

DETECÇÃO ON-LINE DE DEFORMAÇÃO POR MEIO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO 3D À BASE DE TEODOLITOS – VERIFICAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

*Detection of on-line deformation by means of an measuring system-based
theodolites 3D – Verification of measuring system*

ANDRÉA DE SEIXAS

Universidade Federal de Pernambuco
aseixas@ufpe.br

RESUMO

Aqui será apresentado um sistema de medição composto por dois teodolitos eletrônicos motorizados (robô de medição em um sistema de coordenadas esféricas) interligados por meio de uma transmissão de dados on-line com o computador. O sistema de medição é composto por um teodolito apontador e um teodolito identificador. Este tipo de sistema de medição pertence à quarta hierarquia de automação denominada de Sistema de medição de comando automático com adaptação de programas independentemente. Os sensores de direção, variação de direção, distância e variação de distância são posicionados automaticamente por meio dos eixos de movimentação. As exigências da qualidade de construção na indústria automobilística e de aviação aceleram o desenvolvimento de novos sistemas tridimensionais e de novos métodos, os quais possibilitam a determinação automática dos pontos de um objeto e sua análise no contexto da deformação. A reconstrução tridimensional de objetos ou de superfícies exige, dependendo do objeto, uma quantidade mínima de pontos, com a qual se abstrai e determina-se, através de uma interpolação, a forma precisa e característica do objeto. O emprego do LASER, para a sinalização ativa de um ponto-objeto, combinado com a medição de direção, possibilitam então, a determinação de objetos ou superfícies, incluindo também, as áreas perigosas e, mesmo onde seria impossível a colocação de marcas (alvos) sobre o objeto. Como principais pontos a serem apresentados, têm-se: apresentação de um Sistema de Medição à base de Teodolitos, constituintes de um sistema 3D de medição automático com projeções de alvos sobre o objeto; a abordagem de métodos iterativos utilizados como soluções para o método das linhas de grade; além da descrição do procedimento utilizado para a verificação do sistema

de medição 3D quando da concepção do método, seguindo da apresentação sucinta dos resultados alcançados por meio do sistema de medição utilizado para este trabalho.

Palavras chaves: Métodos Técnicos de Medição por Coordenadas; sinalização ativa; linhas de grade, verificação de sistemas de medição 3D; robô de medição em um sistema de coordenadas esféricas.

ABSTRACT

In this paper a measurement system composed of two theodolites electronic motor (robot measurement in a spherical coordinate system) interconnected through a transmission of data online with computer will be presented. The measurement system consists of a theodolite pointer and a theodolite identifier. This type of measurement system belongs to the fourth hierarchy of automation called System of measurement with automatic adjustment of independent programs. The sensors of direction, change of direction, distance and variation of distance are automatically placed through the axes of movement. The requirements of the quality of construction in the automotive industry and aviation accelerate the development of new systems and new three-dimensional methods, which enables automatic determination of points of an object and its analysis in the context of deformation. The three-dimensional reconstruction of objects or surfaces requires, depending on the object, a minimum amount of points, which is abstained and is determined by means of an interpolation, the precise form and characteristic of the object. The use of laser to activate the signaling of a point-object, combined with the measurement of direction, then enable the determination of objects or surfaces, including also the dangerous areas, and even where it would be impossible for placement of marks (targets) on the object. As the main points being presented, have: presentation of a measurement system based on Theodolites, constituents of a system for 3D automatic measuring with projections of targets on the object; the approach of iterative methods used as solutions to the method of grid lines; beyond the description of the procedure employed for the verification of the 3D measurement system when the method conception, following the brief presentation of the results achieved through the measurement system used for this work.

Key words: technical methods for measurement of coordinates; signaling active; grid lines; verification of 3D measurement systems; 3D robot measurement in a spherical coordinate system.

1. INTRODUÇÃO

O rápido desenvolvimento das técnicas de medição no contexto da Geodésia Aplicada à Engenharia e da Fotogrametria Digital, em combinação com as técnicas de processamento digital de imagens, possibilita a determinação e a reconstrução virtual tridimensional de objetos não sinalizados ou sinalizados com alvos artificiais ativos e passivos.

