

7. Cong. Nac. Enga. de Agrimensura
LOCAÇÃO DE PRECISÃO DE UM ACELERADOR DE PARTÍCULAS
Salvador, 1996

Jorge Pimentel Cintra as
Livre-Docente da Escola Politécnica da USP
Professor de Técnicas Topográficas e Cartográficas
FAX: (011) 818-5716



BR0140516

INIS-BR--3786

RESUMO

precisão e confiabilidade dos

A locação é uma tarefa topográfica bastante específica, e que costuma exigir trabalhos para evitar conseqüências desastrosas na implantação de projetos.

Em função das diversas etapas, tarefas e finalidades de obra, costumam-se exigir diferentes precisões, sendo necessário, então, utilizar equipamentos adequados a cada caso: teodolito, trena, distanciômetro, fio de invar.

O presente trabalho, baseado na experiência de locação de equipamentos de um acelerador de partículas, procura apresentar os princípios gerais de locação de precisão: definição de tolerâncias, técnica das precisões crescentes, esquema de locação, avaliação de metodologias, análise de sensibilidade, formas de controle da qualidade do trabalho, etc.

ABSTRACT

Precise location is a specific survey job that involves a high skilled work to avoid unrecoverable results at the project installation.

As a function of the different process stages, different specifications can be applied, invoking different instruments: theodolite, measurement tape, distanciometer, invar wire.

This paper, based on experience obtained at the installation of particle accelerator equipment, deals with general principles of precise location: Tolerance definitions, increasing accuracy techniques, schedule of locations, sensitivity analysis, quality control methods.

1. Descrição do Problema

A locação é uma tarefa topográfica bastante conhecida e com métodos consolidados. No entanto, quando se fala em locação de precisão e atingir a casa do décimo de milímetro, a coisa muda de figura.

O problema em questão, originário de experiência vivida, consistiu fundamentalmente na locação de um acelerador de partículas atômicas, cujo desenho se mostra na figura 1.

Nesse esquema representa-se o acelerador central (UVX RING) que corresponde a um anel circular com diâmetro de 26,6000 m formado por 12 dipolos como AB no interior do qual as partículas são aceleradas e que, através de sistemas adequados, são expelidas radialmente (linhas tracejadas) para atingir outros equipamentos contendo o objeto de experiências científicas.

Os 12 dipolos devem distribuir-se em espaçamentos iguais formando uma figura simétrica de pequenos trechos de reta, tangentes

ao círculo fornecido, conforme se detalhará mais adiante.

Para efeitos de locação existe ainda um acelerador linear (LINAC) e uma série de pontos fiduciais, como a, b, c, etc, fixados no pavimento desse hall experimental.

O problema consiste em determinar um sistema de amarração e coordenadas capaz de locar os pontos de amarração (a, b, c, ...) e o acelerador linear com precisão de milímetro e os dipolos com precisão de 0,1 mm.

2. Locação para a Construção da Obra e da Rede Interna

Como toda construção de certa importância, foi necessária a definição de uma rede (poligonal) para a obra de engenharia civil: levantamento do terreno, construção dos edifícios, etc. A precisão ou exatidão requerida foi:

*_{xy} = 1 cm (precisão horizontal)

*_z = 1 cm (ou melhor) (precisão vertical)

