

AUSCULTAÇÃO GEODÉSICA NO CONTROLE DE RECALQUE DA FUNDAÇÃO DE EDIFÍCIO PREDIAL DE GRANDE PORTE¹

Geodesic Detection to Control the Foundation Settlements of a Large Structure Building.

ANDRÉA DE SEIXAS¹
JOSÉ ROBERTO DE SEIXAS²
JOSÉ JORGE DE SEIXAS²

¹Universidade Federal de Pernambuco
²CIENTEC – Engenharia e Consultoria Ltda
aseixas@ufpe.br; jrseixas@globo.com; jose.jorge.seixas@terra.com.br

RESUMO

A detecção geodésica de deslocamento nas fundações pode ser restrita a medição de recalques. Um estudo desse tipo envolve diferentes atividades que de forma geral são desempenhadas por profissionais com diferentes formações e experiências na procura de soluções adequadas. O terreno sobre o qual recairão as futuras cargas projetadas torna-se elemento chave de investigação, pois mesmo após os ensaios de campo e de laboratório sabe-se que os solos apresentam grandes variações nos parâmetros geotécnicos empregados nos projetos de fundações. Assim sendo, é importante o acompanhamento durante e após a construção, logo após a execução de sua fundação. Isto permite investigar o seu comportamento, baseado na previsão teórica dos limites admissíveis de deslocamento, a partir das medições de recalques na obra. Para isto é relevante a auscultação geodésica visando subsidiar as medições de pontos-objeto distribuídos na área de estudo. A escassez de material prático referente à metodologia a ser adotada em estudos geodésicos de movimentos verticais por meio de procedimentos ópticos de medição, considerando um estudo de caso real em sítios urbanizados, vem incentivar a realização deste trabalho. Seu objetivo a partir de um caso real da construção civil, apoiado em uma fundação

¹ Uma versão prévia deste trabalho foi apresentada no II Simpósio Brasileiro de Geomática e V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas

direta, considerando a Norma NBR 6122/96, é o de apresentar o comportamento dos recalques durante o período de sua construção e a interpretação gráfica do seu deslocamento vertical, descrevendo assim, um procedimento metodológico para o controle de recalques da fundação.

Palavras-chaves Controle de recalque da fundação; Auscultação geodésica; Fundação direta; Medição de recalques.

ABSTRACT

The geodesic detection of the foundation deformability can be restricted to the settling measurements. A study of this type involves several professionals, trying to obtain appropriated solutions. The ground on which will be built the future projected becomes the elementary inquiry key, and after the laboratory and field assays it remains in the geotechnical parameters, because it presents representative variations during the foundation projects. Therefore, it requires monitoring during the execution and after the accomplishment of the foundation. It allows investigating its behavior, according to the theory related to the admissible limits of movement from the settling measurements in the construction. Therefore, it requires geodesy techniques applied to engineering to subsidize the distributed object points measurements in the study area. However, there is few practical works describing the methodology to be adopted for such cases using optical instruments. Therefore, the objective of this paper is to present an appropriated methodology based on a real case of civil construction carried out in a direct foundation, according to the NBR 6122/96 (Brazilian Norm) to present the settlings behavior during the time of its construction and the graphical interpretation of the foundation deformability.

Keywords: Foundation deformability, geodesic detection, direct foundation, settling measurements.

1. INTRODUÇÃO

O controle de fundações pode ser restrito as medições de recalques. Um estudo deste tipo engloba profissionais de áreas afins na busca de um procedimento metodológico, envolvendo tanto a Ciência Geodésica quanto a Ciência dos Solos, e da Matemática, objetivando obter soluções apropriadas na construção de edificações de grande porte.

Acidentes (desabamento, desmoronamento, subsidência do solo, assim como recalques de fundações), vêm sendo, cada vez mais, detectados em ambientes urbanos, como é o caso da Região Metropolitana do Recife (PE), aonde é notado o desenvolvimento quase que descontrolado de edificações prediais de grande porte vertical. Em consequência disto, percebe-se nos últimos anos, além da atuação da Engenharia Geotécnica e Estrutural, o crescimento e a valorização do emprego de métodos geodésicos em ambiente da construção civil brasileira.

No contexto das Ciências Geodésicas, o ramo da Geodésia Aplicada à Engenharia subsidia as medições de campo de pontos de referência e campo de pontos-objeto distribuídos na área de estudo por meio de uma instrumentação e métodos adequados de levantamento. A partir da análise e das observações de campo em estruturas geodésicas, como referência ao posicionamento preciso de objetos, são estudados os deslocamentos verticais e soluções apropriadas para a estabilidade das construções.

O estudo das obras de fundações divide-se em cinco fases distintas: investigação de subsolo (sondagem), análise e projeto de fundações, execução, eventos posterior a conclusão da construção e controle. A integração entre superestrutura e fundação tem como conseqüência deslocamentos verticais, decorrentes dos carregamentos aplicados, pois os solos são materiais deformáveis e sofrerão variação de volume. Por mais que sejam executadas boas investigações e feitas amostragens de boa qualidade, sempre haverá possibilidades de “surpresas geológicas”, de comportamentos não totalmente previstos e de variabilidade não totalmente mensuráveis “a priori”. Desta forma é necessário o controle através de medições periódicas de recalque durante e após a construção da edificação.

O terreno sobre o qual recairão as futuras cargas projetadas torna-se elemento chave de investigação, pois mesmo depois dos ensaios de campo e de laboratório, sabe-se que os solos apresentam grandes variações nos parâmetros geotécnicos utilizados nos projetos de fundações. Assim sendo, é importante o acompanhamento da obra, logo após a execução de sua fundação. Investigando assim, seu comportamento, segundo a previsão teórica nos limites admissíveis de deslocamento, a partir da medição de recalques na obra.

Para o diagnóstico dos deslocamentos durante o carregamento da fundação, é necessária uma perfeita interação entre a empresa de prospecção, o projetista e a empreiteira de construção, para que durante e após a realização da obra, possam ser tomadas decisões e providências fundamentais em tempo, objetivando uma perfeita harmonia entre o que foi projetado e o que vem sendo construído, confrontando a cada leitura realizada os valores dos recalques estimados com os recalques obtidos durante o período de construção e pós-construção.

A medição de recalque permite a investigação e avaliação do desempenho e segurança do sistema formado pelos elementos: superestrutura, fundações e solo. Os diversos tipos de danos estão associados aos valores limites recomendados para os recalques totais e diferenciais. Os danos podem ser divididos em três grupos principais: visuais ou estéticos (sem risco de qualquer natureza), danos que comprometem o uso e funcionalidade do prédio e, finalmente, danos estruturais que colocam em risco a segurança dos usuários. Durante a construção, poderá ser observada a presença de fissuras nas estruturas, ainda não prejudiciais à estabilidade do prédio. Ressalta-se aqui a importância do acompanhamento sistemático da obra com o objetivo de garantir a segurança contra sua ruptura. O controle de recalque da

estrutura poderá ser acompanhado, concomitantemente, durante a realização da obra.

