

CONCEITUAÇÃO DE CAMPOS DE PONTOS NA MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO DE OBJETOS

Tarcísio Ferreira Silva¹
Andréa de Seixas²
Verônica Maria Romão³

^{1,3}Universidade Federal de Pernambuco - Depto. de Engenharia Cartográfica -
tarcisiofs@yahoo.de; vcosta@ufpe.br

²Universidade Federal Rural de Pernambuco - Depto. de Tecnologia Rural -
aseixas@gmx.net

RESUMO

A medição de deformação objetiva à determinação de mudanças de formas e/ou deslocamentos sofridos no objeto de estudo, relacionadas a si mesmo ou a um referencial externo a ele. A definição de um campo de pontos faz-se, então, necessária, a fim de se detectar a deformação do objeto. Distinguem-se dois tipos de campos de pontos: o campo de pontos-objeto e o campo de pontos de referência. O primeiro tem a finalidade de descrever o objeto, de modo que o mesmo possa ser abstraído da melhor maneira possível. O segundo tem a finalidade de monitorar o objeto com respeito ao seu redor. A interligação entre os deferentes campos de pontos por meio de um sistema de aparelho torna-se, assim, necessária. A estabilidade do sistema de referência de medição caracterizado pelo campo de pontos de referência assume papel fundamental na medição de deformação. Este trabalho conceitua campos de pontos envolvidos na abordagem do problema da deformação, enfocando a problemática da desestabilização do sistema de referência de medição no controle de deformação de objetos.

Palavras-chave: Campo de pontos, Monitoramento de objetos, Sistema de referência de medição.

CONCEPTS OF FIELDS OF POINTS IN THE MEASUREMENTS OF OBJETS DEFORMATION DE CAMPOS DE PONTOS

ABSTRACT

The measurement of deformations aims to the determination of forms variation and displacements occurred on the studied object related to itself or to a external reference. The definition of a field of points is than necessary in order to detect object deformation. One distinguish two kinds of field of points: a field of object-points and a field of reference points. The first one has the finality to describe the object, so that it can be abstracted as well as possible. The second one has the finality to monitoring the object with respect to its around region. The link between both fields of points through a instrument system is necessary. The stability of a reference measurement system that is established by a reference field of points plays a fundamental rule in the deformation measurements. This work defines fields of points involved in the deformation problems, describing the stability aspects of the reference measurement system in the control of object deformations.

Keywords: GPS network, Land subsidence, Leveling.

1. INTRODUÇÃO

As observações geodésicas e as de grandezas fotogramétricas, mecânicas e/ou elétricas de cunho uni, bi ou tridimensional, realizadas ao longo do tempo, podem encontrar diferentes aplicações no estudo de deformações de objetos, estes regularmente entendidos como superfícies e/ou estruturas .

Um objeto, normalmente se deixa discretizar por um campo de pontos denominado Campo de Pontos Objeto (ver Figura 1). As posições dos pontos-objeto são adequadamente escolhidas, materializadas e planejadamente medidas ao longo do tempo. Vetores correspondentes aos deslocamentos, às velocidades e às acelerações destes pontos, são expressões típicas do Campo de Pontos-objeto na análise numérica, que se sucede a cada época de medição.

Uma época de medição deve ser entendida como o decurso de tempo necessário à realização de todo o conjunto de observações/medições, de modo que se possa tratar todas as observações como se estas tivessem sido realizadas num mesmo instante.

O Sistema de Referência de Medição (SRM) calculado para obter os vetores de observação é, normalmente, definido a partir do chamado Campo de Pontos de Referência (Figura 2). O Campo de Pontos de Referência é preparado a partir de uma adequada configuração geométrica e materialização de seus pontos. A partir dos pontos de referência, é que se realizam as medições para os pontos que representam o objeto em deformação.

Em muitos casos, o Campo de Pontos de Referência não se mantém estável, o que pode mascarar o comportamento do Campo de Pontos-Objeto e, com isso, comprometer a análise parcial e até mesmo global das deformações.

O presente trabalho conceitua diferentes Campos de Pontos envolvidos na abordagem do problema da deformação, enfocando o problema da desestabilização do Sistema de Referência de Medição no controle de deformações de objetos.

2. OS DIFERENTES CAMPOS DE PONTOS

O Campo de Pontos-Objeto e o Campo de Pontos de Referência compõem os dois campos de pontos utilizados nas medições de deformação.