32 / 03

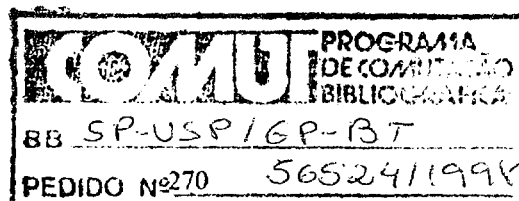
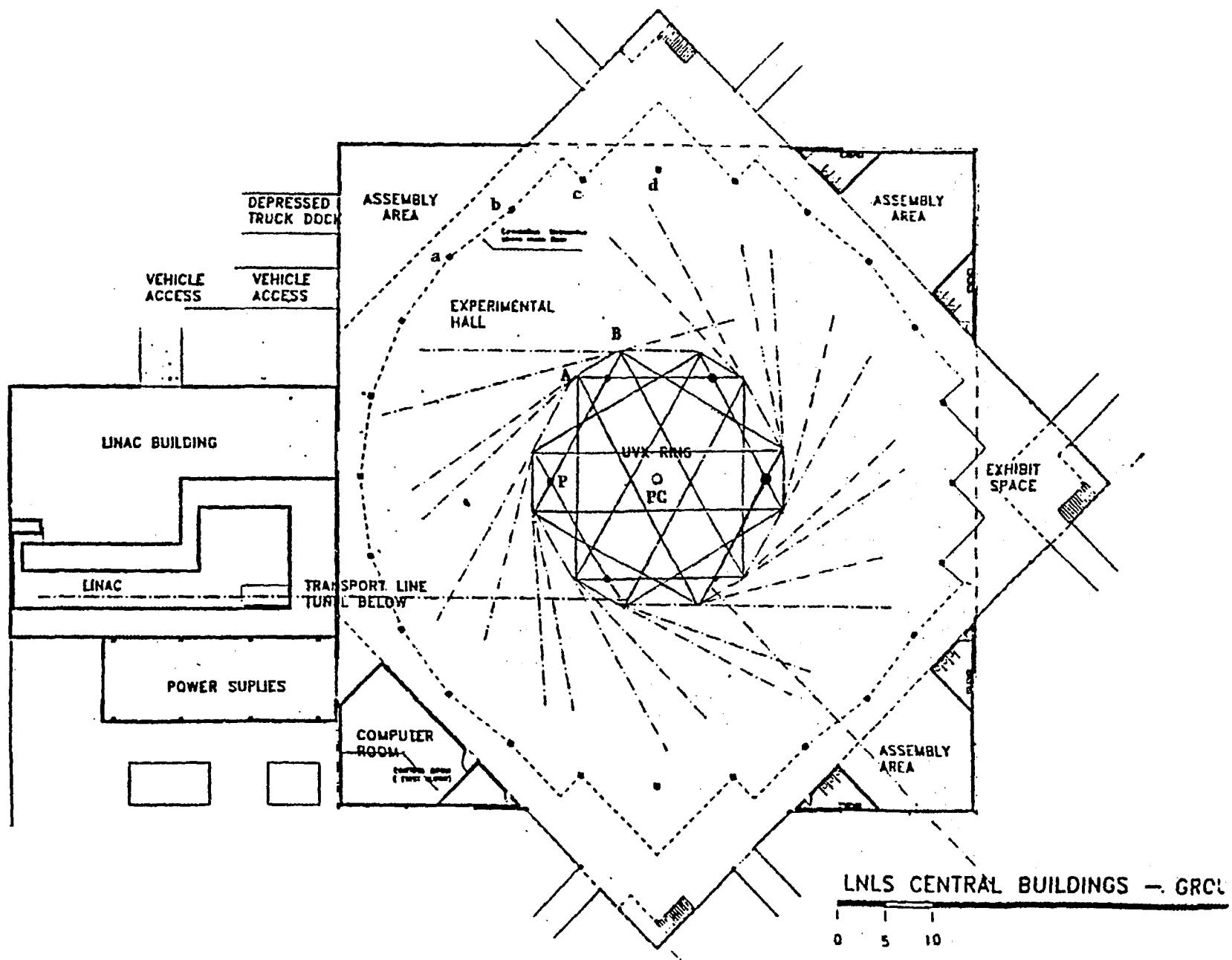


Figura 1 - Acelerador de Partículas Atômicas



- rede interna consiste de pinos referenciais construídos segundo o esquema da figura 2, em uma caixa enterrada com tampa removível situada ao nível do solo.

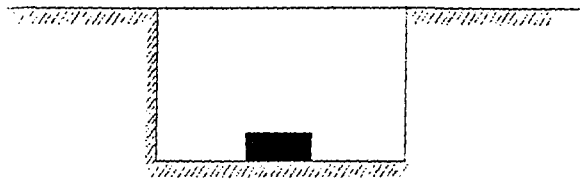


Figura 2 - Esquema das referências da malha interna

Essa malha, sistema referencial, foi utilizada para locar diversos elementos: suportes, blindagens, outras marcas auxiliares no chão, pilares, linhas e equipamentos em geral.

A precisão especificada e atendida foi:

$$\diamond_{xy} = 1 \text{ a } 2 \text{ mm}$$

$$\diamond_h \bullet 1 \text{ mm}$$

Para essas duas tarefas não foi necessário utilizar muitos equipamentos especiais. Pensando em não duplicar equipamentos e utilizar um conjunto que servisse para as duas redes acima mencionadas foram utilizados basicamente:

- teodolitos T3000
- distanciômetro DI 2002
- nível automático NA2 com placa micrométrica GDM 3
- outros acessórios e equipamentos auxiliares

Esses equipamentos, ou outros semelhantes, permitem a obtenção da precisão desejada, sem maiores problemas. A metodologia tradicional empregada não apresenta grandes novidades e por isso passamos diretamente à locação de precisão.