Como objetivo da medição de recalque (deslocamento vertical), é preciso:

- Confirmar a qualidade de fundações implantadas (cf. item 2.3);
- Controlar o recalque da estrutura predial;
- Verificar as condições de fundação de prédios já existentes quando se tratar de reformas, alterações, ou mesmo aproveitar suas fundações para outras finalidades;
- Verificar as condições e avaliar a capacidade de fundações de prédios já construídos e de outras construções futuras vizinhas;
- Estudar a estabilidade da fundação e de estruturas prediais, a partir do comportamento de um conjunto de campo de pontos-objeto realizadores da fundação e da estrutura; além de
- Assegurar a moradia ou de definir uma área problemática que apresenta iminência de risco de ruptura.

A definição de um Sistema de Referência a partir de um Sistema de Coordenadas e um conjunto de campo de pontos é de fundamental importância para a análise do controle da obra com respeito ao deslocamento vertical.

Este trabalho tem como objetivo, além da apresentação de resultados de um estudo de caso real, de enfatizar a importância do controle de desempenho da estrutura predial e das fundações a partir do controle de recalques aplicados a edificações prediais de grande porte vertical, tanto na fase da construção como nas construídas.

2. FUNDAÇÕES DE EDIFÍCIOS

A Fundação é o sistema formado pelo conjunto de elementos isolados (estacas) e o solo, onde recairão as cargas provenientes da estrutura (AOKI 2006). Toda obra civil está sujeita as ações do meio ambiente, por este motivo, deve-se considerar todas as variabilidades do solo acolhedor dos elementos isolados de fundação, tais como as estacas.

Para entender os resultados deste trabalho é relevante a descrição de alguns critérios de medidas e sua conceituação: deslocamento vertical, recalque admissível, recalque total, recalque parcial, velocidade de recalque e distorção angular. Suas definições poderão ser vistas em De Seixas et al (2006), NBR 6122/96: Projeto e execução de fundações, Teoria e Prática de Fundações (ABMS/ABEF, 1998).

2.1 Edificação Predial de Grande Porte Vertical

Um edifício é considerado de grande porte vertical quando seu comprimento vertical predomina em detrimento de seu comprimento horizontal. Como exemplo de edifícios de grande porte vertical pode-se citar: prédios de moradia e comercial (abordados no contexto deste trabalho), torres de comunicação, torres eólicas, guindastes, pilares de pontes, dentre outros.

O elemento chave para a estabilidade e segurança destas estruturas é a fundação, sendo desta maneira, a interface entre uma estrutura vertical e o solo.

Ressalta-se aqui a carência de investigação de informações tanto descritivas quanto geométricas dos imóveis da Região Metropolitana do Recife (RMR) com predominância no sentido vertical, por exemplo: quais os prédios?, quantos pavimentos existem?, e onde estão localizados no espaço geográfico da Região Metropolitana?. É notada a construção de estruturas prediais compostas de 20 a 45 pavimentos, consideradas neste trabalho como estruturas de grande porte vertical.

A escassez de um material prático referente à metodologia para estudos geodésicos de movimentos verticais por meio de procedimentos ópticos de medição, a partir de um estudo de caso real localizado em sítios urbanizados, vem incentivar a realização deste trabalho. Nestas áreas de sítios urbanizados são observadas duas características marcantes:

- a primeira, presença de uma diversidade de tipos de solos;
- a segunda, presença marcante de uma aglomeração de estruturas prediais de grande porte vertical.

A realização de estudos destes movimentos verticais só será concretizada a partir do estabelecimento físico de pontos fixos definidores de um referencial altimétrico do tipo Bench Mark (BM) nas imediações das estruturas prediais.

2.2 Especificações do Edifício Portal do Rosarinho

A edificação analisada é constituída por uma estrutura apoticada de concreto armado com 23 (vinte e três) lajes (pavimento garagem, pavimento vazado, 20 pavimentos tipos e cobertura). Não há subsolo projetado. Há na lâmina um total de 26 (vinte e seis) pilares com cargas permanentes variando de 74Tf a 464Tf (740KN a 4640KN). Há indicação de cargas verticais, horizontais e momentos devido à ação do vento. Na periferia, há um total de 32 (trinta e dois) pilares com cargas permanentes variando de 6,0Tf a 42,0Tf (60KN a 420KN). A pressão média transmitida por laje é de 9,0KN/m².

O edifício Portal do Rosarinho está localizado na Rua Julião Neto, 371 – Encruzilhada, Recife – PE. Está baseado no projeto estrutural de autoria da Estrutura Engenharia Ltda e na sondagem de simples reconhecimento a percussão relatório número S-098/02 da Ensolo Ltda. e a fundação foi executada pela Copef C. Pereira Estacas e Fundações Ltda.

Especificações do projeto de Fundações deste Edifício monitorado poderão ser vistas em De Seixas et al (2006). Solução de fundação superficial com melhoramento superficial através de colunas de compactação de areia e brita (COPEF 2003).

Esta solução tem sido largamente empregada na Cidade do Recife com resultados bastante satisfatórios. Sua execução consiste em uma malha quadrangular ou triangular em cujos nós são executadas as colunas de compactação.

A compactação é atingida em decorrência de três efeitos: deslocamento de material no terreno igual ao volume da estaca; introdução de material adicional compactado; e efeito da vibração devido ao processo executivo. Consequentemente há um ganho de resistência ao cisalhamento do terreno e uma redução de seu nível de deformação (GUSMÃO FILHO 1995).

Nesta solução, foi admitida uma malha quadrangular de estacas de 400mm de diâmetro, com lado de 1,20m, distribuídas em toda área de projeção dos pilares da lâmina do prédio. Foi projetado a execução de um total de 635 colunas de compactação de areia e brita (traço em volume de 3:1), com comprimento médio estimado de 7,0m, totalizando em média 4445m de colunas de compactação. A tensão admissível para cargas permanentes projetada é de 400kPa (4 Kgf/cm²). No caso do carregamento total (carga permanente mais ação do vento) foi considerado um acréscimo de até 30% na pressão de trabalho, conforme recomendações da Norma NBR - 6122/96 da ABNT.