2.1 CAMPO DE PONTOS-OBJETO

O Campo de Pontos-Objeto é formado por um conjunto de pontos-objeto, discretizadores do objeto, entendido como estruturas, cascas, camadas, entre outras. Estes pontos são definidos por sua localização monumentalização. O Campo de Pontos-Objeto fica plenamente caracterizado pela metodologia de instrumentação temporal utilizada. A localização destes pontos poderá ser otimizada, entre outras variáveis, em função da forma do objeto e das condições, que favorecem a execução das medições (ex.: dificuldade de monumentalização de pontos, presença de causas influentes externas como vibrações, gradientes de temperatura, etc.)

2.1.1 Definição

O Campo de Pontos-Objeto é o espaço geodésico ou cartesiano agregado aos aspectos:

- de otimização geométrica da superfície que representará o objeto, sob o enfoque, por exemplo, da teoria dos elementos finitos;
- físicos de sua materialização; e
- estocásticos das realizações das variáveis aleatórias envolvidas no processo de medição empregado, quer de natureza geodésica, topográfica e procedentes de outras fontes como medições elétricas de grandezas não elétricas, medições interferométricas, etc.

2.1.2 Distribuição dos Pontos Objeto

Normalmente os pontos-objeto são distribuídos depois do estudo multidisciplinar realizado pelos técnicos envolvidos com o problema. Assim, o engenheiro de geotécnica, o geólogo, o projetista de estruturas, o engenheiro de campo (responsável pela construção da obra), além do engenheiro de medição, são todos co-responsáveis pela definição dos pontos-objeto.

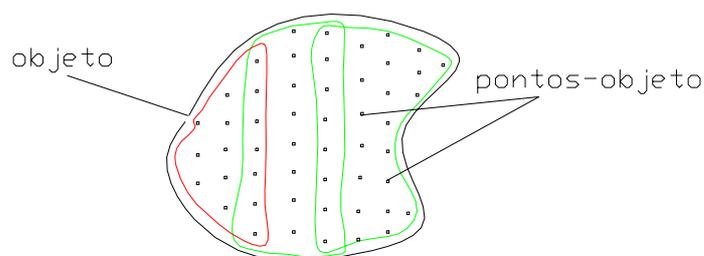


Figura 1 - Objeto em deformação discretizado por um campo de pontos.

A discretização do contínuo que compõe os objetos, como sua superfície, por exemplo, deverá acontecer de modo que se busque uma superfície correspondente à original capaz de permitir a

interpolação das deformações identificadas e quantificadas em seus pontos-objeto sem perda de informação relevante ao estudo multidisciplinar. Em outras palavras, o tipo dos fenômenos causadores de deformações deve ser previamente estudado para a escolha do Campo de Pontos Objeto, de modo que se possa interpolar precisamente os resultados entre sub-espacos do mesmo, resultantes da análise estocástica.

Em função da metodologia de instrumentação escolhida, o Campo de Pontos Objeto poderá ser subdividido, de modo que superposições destes sub-espacos aconteçam e permitam a definição geométrica de todo objeto.

2.1.3 Monumentalização dos Pontos-Objeto

A natureza do objeto em estudo (tipo de superfície/estrutura/camada e sua forma) associada à metodologia de instrumentação empregada influenciará no tipo de monumentalização dos pontos-objeto. Estes poderão ser materializados com marcas no objeto em estudo, em diferentes versões como:

- pinos ligados simplesmente à superfície ;
- pinos cravados a diferentes profundidades da superfície;
- marcas luminosas;
- marcas fosforescentes;
- pinos com ranhuras e/ou furos associados a diferentes formas de alvos;
- marcas ou alvos materializados em centragem forçada e fixa, ligadas a consoles de diferentes formatos.

Em função da instrumentação planejada para a definição do Campo de Pontos Objeto, entre outros fatores, define-se a materialização dos pontos-objeto.

Toda marca visível para um determinado instrumento, isto é, visível no sentido de que o sistema-sensor que o monitora o perceba devidamente, pode ser definida como alvo e entendida como materializadora de um ponto objeto. Nesse sentido, um alvo poderá não ser percebido pelo olho humano, mas sim pelo sistema-sensor que o monitora.

Os alvos podem ser passivos, quando sua função for de natureza passiva, como um refletor de radiação de luz branca, que permite a medição sem contato.

