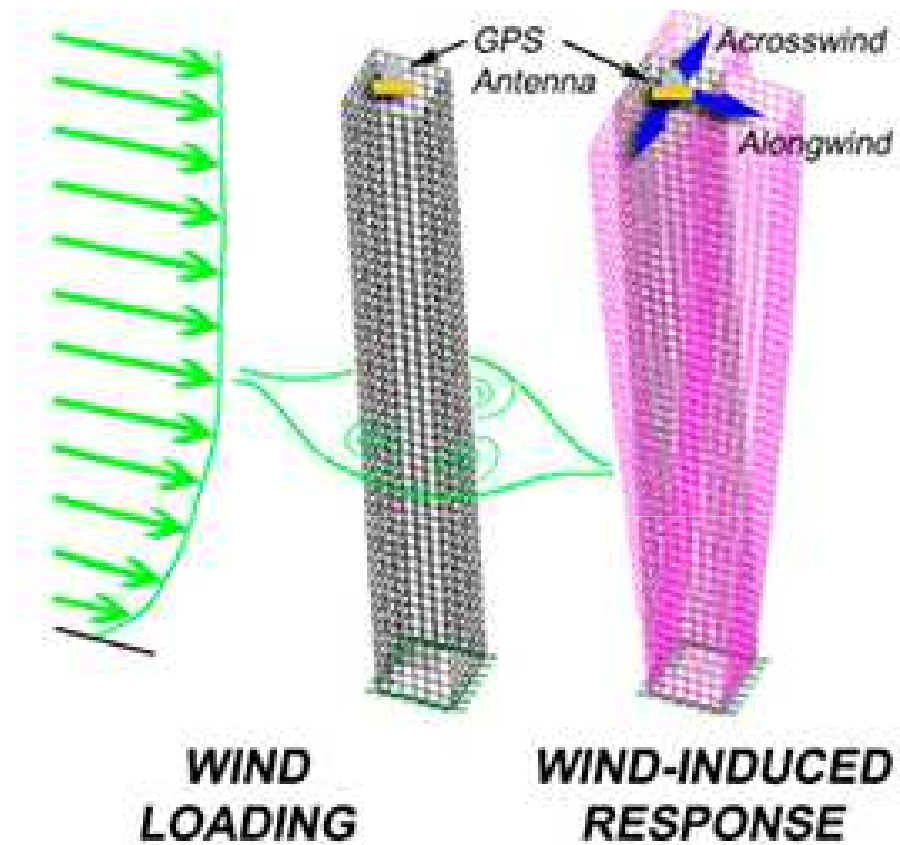
Ver arquivo abd11.pdf

## Exemplo 6: CONSTRUÇÃO DO LOTTE WORLD TOWER – Seul, Coreia do Sul

- 555m de altura, ~120 andares
- Integração GPS + Sensores de inclinação



Fonte: <http://gpsworld.com/gnss-monitoring-scrapes-the-sky/>  
Novembro de 2015



Fonte: <http://dynamo.nd.edu/shm.html>

Laboratório de Dinâmica Estrutural e Monitoramento da Universidade de Notre Dame