No 17º. controle de recalque do Condomínio do Edifício Portal do Rosarinho realizado em 07.06.2006, o carregamento atuante na fundação segue conforme descrito abaixo:

- Estrutura aporricada em concreto armado: concluída
- Alvenaria: concluída
- Emboço interno: concluído
- Contrapiso: concluído
- Reboco interno em argamassa de cimento: concluído
- Reboco interno em gesso pasta: 26% realizado
- Reboco externo: 86,47% realizado
- Revestimento externo em cerâmica: 40,1% realizado
- Revestimento interno das paredes em cerâmica: 42,86% realizado
- Revestimento interno do piso em cerâmica: 40,26% realizado

Perfazendo uma carga total atuante na fundação de 13020,40Tf.

2.3 Critérios de Medidas

- Para recalque total

De acordo com a bibliografia consultada pode-se citar três critérios de autores e estudiosos da Mecânica dos Solos. A norma Russa (POLSHIN e TOKAR 1957) que considera para recalques totais admissíveis para estruturas aporricadas o valor de 100mm. Já Sowers (1962) considera para recalques totais admissíveis para estruturas aporricadas o valor entre 50mm e 100mm e segundo MacDonald e Skempton (1955) consideram para fundação isolada em areia compactada o valor de 51mm, sendo o valor mais recomendado de 38mm.

- Para velocidade de recalque

A velocidade de recalque em micras por dia (μ /dia) é outro parâmetro indispensável para o estudo do comportamento de recalque. Nos casos definidos

como "normais", têm-se como controle de velocidade o seguinte critério (ALONSO 1991):

- Prédios em construção e apoiados em fundação rasa podem ser considerados normais quando apresentam velocidade até $200\mu/\text{dia}$.
- Se forem apoiadas em fundações profundas, essa velocidade deverá ser reduzida para $100\mu/\text{dia}$.
- Prédios entre 1 e 5 anos, entre 10 e $20\mu/\text{dia}$.
- Prédios com mais de 5 anos, velocidade menor que $10\mu/\text{dia}$.

Porém estes valores poderão ser maiores, temporariamente, devido a fatores externos à obra, como por exemplo, rebaixamento de lençol d'água, escavações de valas profundas próximas à obra, ação de "atrito negativo" em estacas, entre outros.

Em prédios construídos com mais de 5 anos e considerados estabilizados é comum se registrarem velocidades dos recalques inferiores a $20\mu/\text{dia}$. Nestes mesmos prédios, velocidades entre $20\mu/\text{dia}$ e $40\mu/\text{dia}$ são considerados de moderadas a altas e acima de $40\mu/\text{dia}$ são consideradas muito altas, e portanto, preocupantes.

- Para distorção angular

Com base em observações de cerca de uma centena de edifícios, Skempton e MacDonald (1956) associaram a tolerância de danos com valores limites para a distorção angular δ/l em que δ é o recalque diferencial entre dois pilares e l a distância entre eles. Muitas outras publicações importantes se seguiram como por exemplo a de Bjerrum (1963). Tabela 1 a seguir resume os valores limites da distorção angular para edifícios estruturados e paredes portantes armadas segundo : Skempton e MacDonald, Meyerhof, Polshin e Tokar e Bjerrum.

Tabela 1 – Valores limites da distorção angular para edifícios estruturados e paredes portantes armadas (I.S.E. 1989) apud Velloso e Lopes (2004)

	Skempton e MacDonald	Meyerhof	Polshin e Tokar	Bjerrum
Danos estruturais	1/150	1/250	1/200	1/150
Fissuras em paredes e divisórias	1/300 (porém, recomendada o 1/500)	1/500	1/500 (0,7/1000 a 1/1000 em painéis extremos)	1/500

Burland et al (1977) destacam também os seguintes valores limites de Skempton e MacDonald (1955):

- $\delta/l = 1/500$ – limite seguro de edifício para o qual não é permitido o aparecimento de fissuras
- $\delta/l = 1/300$ – trincas em paredes de edifícios
- $\delta/l = 1/150$ – danos estruturais em vigas e colunas de edifícios correntes.

3. AUSCULTAÇÃO GEODÉSICA APLICADA NO CONTROLE DE RECALQUE DA FUNDAÇÃO DE EDIFÍCIO

A definição do modelo geométrico do objeto, neste trabalho a fundação, é elemento chave para a realização do controle. Situação esta, estabelecida no início da implantação dos pilares da edificação predial.

A quantidade de pontos e a distância entre os mesmos deverão ser escolhidas de modo que o deslocamento vertical do objeto possa ser determinado livre de erros. Geralmente, distinguem-se entre medições relativas e absolutas de deslocamento (KAHMEN 2005). As medições relativas de deslocamento correspondem ao controle da posição relativa de um ponto-objeto com respeito a outro ponto-objeto e as medições absolutas de deslocamento correspondem à determinação dos movimentos dos pontos-objeto com respeito a pontos fixos (de referência) externos ou não na área de trabalho.

Para a verificação de deslocamentos verticais exige-se o conhecimento de uma situação de referência fixada através de uma medição denominada de “medição zero”. As circunstâncias de medição irão definir a escolha do método e o procedimento de medição.

De acordo com o comportamento do deslocamento vertical cada ponto-objeto poderá ser observado continuamente ou descontinuamente. Quando a relação causa-efeito determinada através de um modelo dinâmico (MOESER et al 2000) for previamente conhecida, situação deste trabalho, adota-se uma medição descontínua (discreta), caso contrário, opta-se por uma medição contínua.

3.1 Definição do Sistema de Referência e do Campo de Pontos-Objeto

É de grande importância a análise das observações de campo em estruturas geodésicas como referencial ao posicionamento preciso de objetos afim de que possam ser estudados e analisados as diferentes obras de engenharia como nos estudos dos deslocamentos verticais, possibilitando soluções mais apropriadas às estabilidades das construções prediais.

Estas estruturas são constituídas por um campo de pontos de referência e por um campo de pontos-objeto (FERREIRA et al 2004).

3.1.1 Sistema de Referência Vertical

Um sistema de referência vertical em uma obra de edificação predial é fixado através de uma superfície de referência altimétrica definida por um plano horizontal

fictício e a sua distância a um ponto fixo altimétrico materializado denominado Referência de Nível (RN).

Nos trabalhos relacionados à Engenharia este ponto de referência altimétrico é definido como Bench Mark (BM), este tipo de materialização da rede altimétrica é requerida quando envolve trabalhos de alta e/ou altíssima precisão. Para sua implantação no local da obra é necessário um estudo das diferentes camadas de solos existentes nesta área. Para a implantação do BM foi utilizada uma haste metálica de uma polegada de diâmetro, protegido por um tubo externo com duas polegadas de diâmetro instalado em um furo de sondagem à percussão. Geralmente são engastadas em camadas profundas, através de injeção de nata de cimento, onde se encontra o “indeslocável”. A referência de nível, para o nivelamento dos pinos deverá ser instalada de forma a não sofrer influência da própria obra ou outras causas que possam comprometer sua indeslocabilidade.