3. Locação do Anel e dos Dipolos

Uma proposta existente previa a construção de 6 pilares, como P e seus homólogos, na figura 1. A partir desses seria feita toda a locação, para a qual se exigia uma precisão dada por:

$$\diamond_{xy} = \diamond_z = 0,1 \text{ mm}$$

Tendo em conta as implicações de construção (pilares), os erros provenientes do sistema de centragem forçada e a dificuldade de montar uma rede (6 vértices) coerente com essa precisão, propusemos uma alternativa, para simplificar e

garantir a exatidão, que foi aceita pelos responsáveis.

Essa alternativa consistiu na construção de um único pilar central (PC na figura 1) com um sistema de centragem forçada e a partir do qual se faria toda a locação através de uma metodologia que será descrita a seguir.

3.1 Precisão do Instrumento de Medição: Fita de Invar

Em função da precisão exigida mostra-se insuficiente qualquer distanciômetro eletrônico disponível no mercado ($1 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$). Procurou-se então uma alternativa com o uso de fitas de invar, calibradas, cuja precisão é da ordem de 50μ ou $0,05 \text{ mm}$.

Como esse valor é só metade da precisão que se deseja, tornou-se importante realizar uma análise de sensibilidade combinada com a metodologia a ser empregada.

3.2 Análise de Sensibilidade

A pergunta fundamental é: qual a capacidade da fita invar para medir deslocamentos numa dada direção?

De acordo com a figura 3, suponhamos um ponto Q situado a uma distância s de P que sofre deslocamentos ds ou dt para Q1 ou Q2. Se o deslocamento for na direção de s, todo o seu valor ds se reflete no aumento da distância ao ponto P. No entanto, se ocorrer na direção perpendicular dt, nenhuma mudança ocorrerá na distância. Ou seja, a fita tem sensibilidade máxima para medir deslocamentos na sua direção e nenhuma na direção perpendicular.

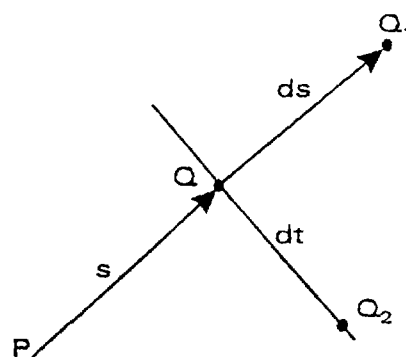


Figura 3 - Esquema de sensibilidade a deslocamentos

Pensando agora em um deslocamento numa direção qualquer como representado na figura 4 e decomposto em duas componentes dx e dy, pergunta-se pelo reflexo desses deslocamentos no aumento ds do comprimento da fita.

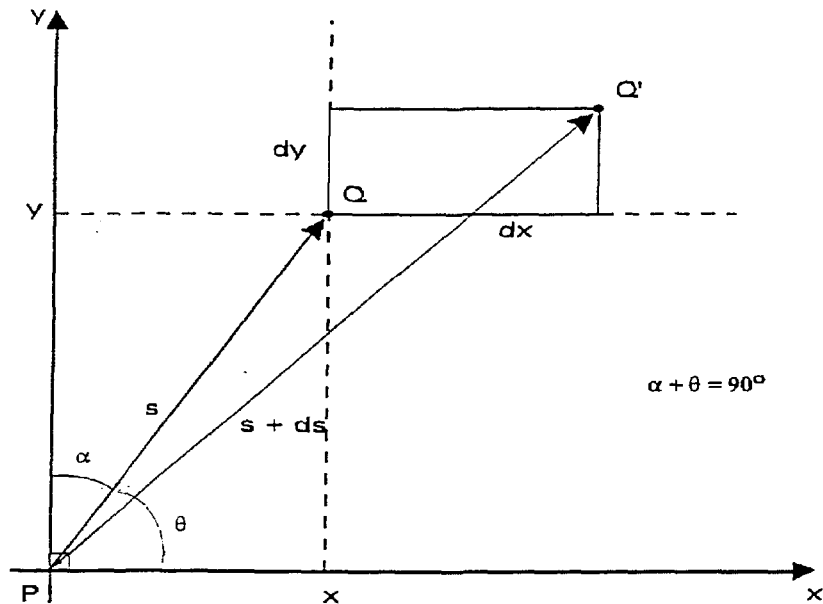


Figura 4 - Esquema de Deslocamento de Q para Q'

Matematicamente temos:

$$ds = \frac{\delta s}{\delta x} dx + \frac{\delta s}{\delta y} dy \quad (1)$$

$$s = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2)$$

De (1), (2) e das derivadas parciais se deduz:

$$ds = ds \cdot \cos\theta + dy \cdot \sin\theta \quad (3)$$

a) Exemplos práticos.