Alvos ativos são marcas de medição, que por sua natureza ativa, emitem radiação sensível a um sistema-sensor ou, ainda, passivamente, servem de reflexão a um sistema emissor (laser, por exemplo) que o transforma, sob certas condições da superfície projetante, em alvos ativos.

Algumas vezes, opera-se com pontos objeto com monumentalização natural, não sinalizada. Para isto, são observados alvos naturais do objeto, como arestas bem definidas, fustes, etc. A monumentalização não sinalizada ativa é realizada através da projeção de luz via uma luneta ou por feixe-laser sobre a superfície do objeto em estudo. Os teodolitos apontadores são típicos coordenatôgrafos polares tridimensionais e ao mesmo tempo instrumentos de materialização de alvos instantâneos (ver item 2.3).

2.2 CAMPO DE PONTOS DE REFERÊNCIA

O Campo de Pontos de Referência é formado por um conjunto de pontos de referência, os quais são intencionalmente preparados para a definição do sistema de referência de medição estável, tratado no item 3. A Figura 2 representa um campo de pontos objeto que é monitorado a partir do campo de pontos de referência. Na mesma figura representa-se o sistema de referência de medição calculado a partir dos pontos de referência.

A localização destes pontos poderá ser otimizada, entre outras variáveis, em função da forma do objeto e das condições, que favorecem a execução das medições (ex.: dificuldade de monumentalização de pontos, presença de causas influentes externas como vibrações, gradientes de temperatura, instabilidades geodinâmicas localizadas, etc.) e que atendem as premissas e condicionamentos das medições.

Os pontos de referência são, portanto, susceptíveis de serem instáveis. O Campo de Pontos de Referência é definido a partir de sua localização, monumentalização. O Campo de Pontos de Referência fica plenamente caracterizado pela metodologia de instrumentação temporal projetada.

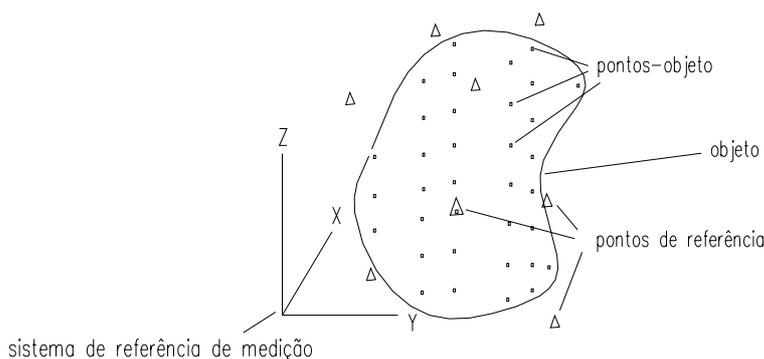


Figura 2 - Representação do Sistema de Referência de Medição a partir dos pontos de referência.

2.2.1 Definição

O Campo de Pontos de Referência é o espaço geodésico ou cartesiano, que contempla:

- os aspectos de otimização geométrica das estruturas geodésicas (Santos 1999, Silva 1999) envolvidas;
- os aspectos físicos de sua materialização;
- os aspectos estocásticos das realizações das variáveis aleatórias envolvidas no(s) processo(s) de medição, além dos
- aspectos de estabilização dos seus pontos na definição do Sistema de Referência de Medição.

Os pontos de referência devem localizar-se em posições estrategicamente projetadas, já que sua definição redundante também na medição de pontos objetos.

O Sistema de Referência de Medição decorrente é projetado pelo engenheiro de medição que agrega às informações multidisciplinares do grupo de trabalho toda sua experiência de instrumentação na área de deformação de objetos.

2.2.2 Distribuição dos Pontos de Referência

Os Pontos de Referência devem ser distribuídos segundo uma dada configuração geométrica otimizada, de modo que atenda a melhor propagação de erros aceitáveis das observações simuladas. Além disso, a distribuição deve atender ao melhor rendimento de observação dos pontos-objeto e ainda possibilitar a estabilidade para a realização do Sistema de Referência de Medição ao longo do tempo.