Neste trabalho a superfície de referência é representada por um plano horizontal tangente ao Bench Mark, denominado de referência vertical “zero” da obra. Todas as demais alturas do campo de pontos-objeto de estudo estarão relacionadas a este plano de referência horizontal fictício.

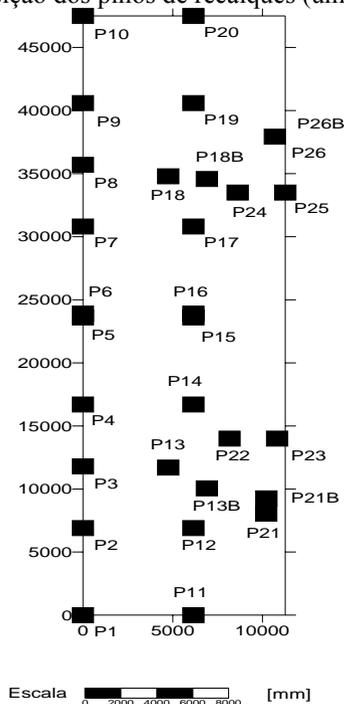
3.1.2 Campo de Pontos-Objeto

O campo de pontos-objeto define o objeto de estudo. A detecção da deformabilidade da fundação do edifício passa, então, a ser investigada a partir do controle do deslocamento vertical destes pontos-objeto determinados ao longo da execução da obra e relacionados a um sistema de referência vertical local da obra como descrito no item anterior.

Os pinos de medição (pontos-objeto) são definidos em um Sistema de Referência do Objeto (De SEIXAS 2004; De SEIXAS e BURITY 2005). O campo de pontos-objeto é materializado na estrutura do pilar da edificação predial. A Figura 1 mostra a posição dos respectivos pilares com respeito à edificação.

Para a determinação da distância entre os pilares da obra foi fixado o centro do pilar P1 como origem (0,0) do Sistema de Referência do Objeto de coordenadas retangulares (X,Y). O eixo X está definido pelo sentido dos pilares P1 e P11 e o eixo Y está definido pelo sentido dos pilares P1 e P2, de acordo com a planta de locação dos pilares. As distâncias interpilares são necessárias para o cálculo da distorção angular (cf. item 2.3).

Figura 1 – Posição dos pinos de recalques (unidades em mm).



3.2 Escolha do Método e Realização da Medição

Com base em instrumentação geodésica, o crescente progresso na área de micromedições é perceptível através do instrumental de medição de direções, ângulos e distâncias, por meio de sensores adaptados as diferentes circunstâncias de construção e autocontrole. Este instrumental vem incentivar o desenvolvimento de novas técnicas e métodos de medição tridimensional, objetivando o aumento do grau de automação, da flexibilidade do sistema e de controle na medição. Em De Seixas et al 2007 são descritos diferentes possibilidades de determinação de deslocamentos verticais e/ou transportes de altitude ou cotas por meio de sistemas ópticos de medição híbrida manuais e motorizados.

Neste trabalho para a interligação altimétrica dos pontos-objeto (Figura 1) será empregado o método do nivelamento geométrico clássico.

Com este método são determinadas, através de visadas horizontais, as diferenças de altura (desníveis) entre pontos próximos um dos outros (KAHMEN 2005).

Na concepção pretendida, incorporou-se o emprego de um nível óptico de alta precisão (Pentax – AFL – 320) com desvio padrão de $\pm 0,8\text{mm}$ e com desvio padrão de $\pm 0,4\text{mm}$ para 1 km de duplo nivelamento com placa plano paralela.

Apesar de ser recomendado o emprego de miras de invar durante os procedimentos do nivelamento geométrico de alta precisão, nesse trabalho as leituras foram realizadas sobre uma mira de aço inox de 2 m, milimetrada e adaptada, considerando condições atmosféricas apropriadas para sua utilização. Todas as leituras foram realizadas em áreas cobertas e em períodos noturnos e/ou sem influência dos raios solares.

O levantamento foi executado partindo do referencial altimétrico definido pelo Bench Mark (cf. item 3.1). O nivelamento geométrico foi realizado por caminhamento em torno da obra, envolvendo os diferentes pilares. Tratando-se do conjunto da 17ª. Medição de Controle foram utilizados 11 pilares (B.M. – **P8 – P7 – P4 – P2 – P21B – P23 – P25 – P26 – P20 – P10aux – P10** - B.M.) de acordo com a Figura 1, perfazendo um circuito fechado (nivelamento e contra nivelamento) de volta ao Bench Mark, com aproximadamente 170m. As medições com a mira, adaptadas nos demais pinos dos respectivos pilares, foram realizadas continuamente a partir das estações do caminhamento por irradiação.

Vale ressaltar a existência de níveis digitais com leituras completamente automáticas sobre miras com divisão de barras de código (padrão binário) por meio de tratamento digital de imagem e cálculos de correlação (INGESAND 1990). Nivelamentos podem ser executados com maior economia com níveis digitais em curto tempo e isentos de erros de leituras e de escrita por causa do registro automático das grandezas de medição (SCHWARZ 2002). A rotação de níveis digitais pode ser comandada por motores, podendo assim realizar automaticamente com estes instrumentos a medição de alturas de pontos-objeto pré-definidos durante medições repetidas de controle de construções estacionárias. Cada ponto alvo é marcado com uma mira vertical. Sobre condições normais de medição poderão ser alcançadas precisões de <0,1mm (SCHWARZ 2002).

Este tipo de tecnologia geodésica revoluciona com toda certeza todo ambiente de medição, permitindo o controle “on-line” em estruturas, por exemplo, em áreas de risco, proporcionando, além disso, soluções inovadoras a cada tipo de obra. Mesmo com o advento da automação os métodos clássicos de levantamento continuarão a serem empregados por um bom tempo, principalmente, em países de economia emergente, justificando-se assim, a escolha do método de nivelamento geométrico clássico para este trabalho.

3.3 Processamento dos Dados

Através do cálculo de compensação e da distribuição dos erros ocasionados no nivelamento geométrico, foram determinadas as cotas dos pinos de recalques. O erro de fechamento do nivelamento geométrico de alta precisão é de $\leq 3\text{mm}(L)^{1/2}$, sendo L o perímetro do circuito (nivelamento e contra nivelamento) durante a medição em Km (IBGE 1983). Para valores de fechamento maiores que este, recomenda-se um novo levantamento.