Tomando já o valor numérico para os dipolos, que explicaremos melhor mais adiante, tem-se:

$$y = R = 13.300,0 \text{ mm} \quad (\text{raio do anel})$$

$$x = a = 500,0 \text{ mm} \quad (\text{distância do pino central aos laterais})$$

Se o deslocamento for ao longo de x, de um valor igual à precisão desejada teremos:

$$dx = \Delta x = 0,1 \text{ mm}$$

$$dy = \Delta y = 0,0 \text{ mm}$$

Então:

$$\text{tg}\theta = \frac{13,3}{0,5} \Rightarrow \theta = 87,847...^\circ$$

$$ds = dx \cdot \cos\theta + dy \cdot \sin\theta \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 0,1 \text{ mm} \cdot \cos 87,847...^\circ = 3,76 \mu\text{m}$$

ou seja, a fita é insensível para deslocamentos radicais de 0,1 mm (tangentes ao anel) pois sua precisão é de 50 μm.

Se o deslocamento for, também de 0,1 mm, ao longo de y, teremos:

$$dx = 0,0 \text{ mm}$$

$$dy = 0,1 \text{ mm}$$

$$ds = 0,1 \text{ mm} \cdot \sin\theta = 99,93 \mu\text{m}$$

ou seja, perto da sensibilidade máxima.

b) Estudo de valores limites.

Em função do que ficou visto surge o princípio de que um deslocamento pode ser melhor percebido por duas fitas, medindo distâncias segundo direções convenientes (perpendiculares no caso ideal).

A pergunta então, do ponto de vista prático, é qual o ângulo \square entre a direção do deslocamento x e a direção da fita s para que o deslocamento seja sentido.

Em outros termos, qual o ângulo θ para que um deslocamento dx , em x seja percebido na variação ds .

Na equação (3) com que estamos trabalhando e na situação dos dipolos, vamos supor, a situação em que o deslocamento igual à precisão desejada, se dê totalmente na direção x e que o deslocamento na direção y seja detectado por outra fita, situada em direção mais conveniente.

Então, resumindo os dados temos:

$$ds \geq 50\mu\text{m} \text{ para que a fita seja sensível}$$

$$dx = 0,1\text{mm} = 100\mu\text{m}$$

$$dy = 0,0\text{mm}$$

$$ds = dx \cdot \cos\theta + dy \cdot \sin\theta$$

$$\cos\theta = \frac{ds}{dx} = \frac{50}{100} = \frac{1}{2}$$

$$\text{então } \theta \leq 60^\circ$$

A perda de precisão pode ser expressa da seguinte forma

$$\text{perda} = (1 - \cos\theta) \cdot 100\%$$

E pode-se montar a tabela resumo:

θ	$\cos \theta$	perda
15°	0,97	3%
30°	0,87	13%
45°	0,71	29%
60°	0,50	50%

Esses valores orientam a escolha dos ângulos das fitas com o eixo x e o eixo y

3.3 Locação dos Dipolos

Para entender o que se segue é importante descrever minimamente a geometria dos dipolos, tal como se pode ver na figura 5.

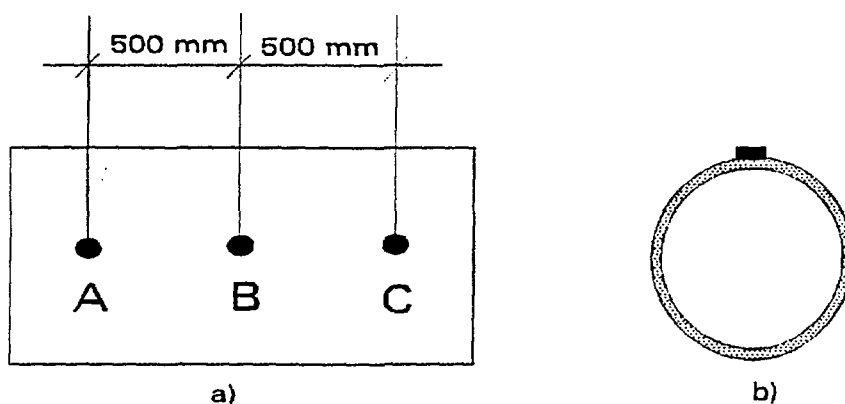


Figura 5 - Dipolos: a) vista de cima b) vista lateral

Nessa figura A, B e C são pinos pensados especificamente para a locação sendo um central (B) e 2 laterais.