A extensão do Campo de Pontos-Objeto pode condicionar, em princípio, a extensão do Campo de Pontos de Referência e, ao mesmo tempo, a metodologia de instrumentação a ser empregada. Tem sido frequente o uso de métodos híbridos entre os métodos geodésicos e outros procedimentos de medição, os mais variados. No entanto, quase sempre, a metodologia de redes de distâncias e direções tem suportado as medições de deformação de objetos de maiores extensões (Pelzer 1985). Deformações em objetos menores podem ser monitorados por métodos híbridos, deixando-se aqueles de dimensões subdecamétricas, preferencialmente, ao encargo de métodos aplicados internamente em laboratórios, onde o controle do ambiente e o refino posicional podem ser melhor conduzidos do que em ambientes externos.

2.2.3 Monumentalização dos Pontos de Referência

Os pontos de referência devem ser monumentalizados com sérios critérios de estabilidade, escolhendo-se sítios, os mais estáveis possíveis, longe de vibrações de máquinas e protegidos da incidência de fortes ventos. Por outro lado, estações de observação devem ser protegidas de variações térmicas, como insolação e efeitos similares. Outras estações devem ser edificadas em locais de maior estabilidade podendo ser materializadas como:

- consoles com centragem fixa e/ou forçada para o instrumento de medição;
- pilares com proteção térmica implantados em diferentes profundidades;

- tripés rígidos com centragem fixa e/ou forçada;
- benchmark's simples, de boa qualidade geotecnológica, para referenciar réguas e miras ;
- benchmark's com centragem fixa e/ou forçada, de boa qualidade geotecnológica, para referenciar goníômetros e similares.

Em cada caso específico, o engenheiro de medição deve manter estreita ligação com o responsável pelo dia a dia do objeto em estudo, de modo que se evite o mal uso dos pontos monumentalizados a exemplo de destruição, obstrução, danificação, etc.

2.3 INTERLIGAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES CAMPOS DE PONTOS POR MEIO DE SISTEMA DE APARELHO

O sistema de referência de medição é elemento chave para a interligação entre os diferentes campos de pontos. Esta questão torna-se bem representativa e clara a partir da compreensão de um sistema de medição polar à base de teodolitos. Neste caso o sistema de medição é composto por um ou mais teodolitos como instrumento básico. A posição dos teodolitos define o sistema de coordenadas do aparelho (de Seixas et. al 2003).

As coordenadas tridimensionais x_i, y_i, z_i de um ponto objeto P_i podem ser determinados através do método polar ou através do método da triangulação. Quando o método da triangulação for empregado (Figura 3), o vetor posição será determinado através da interseção a vante. Neste caso a origem O , do sistema de coordenadas do aparelho, pode p.ex. estar localizada no ponto interseção dos eixos: vertical, secundário e de colimação do teodolito $P_1=(0,0,0)$. O eixo x interceptará o eixo vertical do teodolito $P_2 = (x_{Teo2}, 0, z_{Teo2})$. Na figura 3, por simplicidade considera-se que as alturas dos instrumentos são iguais. O eixo z coincidirá com o eixo vertical do teodolito P_1 , o eixo y será perpendicular ao plano xz e interceptará este em P_1 .

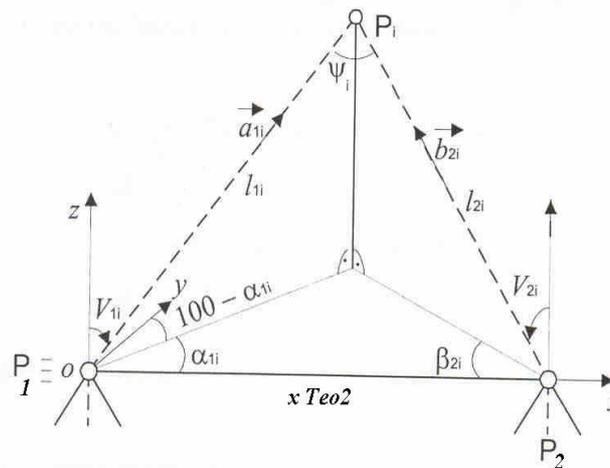


Figura 3 - Solução triangular da determinação das coordenadas x, y, z através da interseção a vante.

Um sistema de medição polar à base de teodolitos pode ser composto por um teodolito apontador e um teodolito identificador. Define-se um teodolito apontador, quando um teodolito projeta marcas de alvo ao longo do seu eixo de colimação. O teodolito identificador, por sua vez, localizará e medirá os alvos projetados. Um sistema de aparelho deste tipo trabalha no módulo chamado "master-slave". O instrumento "master" (o teodolito P_1) projeta p.ex. um ponto à laser (ponto-objeto) sobre o objeto, e o instrumento "slave" (o teodolito P_2) mede o ponto alvo (ponto-objeto) do teodolito P_1 (ver Figura 3).