Tratando-se do conjunto da 17ª. Medição de Controle dos pilares do edifício, completando um total de 996 dias (quase 3 anos) de monitoramento foram determinadas as novas cotas dos respectivos pinos em relação ao referencial definido pelo Bench Mark cuja cota adotada foi de 0,00 mm. A partir destes dados foram calculados: os recalques totais (recalque acumulado até o conjunto da 17ª. leitura), os recalques parciais (recalque entre as sucessivas épocas de medição (leitura)), as velocidades de recalque totais e parciais dos respectivos pilares e suas respectivas acelerações totais, além das distorções angulares parciais e totais. O gráfico do carregamento atuante na fundação com o tempo e o gráfico de recalque com o tempo, ilustram o comportamento da fundação desde o início da construção até a data do conjunto da última medição. Resultados estes exigidos pela NBR 6122/96.

4. RESULTADOS E VISUALIZAÇÃO GRÁFICA DOS DADOS

Tendo em vista o volume de dados gerados durante o conjunto da 17ª. leitura realizada, que compõem o controle de recalque da fundação hora em estudo, fez-se necessário à escolha de uma época de medição para ilustrar o trabalho realizado. Neste caso, optou-se pelo conjunto da 17ª. Medição de Controle.

Para os resultados e representações descritas abaixo, deve-se considerar que durante a medição dos recalques foram acrescentados dois novos pinos nos pilares P10 e P19, aqui denominados P10aux e P19N respectivamente, em virtude da construção do novo depósito de material da construção embaixo do edifício. Igualmente, foram eliminados dois pinos dos pilares P19 e P26B.

4.1 Recalque Acumulado Até o Conjunto da 17ª. Leitura e Recalques Parciais Entre a 16ª. E 17ª.

A Tabela 2 seguinte apresenta os recalques acumulados em milímetro entre os conjuntos: da leitura 1ª. e da 16ª. (com um intervalo de 826 dias) e da leitura 1ª. e da 17ª. (com um intervalo de 996 dias), determinados durante o nivelamento; os recalques parciais em milímetro entre a 16ª. e a 17ª (com um intervalo de 170 dias). Neste estágio a obra já atingia o último pavimento (23º.) e com os dois reservatórios d'água executados (cf. item 2.2).

Considerando a Tabela 2, conclui-se que:

- A média dos recalques acumulados nesta décima sétima medição, resultou no valor de 28,53mm;
- A média obtida das velocidades de recalque dos pilares a partir dos dados dos resultados acumulados e do período de dias entre as medições, representa, aproximadamente, 13,85% da velocidade, considerada como normal para edifícios em construção apoiados em fundação superficial (cf. item 2.3);

- Os valores dos recalques totais (acumulados) mostram que o recalque diferencial da edificação em construção é ainda admissível, já que a maior parte de seus valores concentram-se entre 19,25mm a 34,45mm (cf. item 2.3).

Tabela 2 – Cotas, recalques acumulados, recalques parciais dos pinos dos pilares.

Pinos	Data: 13 e 14 /09/03	Data: 19/12/05	Δ dias826	Data 07/06/06	Δ dias170	Δ dias996
	Leit. nº.01	Leit. nº. 16	Recalque acumulado até 16ª. Leit.(mm)	Leitura nº.17	Recalque parcial entre L16 e L17 (mm)	Recalque acumulado até 17ª. Leit.(mm)
	Cota de ref.(mm)	Cota obs.(mm)		Cota obs.(mm)		
P1	471,90	452,65	19,25	451,35	1,30	20,55
P2	442,60	419,85	22,75	417,80	2,05	24,80
P3	442,60	418,00	24,60	416,10	1,90	26,50
P4	451,30	424,50	26,80	422,45	2,05	28,85
P5	472,70	443,65	29,05	441,50	2,15	31,20
P6	468,90	440,15	28,75	438,15	2,00	30,75
P7	457,10	427,30	29,80	425,50	1,80	31,60
P8	431,50	398,95	32,55	397,05	1,90	34,45
P9	472,60	440,80	31,80	439,20	1,60	33,40
P10	448,00	418,00	30,00	416,23	1,77	31,77
P10aux	-----	470,00	-----	467,80	2,20	-----
P11	459,30	441,70	17,60	440,05	1,65	19,25
P12	456,20	432,40	23,80	430,70	1,70	25,50
P13	455,50	429,05	26,45	427,20	1,85	28,30
P13B	501,70	476,25	25,45	474,15	2,10	27,55
P14	435,90	411,50	24,40	409,60	1,90	26,30
P15	394,30	367,45	26,85	365,50	1,95	28,80
P16	392,20	364,85	27,35	363,05	1,80	29,15
P17	426,70	396,20	30,50	394,40	1,80	32,30
P18	439,30	407,15	32,15	405,65	1,50	33,65
P18B	460,30	427,95	32,35	426,25	1,70	34,05
P19	457,30	427,70	29,60	426,15	1,55	31,15
P19N	-----	435,35	-----	433,80	1,55	-----
P20	472,00	445,65	26,35	443,80	1,85	28,20
P21	356,50	335,25	21,25	333,55	1,70	22,95
P21B	363,10	341,10	22,00	339,45	1,65	23,65
P22	392,70	367,30	25,40	364,90	2,40	27,80
P23	375,10	352,65	22,45	350,70	1,95	24,40
P24	383,30	352,70	30,60	351,15	1,55	32,15
P25	409,50	380,20	29,30	378,75	1,45	30,75
P26	452,30	425,95	26,35	424,55	1,40	27,75
P26B	455,40	-----	-----	-----	-----	-----

4.2 Distorção Angular

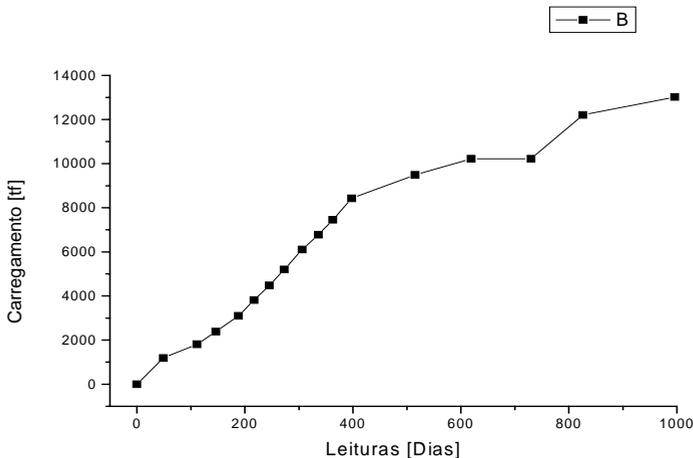
De acordo com o controle de recalque, relatório L17, a maior distorção angular foi de 1/667 entre os pilares P5 e P6 e 1/1104 entre os pilares P12 e P11. Estes valores são inferiores as distorções angulares admissíveis segundo Norma NBR 6122/96.