Métodos geodésicos convencionais de medição estão cada vez mais difíceis de serem empregados, pois as exigências industriais sobre os aspectos da automação, da qualidade e do controle de qualidade, conduzem ao aumento da rapidez e da precisão, além da diminuição de custos das medições.

A luneta de medição um dos principais componentes dos instrumentos ópticos foi sendo modificada de acordo com a aplicabilidade de medição, seja esta voltada a um ambiente de risco, a áreas inacessíveis ou para o controle e monitoramento de estruturas complexas, freqüentes, dentre outras, na área da Engenharia Civil e Mecânica. Para a automação dos processos de medição substituiu-se o olho humano por um olho artificial com o emprego de uma câmera CCD, além da materialização de pontos por meio da tecnologia a LASER, revolucionando todo processo de medição. A luneta, desta forma, passa a caracterizar métodos geodésicos de posicionamento tridimensional, inseridos em um contexto mais amplo denominado de Métodos Técnicos de Medição por Coordenadas apoiados, por exemplo, a sistemas ópticos de medição polar à base de teodolitos, como apresentado neste trabalho.

Para a determinação das coordenadas tridimensionais x,y,z de um ponto-objeto P são empregados respectivamente, dependendo do princípio de medição (medição por interseção a vante, medição polar, medição interferométrica, medição fotogramétrica, medição por coordenadas), teodolitos apontador e identificador, taqueômetro eletrônico e/ou taqueômetro identificador, além de medidores interferométricos e máquinas de medição por coordenadas.

De um modo geral, classificam-se estes sistemas de medição à base de teodolitos, como sistemas de medição híbrida, os quais possuem um funcionamento manual ou são adaptados com servo motores ou motores de passos para o seu funcionamento completamente automático.

A exigência do controle de superfícies e de objetos, principalmente na indústria de construção e mecânica, acelera o desenvolvimento de novos sistemas de medição tridimensionais e novos métodos de medição. Estes métodos permitem a identificação destes objetos e o contínuo controle e monitoramento de suas formas.

Sistemas de medição à base de teodolitos vêm sendo utilizados em várias aplicações industriais, como também no controle de qualidade de superfícies e de objetos. A descrição de um objeto realizada através de pontos de interseção, os quais se encontram sobre linhas de grade pré-definidas em um sistema de coordenadas, permite a análise de deformação, de modo que a partir da mudança do ponto de interseção, em diferentes épocas, será reproduzida a mudança de forma. Embora estes pontos não sejam visíveis, permanece no método das linhas de grade a vantagem, que se pode sempre percorrer pontos sobre as mesmas linhas de grade.

Como principais pontos a serem apresentados aqui, têm-se: apresentação de um Sistema de Medição à base de Teodolitos, constituintes de um sistema 3D de medição automático com projeções de alvos sobre o objeto; a abordagem de métodos iterativos utilizados como soluções para o método das linhas de grade;

além da descrição do procedimento utilizado para a verificação do sistema de medição quando da concepção do método, seguindo da apresentação sucinta dos resultados alcançados por meio do sistema de medição utilizado para este trabalho.

Neste trabalho será considerado o sistema de medição polar à base de um teodolito apontador e de um teodolito identificador (De SEIXAS, 2004). A composição desse sistema será descrito no item a seguir.