A relevância do emprego de um sistema de medição está na definição de um sistema de coordenadas de aparelho, o qual possibilitará, dependendo do objetivo da medição, tanto uma interligação entre diferentes sistemas de coordenadas, p.ex. o sistema de uma câmara CCD, como a própria descrição local de um sistema de coordenadas por si só independente, que é o caso comumente utilizado.

A calibração do sistema de medição (determinação dos parâmetros da orientação absoluta e relativa), por sua vez, é imprescindível para o pleno desempenho da medição e conseqüentemente da interligação entre os diferentes campos de pontos.

3. PROBLEMÁTICA DA ESTABILIDADE DO SRM

Encerrada a monumentalização dos pontos de referência assim como dos pontos-objeto, caso não se use alvo-laser projetado por goniômetro apontador, pode-se dar início às medições propriamente ditas. Elas são ordenadas em épocas sendo a inicial denominada "medição zero" seguindo-se da "primeira época de observação" e assim sucessivamente.

As observações de deformação podem ocorrer a intervalos de dias e até meses, mas podem ser conduzidas também de maneira quase contínuas, em função das possibilidades de instrumentação, necessidade urgente de obtenção de respostas aos efeitos danosos previstos, e disponibilidade financeira para cobrir os custos do projeto de medição. Nesse sentido, o registro quase contínuo de observações de uma mesma variável aleatória numa série temporal pode encaixar-se entre duas épocas de medições de grande espaçamento temporal, as quais foram conduzidas por metodologia que não proporcione pequenos intervalos de tempo entre medições sucessivas. Exceções a esta lógica existem, como por exemplo, cita-se as observações sucessivas de fase da onda portadora na recepção GPS, que normalmente são intervaladas de segundos, mas costumemente são ordenadas e chamadas de "épocas de observação".

As realizações das variáveis aleatórias envolvidas nos processos de medição de deformação associam normalmente pontos de referência e pontos-objeto, de modo que a posição uni, bi ou tridimensional de todo o conjunto de pontos envolvidos deve ser numericamente confrontada para cada duas épocas observadas numa análise estatística, que busca os desencaixes dos mesmos pontos contemplados em épocas distintas.

Os desencaixes não traduziriam a verdade da deformação, caso os pontos de referência sofressem movimento entre duas épocas em análise. Esta situação traduziria que o Campo de Pontos de Referência precisa ser redefinido. Neste caso, a retirada dos pontos problemáticos do rol dos pontos estáveis, deixando-os no rol dos pontos-objeto, seria uma primeira tomada de decisão do engenheiro de medição. A adequada inserção, caso necessária, de mais pontos de referência poderia ser uma boa medida para melhorar a rigidez das estruturas geodésicas envolvidas nas épocas distintas e, assim, proporcionar um SRM numérico e mutável, mais próximo de um Sistema de Referência de Medição comprovadamente estável e, quem sabe, ao longo de um bom tempo, estático, como muitos desejariam.

Observa-se que o conceito de ponto fixo, adotado nas estruturas geodésicas hierárquicas, é por demais perigoso ser adotado nas observações de deformação. Nesse sentido, a premissa de ponto isento de erro equivale ao ponto fixo, enquanto a hipótese de estabilidade de pontos (quer seja ele de referência ou objeto) é verificada sob a luz de análise estatística. Observa-se, ainda, que um deslocamento entre dois pontos pressupõe que um dos dois, ou os dois deslocaram-se. Este raciocínio não valeria para uma estrutura geodésica hierarquizada que trabalha sob a hipótese de que parte de seus pontos são fixos.

Já, no conceito de rede livre, todas as posições de pontos da estrutura geodésica podem se ajustar a critérios específicos impostos na modelagem do ajustamento, critérios estes de natureza genérica aplicada a toda estrutura ou localizada para parte(s) da mesma. Assim, a adoção da metodologia de cálculo das medições de deformação usando-se a ferramenta algorítmica das redes livres deve ser um pressuposto nos estudos de deformação de objetos.