4.3 Estado de Carregamento da Obra X Recalque Total dos Pilares

A seguir será apresentado o gráfico dos carregamentos (cf. item 2.2) atuantes na fundação (Figura 2), assim como o recalque acumulado da Edificação em função do tempo (Figura 3 e 4), lembrando-se que naquele momento do controle de recalque da fundação no conjunto da 17ª. medição, a obra já atingia o último pavimento (23º.) e com os dois reservatórios d'água executados. Os gráficos abaixo mostram a variação da carga e seu efeito nos valores de recalques. Considerando a tendência da relação entre causa-efeito além de justificar a escolha da medição de recalque descontínua.

Realiza-se um controle descontínuo quando as variações temporais das forças deformáveis e a reação do objeto são pelo menos aproximadamente pré-conhecidas. Geralmente a relação entre causa-efeito é determinada através de um modelo de deformação dinâmico (KAHMEN 2005).

Figura 2 – Estado de carregamento da obra. B = carga [tf] x tempo [dias].

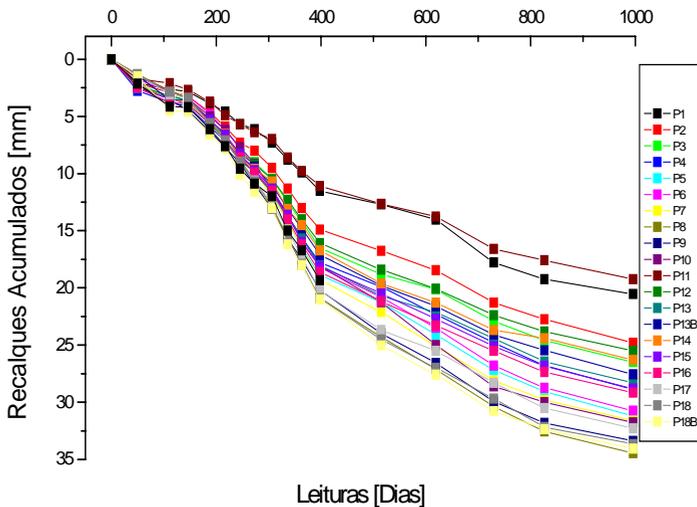


As Figuras 3 e 4 mostram como os recalques se processaram ao longo do tempo, quando houve uma variação linear do carregamento (Figura 2). A variação

linear do carregamento no intervalo de tempo provoca um deslocamento vertical não linear, mas de forma a ser redistribuído até alcançar uma nova posição de estabilidade mostrada no gráfico de recalques acumulados. Esse tipo de deslocamento de objeto através de variações lineares das grandezas de influência foi definido por Pelzer (1987) apud Kahmen (2005). A partir da nona Leitura os recalques tendem a se uniformizarem. A visualização gráfica dos recalques acumulados versus tempo a seguir será apresentada em duas Figuras para evitar uma maior superposição entre os elementos gráficos, e assim permitir uma melhor identificação dos respectivos pilares.

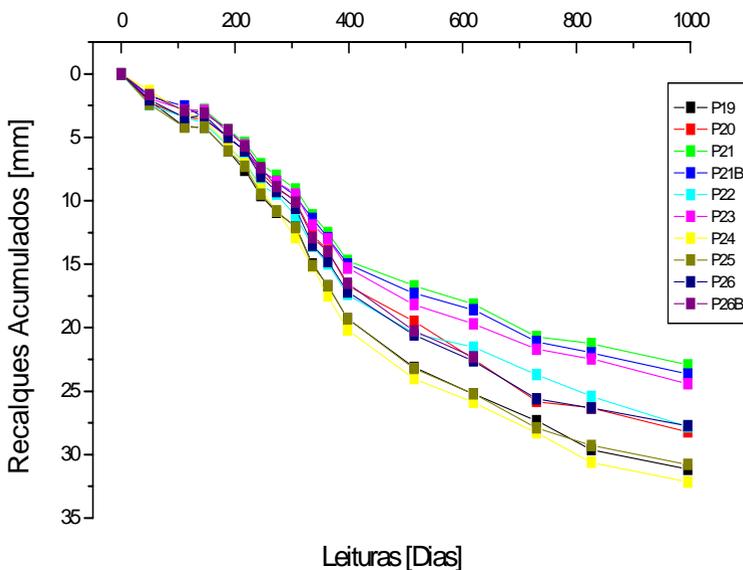
Considerando o carregamento da obra (Figura 2), observa-se através das medidas de recalques a tendência da fundação em uniformizar os recalques diferenciais devido ao fenômeno conhecido por interação solo-estrutura. Em todos os casos de deslocamento vertical, onde seu procedimento é previsto e caracteriza uma estabilização, determina-se o comportamento do objeto por meio de medições descontínuas: antes do início do carregamento (representada nesse trabalho pela primeira Leitura posicionada no valor zero do eixo horizontal dos gráficos apresentados); algumas vezes, quantas necessárias, em intervalos de tempo definidos durante o processo de deslocamento.

Figura 3 – Gráfico de recalques acumulados x tempo (pilares P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13, P13B, P14, P15, P16, P17, P18, P18B).



A maioria dos Consultores de Fundações recomenda para este tipo de obra a medição de recalque a cada dois meses e/ou dois pavimentos concretados; e depois da finalização da obra (também quantas vezes se fizerem necessárias, dependendo dos resultados obtidos).

Figura 4 – Gráfico de recalques acumulados \times tempo (pilares P19, P20, P21, P21B, P22, P23, P24, P25, P26, P26B).



Nesse trabalho as doze primeiras medições foram realizadas a cada mês depois da concretagem de dois pavimentos tipo. Apenas entre a segunda e a terceira Leituras tem-se um intervalo de dois meses, por causa da impossibilidade do acesso no pavimento garagem. A partir da décima segunda Leitura aumentou-se o intervalo de tempo de medição para 3 até 5 meses. A Tabela 3 descreve os intervalos entre as medições em dias, assim como os recalques mínimos e máximos medidos em cada conjunto de pontos-objeto (pinos de recalque) em cada medição.

Tabela 3 – Intervalos entre as medições, recalques mínimos e máximos.