2. COMPOSIÇÃO DO SISTEMA ON-LINE DE MEDIÇÃO 3D À BASE DE TEODOLITOS

Aqui será apresentado um sistema de medição composto por dois teodolitos eletrônicos motorizados (robô de medição em um sistema de coordenadas esféricas) interligados por meio de uma transmissão de dados on-line com o computador. O sistema de medição é composto por um teodolito apontador e um teodolito identificador. Segundo Kahmen (2005) este tipo de sistema de medição pertence à quarta hierarquia de automação, denominado de Sistema de medição de comando automático com adaptação de programas independentes. A primeira, a segunda e a terceira hierarquia de automação são denominadas respectivamente, segundo o mesmo autor, de: Sistema de medição com operação manual; Sistema de medição de comando automático sem influência de programas independentes e Sistema de medição de comando automático com seleção de programas independentes. Na quarta hierarquia, caso desse trabalho, os sensores de direção, variação de direção, distância e variação de distância são posicionados automaticamente por meio dos eixos de movimentação do robô de medição. Existe disponível um programa básico ou vários programas básicos, os quais são modificados sozinhos através de informações sensoriais. O sensor registra a situação real do momento e a compara com um valor de entrada anteriormente determinado, de modo que um programa seja modificado ou que seja selecionado um outro. Um exemplo prático da utilização desse tipo de automação é a observação cinemática do deslizamento de uma encosta.

Para a descrição detalhada sobre o taqueômetro identificador TCA 1800 [INGENSAND E BOECKEM, 1997] e o teodolito identificador TM 3000V e VD são aconselhadas as seguintes literaturas: [Leica TPS – System 1000], [Wild TM 3000, 1989], e os trabalhos [FABIANKOWISCH, 1990], [KATOWISKI, 1992], [WIESER, 1995], [ROIC, 1996], [MISCHKE, 1998]. O desvio padrão dos ângulos horizontal e vertical corresponde a 0,15 mili grados ou 0,5 segundos.

Como sistema computacional teve-se para o desenvolvimento deste trabalho um computador ELTEC TE 84/68K com um CPU-Board Motorola 68030. Para o acesso à detecção das imagens de um processamento digital de imagem pela câmera CCD imbutida no vídeo-teodolito (teodolito identificador) foi instalado no computador um Framegrabber (preto e branco) IPP-100. Esta unidade converte os sinais de vídeo analógicos em informações digitais e reproduz essas informações pixelmente no armazenador de imagem. Os componentes periféricos do computador

são compostos de um terminal, de um Vídeo-monitor, de uma impressora e de um teclado.

A triangulação espacial com feixes radiais representa um método, com o qual as coordenadas de pontos-objeto são determinadas simplesmente através de observações de direção.

Na técnica de medição geodésica existem dois métodos que trabalham de acordo com o princípio da triangulação realizado por Sistemas de medição à base de teodolitos, onde as direções aos pontos-objeto são medidas diretamente, e sistemas de medição fotogramétrica, com os quais as direções às coordenadas são reproduzidas a partir de imagens (SCHLEMMER E WELSCH, 1989; WESTER-EBBINGHAUS, 1992¹ apud DREXLER 1993; KAHMEN, NIESSNER, DE SEIXAS, 2001). Todos esses sistemas são caracterizados pelo levantamento sem o contato físico com o objeto. Encontram-se diversos trabalhos com esses instrumentos, por exemplo, em monitoramento de pontes, controle de qualidade na indústria automobilística e estaleiros, na locação de estradas, na construção de máquinas, na medição de superfícies de fachadas, dentre outros. O sistema foi desenvolvido para funcionar automaticamente, pois existe uma diversidade de trabalhos dessa natureza, além disso, é marcante a economia do tempo entre a medição e o processamento dos dados.

3. DETECÇÃO DE DESLOCAMENTO DE CORPOS RÍGIDOS E MUDANÇAS DE FORMAS POR MEIO DO MÉTODO DAS LINHAS DE GRADE

Quando não existem cantos ou interseções de linhas ou outras texturas na superfície do objeto poderão ser usadas linhas de grade virtuais para determinar as medições de deformação (KAHMEN, NIESSNER, DE SEIXAS, 2001). Neste caso, para a análise de deformação, não é possível comparar as coordenadas de pontos idênticos depois de diferentes épocas de medição, mas pode-se achar como o corpo rígido ou as alterações da sua forma, modificam-se com respeito às linhas de grade. As medições são, então, empregadas, para determinar, onde as linhas de grade interceptam a superfície do objeto na época de medição selecionada.