A locação inicial, da base de suporte dos dipolos e um primeiro ajuste podem ser feitos, dentro do milímetro, com um distanciômetro eletrônico como o que foi utilizado nas primeira etapas de locação da obra civil.

O ajuste fino, segundo o princípio de precisões crescentes, deve recorrer às fitas de invar.

a) Locação dos pinos centrais.

De acordo com o esquema da figura 6, o primeiro ponto central (dipolo 1) tem uma posição arbitrária, devendo ser fixada somente sua distância R (13.300 mm) ao pilar central PC, através da fita de invar.

A seguir ocorre a locação do ponto central do dipolo 3, que deve distar R do PC e do ponto central do dipolo 1. A fita colocada segundo PC-3 consegue detectar qualquer deslocamento radial acima de 50 μ e a fita colocada segundo 1-3 consegue detectar deslocamentos tangentes ao círculo com boa sensibilidade (perda de 13% já que o ângulo com essa direção é de 30%.

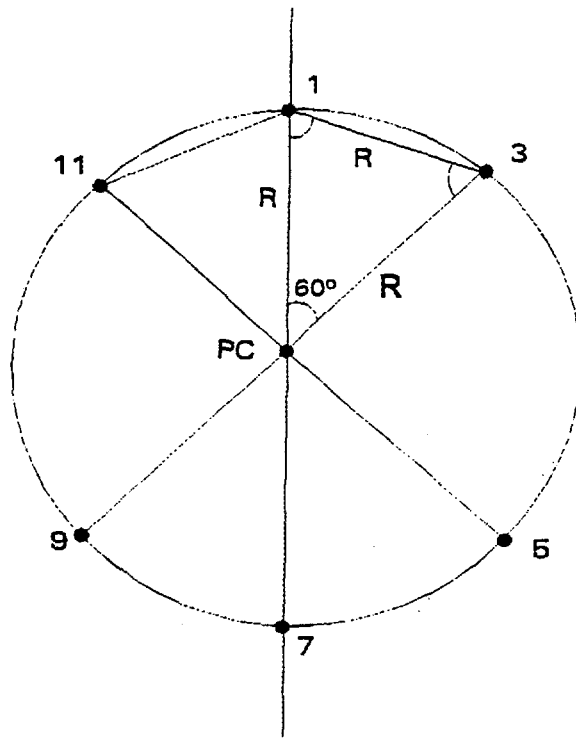


Figura 6 - Localização dos dipolos ímpares

Pelo mesmo esquema consegue-se locar os dipolos ímpares: 5, 7, 9 e 11. Ao final pode-se checar a distância 11-1, que deve ser R. Qualquer erro pode ser distribuído, por exemplo refazendo o ajuste no sentido anti-horário. Com a inversão da

luneta do teodolito pode-se também verificar se os dipolos diametralmente opostos encontram-se alinhados de fato.

A localização dos dipolos pares deve seguir o esquema da figura 7.

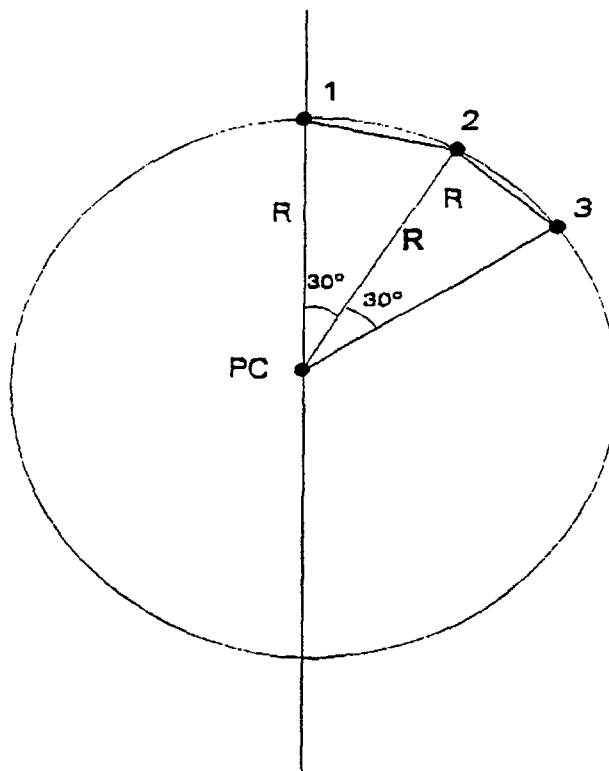


Figura 7 - Localização dos Dipolos Pares

A locação é feita controlando a distância R(PC-2) e a distância correspondente à corda 1-2 que PC-2 se calcula pela fórmula:

$$\text{sen } 15^\circ = \frac{c/2}{R}$$

$$c = 2R \cdot \text{sen } 15^\circ = 6.884,59 \text{ mm}$$

Essa locação pode ser conferida medindo-se a distância 2-3, que deve ter esse mesmo valor.

O mesmo processo permite definir os demais dipolos pares: 4, 6, 8, 10 e 12. Esse conjunto forma ao final um novo hexágono que pode ser conferido já que todos os lados devem ter 13.300 mm.

b) Locação dos pinos laterais de cada dipolo.

Essa tarefa pode ser executada tendo em conta o esquema da figura 8.

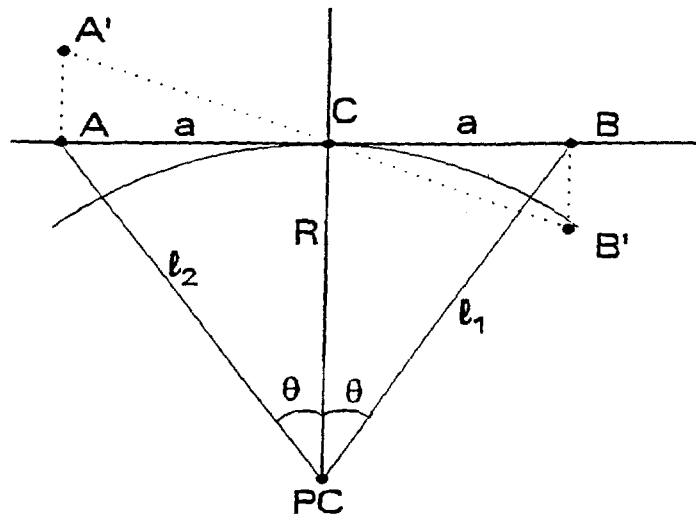


Figura 8 - Locação dos Pinos Laterais

A posição correta pode ser controlada por fitas colocadas segundo as direções PC-A (l2) e PC-B (l1). Na condição de tangência, correspondente à posição correta do dipolo, tem-se $l_1 = l_2 = l$, valor que vem dado pela fórmula:

$$l^2 = R^2 + a^2 = (13.300)^2 + (500)^2$$

$$l = 13.309,40 \text{ mm}$$

A sensibilidade nessa situação é muito boa já que o ângulo θ vale $2^\circ 09'$ e um desalinhamento segundo A'B' provoca um aumento em l2 e uma diminuição em l1.

Resumindo, toda a locação pode ser feita com fitas de invar de comprimentos: 6.884,59 mm; 13.300,00 mm e 13.309,40 mm.

c) Notas finais.

O mesmo processo de locação dos dipolos pode ser empregado na primeira fase, de ajuste aproximado, utilizando o distanciômetro.

O controle vertical deve ser feito paralelamente com a locação horizontal, mas a interferência é

pequena se houver um nivelamento prévio na casa do milímetro.

De fato, um desnível de 1 mm influencia pouco a medição de distâncias e seu efeito pode ser calculado pela fórmula:

$$s^2 + \Delta h^2 = d^2$$

onde: s - distância plana

Δh - desnível = 1 mm

d - distância inclinada

então:

$$d - s = \frac{\Delta h^2}{d + s}$$

No pior caso, em que $s = 6.884$ mm tem-se:

$$\varepsilon = d - s = \frac{1}{2 \times 6.884} = 0,07 \mu\text{m}$$

ou, invertendo as coisas, pode-se calcular o desnível que causa um erro máximo de 0,05 mm na distância:

$$0,05 = \frac{\Delta h^2}{2 \times 6.884} \Rightarrow \Delta h = 26\text{mm}$$

Finalmente, é interessante notar que deve-se ter um bom sistema de parafusos para controlar os movimentos do dipolo (horizontal e vertical) a fim de levá-lo à posição correta. E dizer também que o processo é iterativo e ocorre por aproximações sucessivas.

4. Conclusão

As fitas, associadas a uma metodologia adequada, mostraram-se eficientes para uma locação desse tipo.