Leituras	L01 0dias	L02 49dias	L03 111dias	L04 146dias	L05 188dias	L06 217dias
Valores Mínimos de Recalques [mm]	0	1,30	2,10	2,70	3,70	4,60
Valores Máximos de Recalques [mm]	0	2,75	4,50	4,60	6,60	7,80
Leituras	L07 245dias	L08 273dias	L09 306dias	L10 336dias	L11 363dias	L12 398dias
Valores Mínimos de Recalques [mm]	5,70	6,10	7,00	8,60	9,80	11,10
Valores Máximos de Recalques [mm]	10,10	11,60	13,10	16,20	18,00	21,00
Leituras	L13 515dias	L14 619dias	L15 730dias	L16 826dias	L17 996dias	-----
Valores Mínimos de Recalques [mm]	12,65	13,75	16,60	17,60	19,25	-----
Valores Máximos de Recalques [mm]	25,05	27,60	30,80	32,55	34,45	-----

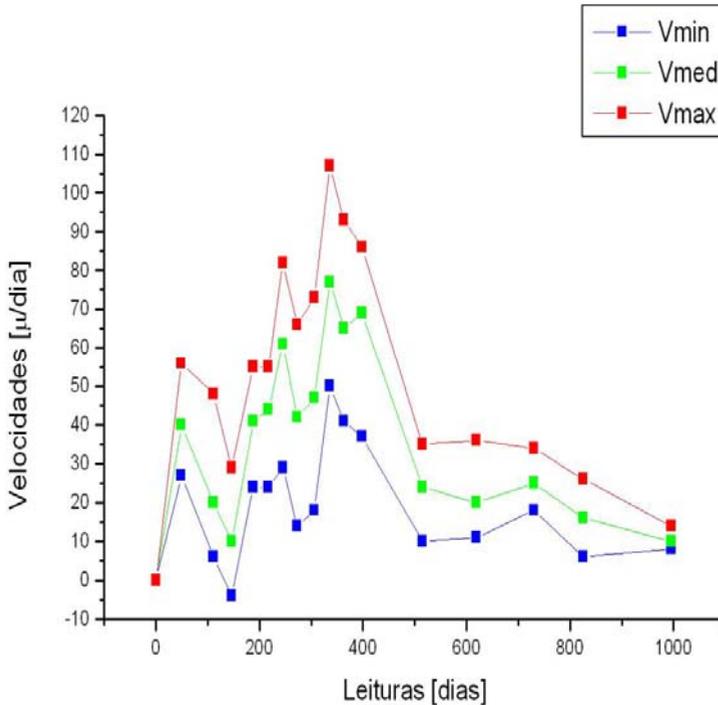
Verifica-se que na sétima Leitura (L07) o recalque máximo atingiu um valor próximo a 10mm; na décima segunda Leitura (L12), ou seja, praticamente no primeiro ano da obra, o recalque máximo atingiu um valor próximo a 20mm; na décima quinta Leitura (L15), ou seja, dois anos de obra, o recalque máximo atingiu um valor próximo de 30mm; e na décima sétima Leitura (L17), ou seja, quase três anos de obra, o recalque máximo atingiu um valor próximo de 35mm.

4.4 Abordagem Prática das Velocidades de Recalques

Para o cálculo em porcentagem da relação entre o recalque diferencial e absoluto máximo, necessita-se dos valores de velocidade de recalque absoluto médio. Os resultados obtidos em porcentagem desta relação até a 17ª. Medição de Recalque confirmam a relação de 50% como exposto no item 2.3. A evolução do

deslocamento vertical do objeto é descrita ao longo do tempo através da velocidade pontual e da aceleração pontual. As épocas discretas de observação são interligadas entre si, para descrever continuamente as velocidades médias do mecanismo de deslocamento (Figura 5).

Figura 5 – Interpretação cinemática das observações individuais. Visualização dos valores mínimos, médios e máximos.

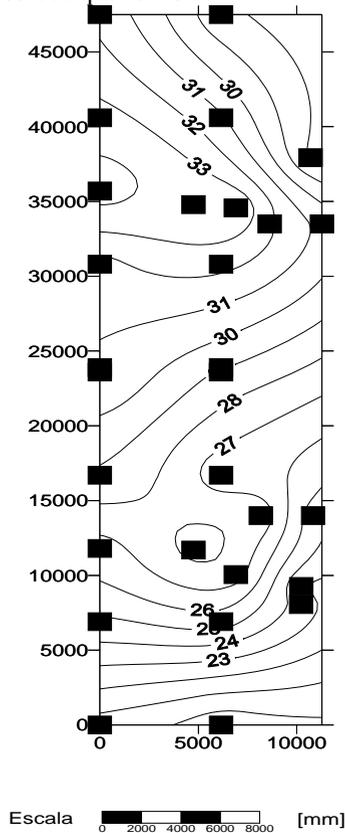


A partir da 13ª. Medição de recalque todos os três gráficos da Figura 5 tendem a se estabilizar. Nota-se uma simetria entre os valores mínimos e máximos, confirmando assim, o bom comportamento da obra. A variação do acréscimo de carga durante a construção da obra com respeito aos intervalos de medição de recalques não é uniforme. Isto se faz visualizar nas treze primeiras medições (Figura 5).

4.5 Curva de Iso recalque

Tendo em vista o volume de dados gerados até a 17ª. Medição realizada fez-se necessário a escolha de uma época de medição para ilustrar as curvas de isorecalques. A Figura 6 abaixo mostra o posicionamento dos pilares com respeito à edificação e as respectivas curvas de isorecalque com equidistância de 1 mm correspondentes aos recalques totais das medições de recalque realizadas neste período de quase três anos respectivamente.

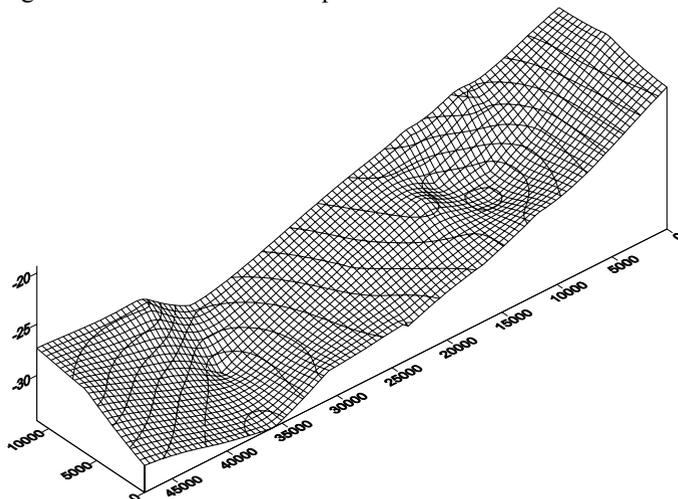
Figura 6 – Curvas de isorecalque totais de 1 mm em 1mm. Unidades em mm.



A visualização planialtimétrica do deslocamento vertical da fundação por meio de isolinhas de recalque poderá ajudar na predição do comportamento da fundação. Os dados gerados a partir do levantamento realizado poderão alimentar um sistema de informação local que relacionados com outros dados cartográficos ou

não, serão objeto de análise para tomada de decisões. Confrontar as localizações dos pilares através da Figura 1. A Figura 7 mostra a representação das curvas de isorecalque em uma vista 3D.