Linhas de grade virtuais [DE SEIXAS, 2004] podem ser criadas, se um Vídeo-teodolito, por exemplo, TM 3000 V ou VD é interligado a um taqueômetro apontador a LASER, por exemplo, TCA 1800 + DL3 (Diodo LASER DL3, 1996). Esse taqueômetro apontador é programado como um robô com método de digitalização do objeto ponto a ponto. Os pontos de interseção das linhas de grade com a superfície do objeto são armazenados em uma série de coordenadas de interseção de pontos. Estas coordenadas são definidas durante uma “medição zero”

¹ WESTER-EBBINGHAUS, W. *Photogrammetrische Industriemesssysteme*. In: Geodaetische Messverfahren im Maschinenbau. Schriftenreihe des DVW, Band 1, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, 1992.

ou uma outra época de medição prévia ou adotadas de um CAD (Computer Aided Design).

O Vídeo-teodolito é automaticamente posicionando no mesmo tempo que o taqueômetro apontador (ou teodolito apontador). Tão breve o ponto alvo apareça no campo imagem, o Vídeo-teodolito identifica este ponto com o arranjo CCD da câmera e determina a direção horizontal e vertical. Pois é possível o cálculo do ponto de interseção P_1 sobre as duas direções espaciais, a qual representa a linha de visada. A Figura 1 mostra a superfície de um objeto e o ponto P_1 , onde o LASER incide na superfície. Enquanto o objeto é varrido o ponto a LASER tem que ser movido até ser idêntico com o ponto P_s , onde a linha de grade intercepta a superfície. Diferentes métodos iterativos foram desenvolvidos em De Seixas (2001) para alcançar o ponto interseção durante a varredura. Todos os métodos têm em comum que a distância

$$d = \sqrt{(\Delta x_{is})^2 + (\Delta z_{is})^2} \quad (1)$$

entre o feixe de luz a LASER e a linha de grade y_k seja zero. As diferenças de coordenadas são definidas como

$$\Delta x_{is} = x_i - x_s = \rho \cos Hz \operatorname{sen} V - x_k \quad (2)$$

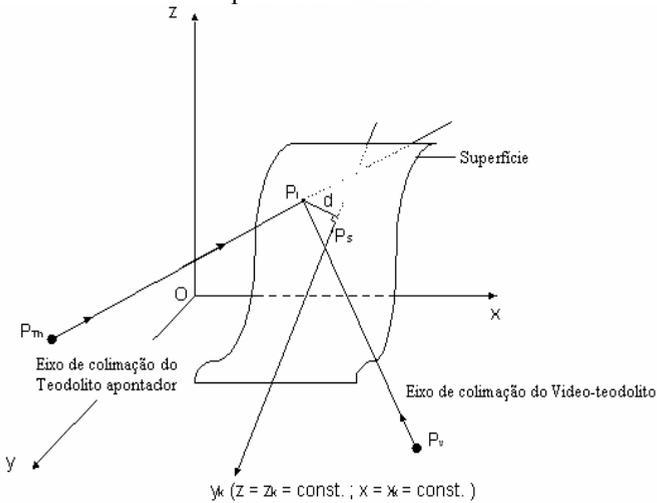
$$\Delta z_{is} = z_i - z_s = \rho \cos V - x_k \quad (3)$$

A direção horizontal e a direção vertical são medidas com o taqueômetro a LASER. P é a distância entre a posição P_{Th} do teodolito a LASER e o ponto projetado P_1 . Como as coordenadas de P_{Th} e P_1 são conhecidas do procedimento de interseção, ρ é conhecido. Consequentemente d pode ser escrito como

$$d = f(Hz, V) \quad (4)$$

Foram apresentados quatro métodos (DE SEIXAS, 2001) buscando a solução do método das linhas de grade: o método das secantes, o método da bisseção, o método do gradiente e o método de Newton. A seguir dois algoritmos para a detecção de pontos, onde as linhas de grade interceptam a superfície, serão descritos.