Sabe-se que as variáveis aleatórias "distância e direção" apresentam-se, muitas vezes, eivadas de influências externas à instrumentação, o que as tornam intoleradas no processo de cálculo. Assim, o uso de filtros numéricos tipo "passa-baixo" pode ser desenvolvido na busca de um processo de medição mais refinado. Alguns modelos de ajustamento de medições de deformação, no entanto, não admitem esse tipo de eliminação de possíveis erros nos processos de medição aceitando-os como parte da estocasticidade das observações envolvidas em épocas distintas. Neste caso, o modelo de cálculo contempla uma estrutura geodésica enfocada sob a ótica da "sensibilidade da rede" (Niemeier 1985).

Admitindo-se as variáveis aleatórias das estruturas geodésicas realizadas em épocas distintas como independentes, é extremamente recomendável a transformação dos campos de pontos correspondentes sob o enfoque do Método dos Mínimos Quadrados de modo que os desencaixes das posições dos pontos homólogos, depois da transformação, possam ser analisados estatisticamente.

Os desencaixes dos pontos de referência que estatisticamente forem significantes devem apontar para os correspondentes pontos não estáveis, que passarão a pertencer a família dos pontos-objeto e assim serão calculados, como tal, no modelo de ajustamento. Portanto, estes pontos continuam fazendo parte da estrutura geodésica como um todo. A qualquer tempo, por meio de algoritmos de simulação de rede, poder-se-á re-estudar a configuração geométrica da estrutura geodésica, de modo que novos pontos de referência possam ser implantados.

As observações quase contínuas processadas entre épocas vizinhas devem ser processadas contemplando a Teoria do Processo Estocástico, de modo que se possa conjugar os desencaixes entre épocas vizinhas com as tendências apresentadas nas séries temporais das realizações das outras variáveis aleatórias envolvidas no processo de medição como um todo. Portanto, as variáveis aleatórias das estruturas geodésicas juntamente com as demais variáveis observadas podem ser calculadas distintamente e empregadas separadamente no processo corretivo de deformação. O processo corretivo depende, no entanto, da natureza e conduta de solução encontrada pela equipe multidisciplinar, na qual

o engenheiro de medição deve manter-se imparcial com respeito às propostas e condutas de solução corretiva mas imperativo com relação aos resultados parciais e finais das medições de deformação do objeto.

4. CONCLUSÕES

Estruturas e superfícies com formas quaisquer, entendidas como objetos deformáveis, deixam-se monitorar por diferentes métodos. As estruturas geodésicas têm oferecido ótimas possibilidades de emprego híbrido com outros métodos de posicionamento em objetos de dimensões hectométricas e maiores.

Separar os espaços de referência e objeto tem sido tarefa árdua nos processos de medição de deformação. Ordenar os espaços em Campo de Pontos de Referência e Objeto tem sido uma estratégia metodológica empregada com sucesso.

As variáveis aleatórias empregadas nas estruturas geodésicas realizadas em épocas de medição e nas medidas quase contínuas entre épocas de medição, entre outras, devem ser tratadas e calculadas de modo a não se perder o referencial de posicionamento.

O trabalho multidisciplinar predomina durante todo estudo de deformação, enquanto o estudo de mudança de forma das estruturas geodésicas, ou seja, o relativo à garantia da estabilidade do Sistema de Referência de Medição, deve ser conduzido por profissionais da área da geodésia.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- De Seixas, A., Silva, T.F., Romão, V.M.C., Botelho, F. **Definição de sistemas de referência no controle de qualidade de edificações**. In: Novos Desenvolvimentos em Ciências Geodésicas. Série em Ciências Geodésicas, v.3, CPGCG/UFPR, Curitiba, pp. 209-224, 2003.
- Niemeier, W. **Deformationsanalyse**. In: Geodätische Netze in Landes-und Ingenieur-vermessung II, Pelzer, H. (Hrsg). Vermessungswesen bei Konrad Wittwer, Band 13, Stuttgart, pp. 559-623, 1985.
- Pelzer, H. **Statische, kinematische und dynamische punktfelder**. In: Geodätische Netze in Landes-und Ingenieur-vermessung II, Pelzer, H. (Hrsg). Vermessungswesen bei Konrad Wittwer, Band 13, Stuttgart, pp. 225-262, 1985.
- Santos, M.C. dos. **Estabilidade das estruturas geodésicas**. UFPR/Setor de Ciências da Terra, Curitiba, 1999. 79p.
- Silva, A S. 1999. **Controle de qualidade da análise de deformações de estruturas**. In: Anais do XVII Congresso Brasileiro de Cartografia, Salvador, pp. 440-443.