Figura 7 – Curvas de isorecalque modelo 3D. Unidades em mm.



5. CONCLUSÕES

De acordo com os dados coletados durante todas as medições desde o início da construção do edifício (3 anos), pode-se afirmar que seus resultados são satisfatórios de acordo com a norma NBR 6122/96. Entretanto, deverá ser realizado o controle de recalque até o final da construção e posteriormente. Para isso, estima-se a realização de pelo menos mais quatro conjuntos de leituras nos próximos dois anos.

Salienta-se que devido à complexidade geológica do solo da Região Metropolitana do Recife e tendo em vista as construções de grandes estruturas prediais que vêm ocorrendo na região, torna-se necessário a aplicação da auscultação geodésica no controle de recalque da fundação de edifício predial de grande porte. A norma NBR 6122/96 de Projeto e Execução de Fundações no item 9 – Observações de comportamento e instrumentação de obras de fundação especificamente o item 9.2.1 cita: “Nas obras em que as cargas mais importantes são verticais, a medição dos recalques constitui o recurso fundamental para a observação do comportamento da obra”. Entretanto, este procedimento na prática tem sido muito pouco empregado. Tal fato se deve, em diversas situações, ao

entendimento equivocado de que só se faz controle de recalques se a estrutura está com problemas ou possa apresentá-los.

Os gráficos e os critérios de medidas abordados neste trabalho caracterizam o bom desempenho da fundação através de melhoramento do solo por colunas de compactação de areia e brita segundo as especificações descritas no item 2.2. Ressalta-se aqui, além disso, a medição e a avaliação de recalque da fundação com uma quantidade grande de leituras de recalques ao longo do desenvolvimento da obra, situação esta não tão comum, contribuindo assim, para uma análise mais consolidada dos parâmetros envolvidos neste estudo.

AGRADECIMENTOS

À PROPESQ pela aprovação do projeto enxoval número 23076.017606/2006-08 e pela aprovação do projeto Pibic 2007, número de inscrição: 1.07.02964.07. Os autores desejam expressar seus agradecimentos à CIENTEC Engenharia e Consultoria Ltda., pelo emprego de instrumentação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALONSO, U.R. *Previsão e controle das fundações*. Editora Edgard Bluecher Ltda. 1991.
- AOKI, U. R. *Avaliação da probabilidade de ruína de estaqueamento*. Palestra apresentada durante os Seminários Geotécnicos. Pós-Graduação de Engenharia Civil – UFPE, Recife-PE, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122/96: Projeção e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 1996.
- BJERRUM, L. *Interaction between structure and soil*. In: European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Wiesbaden, 1963. Proceedings... Wiesbaden: ECSMFE, 1963. p. 135-137.
- BURLAND, J.B.; BROMS, B.B.; de MELLO, V.F.B. *Behaviour of foundation and structures. State-of-the-Art Report*. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 9., 1977. Proceedings. Tokio: Japanese Geotechnical Society, 1977.
- COPEF. C. Pereira Estacas e Fundações Ltda. *Especificações do Projeto de Fundações*. 2003.
- GUSMÃO FILHO, J.A. *Contribuição à prática de fundações. A experiência do Recife*. Tese para Concurso de Professor Titular do Departamento de Engenharia Civil da UFPE. 1995.
- IBGE – *Resolução PR nº 22*, Boletim de serviço, Rio de Janeiro, RJ 1983.
- INGENSAND, H. *Das Wild NA 2000. Das erste digitale Nivellier der Welt*. In: Allgemeine Vermessungs-Nachrichten 97 (1990), Seite 2001-210.
- I.S.E. Institution of Structural Engineers (I.S.E.). *Soil – structural interaction: the real behaviour of structures*. London. 1989.

- FERREIRA, T.S.; DE SEIXAS, A.; ROMÃO, V.M.C. *Conceituação de campo de pontos na medição de deformação de objetos*. Anais do I Simpósio de Ciências Geodésicas e tecnologias da Geoinformação, Recife – PE, 2004.
- KAHMEN, H. *Vermessungskunde, Angewandete Geodaesie*, de Gruyter, 20.Auf., 2005.
- MOESER, u.a. *Handbuch Ingenieurgeodaesie, Grundlagen*. Moeser, Mueller, Schlemmer, Werner (Hrsg.), 3., voellig neugearbeitet und erweiterte Auflage., 2000.
- PELZER, H. (Hrsg.) *Ingenieurvermessung: Deformationsmessungen, Massenberechnung*. Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1987.
- POLSHIN, D.E. e TOKAR, R.A. *Maximum allowable non-uniform settlement of structures*. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.4., 1957, London. Proceedings... London: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1957. p. 402-405.
- SCHWARZ, T. *Geodaetische Messverfahren fuer das Bauwesen*. DVWe.V. – Gesellschaft fuer Geodaesie, Geoinformation und Landsmanagement. Schrifreihre 43/2002 – Interdisziplinaere Messaufgaben im Bauwesen. Wittwer.
- DE SEIXAS, A. *Sistema de medição polar à base de teodolitos e definição do método de linhas de grade*. Revista Brasileira de Cartografia. Nr. 56/2.2004.
- DE SEIXAS, A. e BURITY, E.F. *Geodésia aplicada à medição e ao monitoramento de áreas de risco em sítios industrializados*. IV Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas – UFPR. Curitiba – PR, 2005.
- DE SEIXAS, A.; DE SEIXAS, J.R.; DE SEIXAS, J.J. *Control and monitoring of buildings foundation – Application in very high buildings structure*. FIG2006, Munique – Alemanha, 2006.
- DE SEIXAS, A.; FAGGION, L.P.; VEIGA, L.V.; PACHÊCO, P.A. *Uma abordagem geodésica de técnicas ópticas de medição tridimensional para determinação e transporte de alturas em áreas de risco*. Bol. de Ciênc. Geod., v. 13, p. 165 – 185 jan – jun, 2007.
- SKEMPTON, A.W. e MACDONALD, D.H. *Allowable settlement of buildings*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. London:1956. v.5. p. 727-784.
- SKEMPTON, A.W. e MACDONALD, D.H. *Critérios de danos de estruturas*. ICE, London, 1955.
- SOWERS, G.F. *Critérios de danos em estruturas*. 1962.
- VELLOSO, D.A e LOPES, F.R. *Fundações. Critérios de projeto – Investigação do Subsolo – Fundações Superficiais*. Volume 1. 2004.

(Recebido em novembro / 2008. Aceito em maio / 2009).