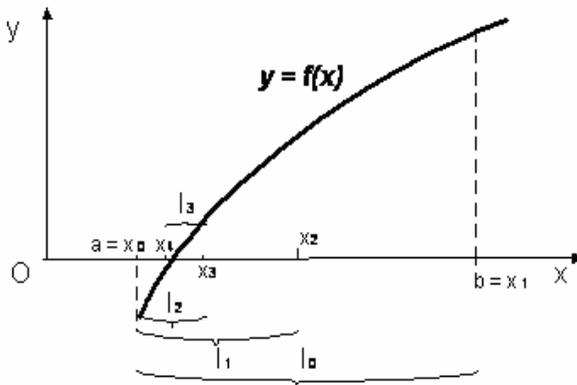
Figura 1 – Detecção de linhas de grade com o vídeo-teodolito e o teodolito apontador a LASER.



3.1. Método da Linha de Grade Baseado na Iteração Binária (Método da Bisseção)

Este método está baseado no clássico método da iteração binária do qual a solução $f(x) = 0$ de uma função contínua $f(x)$ pode ser encontrada por iteração (Figura 2). O método clássico inicia-se com valores aproximados $x = a$ e $x = b$.

Figura 2 – Método binário (Iteração binária).



Então, se

$$f(a)f(b) > 0, \quad (5)$$

não há solução neste intervalo, mas se

$$f(a)f(b) < 0 \quad (6)$$

há uma solução. Depois que um intervalo com uma solução é encontrado, calcula-se o ponto médio

$$\mu = (a + b) / 2. \quad (7)$$

Neste momento existem três alternativas: se

$$f(a)f(\mu) > 0 \quad (8)$$

nenhum intervalo foi encontrado, se

$$f(a)f(\mu) < 0 \quad (9)$$

um novo intervalo é dado, e se

$$f(\mu) = 0 \quad (10)$$

a solução é encontrada. No caso de (9) o ponto médio do intervalo $[a, \mu]$ deve ser determinado e de novo as três alternativas devem ser discutidas. Este procedimento continuará até que um valor (10) da função seja encontrado.

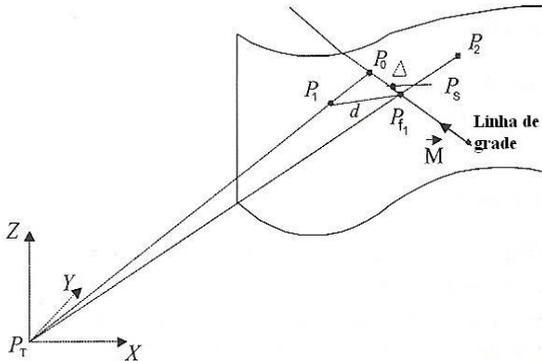
Para o método das linhas de grade foi desenvolvido um algoritmo 3D. Comparado com o método clássico, precisou-se de valores aproximados para definir um intervalo de partida $[a, b]$ nas imediações do Ponto P_S (Figura 3).

P_S é o ponto, onde a linha de grade g , na Figura 1 y_k , intercepta a superfície. Pode-se assim, $a = P_0$ e $b = P_{f_1}$ para serem os valores aproximados.

P_0 é o ponto, onde a linha de grade intercepta a superfície durante uma época de

medição prévia (por exemplo uma “medição zero”). P_{f_1} é o pé da perpendicular através de P_1 e normal a g . P_1 é o ponto onde o LASER intercepta a superfície enquanto apontado sobre P_0 durante a nova época de medição. P_1 é determinado através da interseção e P_{f_1} é calculado através de simples equações vetoriais.

Figura 3 – Método binário (Iteração binária).



Similar ao método clássico sabe-se que devem ser checadas duas alternativas:

(a) Se

$$\Delta l_{(P_1P_0)} \cdot \Delta l_{(P_2P_{f_1})} > 0 \quad (11)$$

com $\Delta l_{(P_1P_0)} = \overline{P_T P_1} - \overline{P_T P_0}$; $\Delta l_{(P_2P_{f_1})} = \overline{P_T P_2} - \overline{P_T P_{f_1}}$, significa que P_S não está contido no intervalo e

(b) Se

$$\Delta l_{(P_1P_0)} \cdot \Delta l_{(P_2P_{f_1})} < 0 \quad (12)$$

significa que P_S está contido em $[a,b]$.

P_2 é obtido através do posicionamento do teodolito apontador sobre P_{f_1} .

P_2 é então o ponto onde o LASER intercepta a superfície. Suas coordenadas são determinadas também por interseção.

Se o caso (b) é dado, agora a interseção binária pode ser iniciada como descrito na Figura 2. Aqui devem ser usados equações vetoriais 3D. No caso que P_S não está contido no intervalo $[a,b]$, o intervalo deve ser estendido.

Uma medida adequada para a extensão é, por exemplo, o comprimento $\Delta = \overline{P_0 P_{f_1}}$ ou $d = \overline{P_1 P_{f_1}}$. A direção da extensão poderá ser encontrada através da comparação dos comprimentos $\Delta l_{(P_1 P_{f_1})}$, $\Delta l_{(P_2 P_{f_1})}$ e $\Delta l_{(P_1 P_0)}$.

3.2. Método de Otimização (Método do Gradiente)

Como uma segunda alternativa será descrito o método do gradiente. Se $P_i(x_i, y_i, z_i)$ é um ponto na vizinhança da região do mínimo procurado, então, o novo ponto $P_S(x_S, y_S, z_S)$ é procurado na direção do gradiente de (4) por meio de:

$$\begin{bmatrix} Hz_{k+1} \\ V_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Hz_k \\ V_k \end{bmatrix} + h_k \frac{g_k}{|g_k|} = \begin{bmatrix} Hz_k \\ V_k \end{bmatrix} + h_k u_k \quad (13)$$

Com $g_k = \text{gradf}(Hz, V)$.

O procedimento de minimização compreende (07) sete passos:

- Determinação do ponto P_i através da interseção a vante
- Avaliação do gradiente $g_k = \text{gradf}(Hz, V)$ no ponto P_i
- Determinação da direção de procura $u_k = \frac{-g_k}{|g_k|}$
- Aperfeiçoamento da procura linear na direção de procura através da escolha de h_k
- Geração de um novo ponto $x_{k+1} = x_k + h_k u_k$
- O processo deve ser repetido iterativamente atribuindo $k = k + 1$ e voltando ao segundo passo
- O processo iterativo é parado se o passo $h_k u_k$, tomado na iteração k , é menor que o erro de posicionamento causado pela resolução do sistema de medição angular do teodolito.

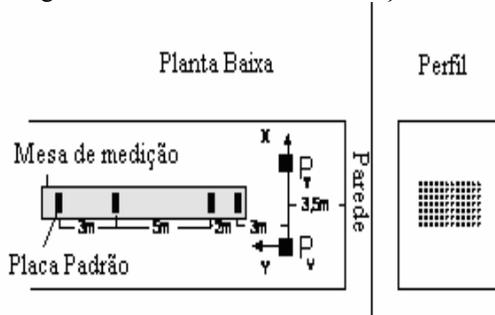
Com os dois métodos as coordenadas podem ser determinadas com uma exatidão melhor que 0,1mm. Os testes de precisão do sistema de medição 3D e de realização das linhas de grade são apresentados no item a seguir.

4. TESTES DE PRECISÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO 3D E REALIZAÇÃO PRÁTICA DOS MÉTODOS DAS LINHAS DE GRADE

Neste item segue a metodologia de investigação prática empregada. O objetivo foi de confrontar os métodos e obter o melhor dentre eles de acordo com uma determinada área de aplicação segundo os seguintes critérios: precisão,

comportamento de convergência, assim como rapidez. Para testar estes métodos e podê-los aplicá-los na prática foi desenvolvido um programa computacional, onde as linhas de grade pudessem ser realizadas. Os métodos foram investigados até uma distância de 20m, pois o LASER até então empregado não seria apropriado para um alcance de distância maior que esta. A Figura 4 mostra a configuração dos Testes experimentais realizados no Laboratório de Engenharia Geodésica da TU-Wien.

Figura 4 – Ordenamento das medições.



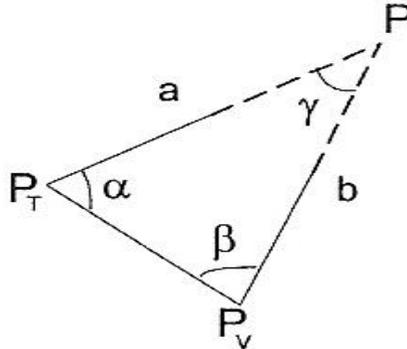
Os robôs de medição foram instalados no Laboratório sobre dois pilares de medição (P_T e P_V). O Sistema de medição foi concebido no modo “Master-Slave” (mestre-escravo). Para a orientação dos Instrumentos não foi utilizado, por causa dos tipos de aparelhos de medição empregados, o clássico método da colimação recíproca (BILL et al, 1985), o qual é empregado com frequência em Sistemas de Medição Industriais. No contexto deste trabalho foi empregado para a orientação e posicionamento dos teodolitos, em vez desse, o método desenvolvido por Staiger (1988).

Uma característica marcante do algoritmo de orientação para este sistema de medição é a possibilidade de poder integrar e combinar diferentes tipos de pontos alvos, ou seja, marcas de alvo ativa e passiva, assim como a possibilidade de inclusão de pontos não sinalizados. A base de medição $P_T P_V$ tem um comprimento de cerca de 2,52m (Figura 4), enquanto que a distância entre a base e as superfícies dos objetos investigados foi de até 20m. A precisão da interseção a vante é dependente da precisão da medição de direção e da configuração do triângulo $P_T P P_V$ (Figura 5). P é o respectivo ponto alvo. Como critério para a determinação ótima do ponto vale o desvio padrão de um

$$\sigma_p = \sqrt{(\sigma_x)^2 + (\sigma_y)^2} = \frac{1}{\text{sen}\gamma} \sqrt{a^2 + b^2} \sigma(r^\circ) = GF \cdot \sigma(r^\circ)$$

(KAHMEN, 2005).

Figura 5 – Geometria da interseção a vante.



GF é o fator geométrico. Para $\alpha = \beta$ e σ_p converge para um mínimo, se o ângulo de interseção γ dos feixes de determinação for 121 graus. O desvio padrão de um ponto σ_p cresce com a distância a partir das origens das coordenadas, quando o comprimento da base entre os instrumentos permanece o mesmo.

4.1 Teste da Precisão do Sistema de Medição

Esse item tem a finalidade de descrever um resumo sobre os erros ocorridos durante as medições. Na investigação da precisão de um sistema de medição, distinguem-se entre a precisão interna e externa. Nesse trabalho interessou-se inicialmente a respeito da precisão interna, a qual foi investigada em laboratório. Influências sobre a precisão externa, como refração, rugosidade da superfície, estabilidade dos pontos de estação, respectivamente, não foram considerados.

Na precisão interna serão consideradas apenas as perturbações na instalação de medição. Entende-se por instalação de medição aqui a generalidade dos componentes utilizados para uma medição como: sensores, computadores, programas computacionais, dentre outros (KAHMEN, 2005). As perturbações compreendem aqui os erros de medição dos teodolitos robotizados, assim como a precisão do posicionamento e orientação dos teodolitos.

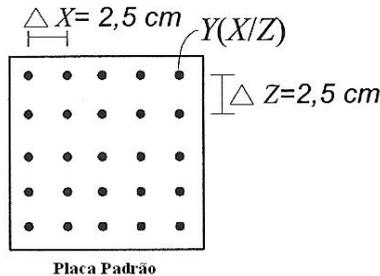
Para a investigação da precisão interna foi utilizado primeiramente um objeto de referência industrializado considerado como perfeito. No contexto deste trabalho foi para isso investigada uma superfície metálica plana, esta placa padrão foi testada de acordo com a Norma DIN 876 e comprovada com uma precisão superficial de 0,1mm. A escolha desta superfície teve os seguintes motivos:

- (a) sua reconstrução por meio de linhas de grade ocorre de uma maneira simples,
- (b) o cálculo de um plano ajustado para a análise de precisão é também por meio dessa forma simplificado.

A investigação da precisão interna do método de medição realizou-se de modo que a placa padrão, cuja área é de $40 \times 40 \text{ cm}^2$, é colocada em três posições distintas sobre uma mesa de medição (Figura 4), ou seja, a uma distância de 3, 5 e 10m da linha de base formada pelo sistema de medição.

Em todos os casos interceptou-se o plano com linhas de grade em um mesmo ordenamento quase perpendicular. Isto significa que o emprego do método das linhas de grade praticamente não é realizado. Por causa disso nesse experimento apenas o método de medição é testado. As linhas de grade $Y(X/Z)$ foram escolhidas, de modo que 225 pontos de interseção foram definidos. Elas possuem na direção X e Z respectivamente uma distância de 2,5cm (Figura 6).

Figura 6 – Geometria da interseção a vante.



A realização e o processamento das medições são descritas em duas partes: primeiramente para uma distância da placa padrão de 3m e depois para uma distância de 5 e 10m.

4.1.1. Concepção da Medição

Depois da orientação dos dois teodolitos robotizados, o sistema de medição está pronto para efetuar as medições. Uma análise prévia da precisão da interseção a vante mostra-se essencial e importante, pois de fato esta precisão é que influencia todo o sistema de medição. Através da escolha de outros parâmetros, como, por exemplo, o critério de parada em cada algoritmo da linha de grade, a precisão de medição não é influenciada.

(a) Investigação da precisão da interseção a vante

A precisão de um ponto-objeto obtido por meio da interseção a vante será controlada pela metade da distância mínima entre as linhas de visadas espaciais (STAIGER, 1988).

Antes da realização da medição com a placa padrão foram determinados alguns pontos-objeto sobre sua superfície. A análise da metade da distância mínima g_{VWS} na medição prática foi de: $0,01 < g_{VWS} < 0,1 \text{ [mm]}$.

(b) Escolha do critério de parada

O critério de parada serve para que o algoritmo de medição possa ser finalizado de acordo com um número contável de iteração. No contexto deste trabalho o método das linhas de grade é interrompido, quando a distância d entre o ponto a LASER projetado e a linha de grade é menor do que um intervalo de erro exigido. Este deve apenas ser dependente da precisão da interseção a vante. Escolhe-se o intervalo de parada $> g_{VWS}$.

Dois critérios de parada distintos para a análise da precisão do sistema de medição serão escolhidos aqui:

(a) menor que um décimo de milímetro (0,08mm), pois a precisão da interseção a vante do mesmo modo é menor que 0,1mm, ou seja, o intervalo de parada é perto da precisão do g_{VWS} ,

(b) maior que um décimo de milímetro (0,5mm), para testar, como um intervalo grande de parada escolhido pode interferir no resultado da medição.

Foi realizada uma “medição zero” e medições de repetição com os mesmos critérios de parada anteriormente escolhidos.

4.1.2. Processamento das Medições

Foram calculados: o desvio padrão empírico de cada ponto, o valor médio destes desvios padrões, o valor médio de g_{VWS} , o desvio padrão empírico das distâncias tomadas por pares, o valor médio das distâncias perpendiculares d e as medidas de precisão do plano ajustado.

(a) Desvio padrão empírico de pontos sem a consideração de um critério de parada

Foram retiradas três séries para o cálculo. Para cada 225 pontos de medição, obtêm-se com isto três vezes as coordenadas tridimensionais (x,y,z). Disto são calculados inicialmente os desvios padrões de cada ponto. Estes podem ser descritos da seguinte maneira:

$$0,01 < \sigma_{x,y,z} < 0,1[mm].$$

O valor médio dos desvios padrões de cada componente coordenado (Tabela 1) resultaram-se em

Tabela 1 – Valores médios de desvios padrões de cada ponto.

M_{σ_x} [mm]	M_{σ_y} [mm]	M_{σ_z} [mm]
0,05	0,05	0,05

Comprovou-se com isto, que as coordenadas dos pontos com uma precisão de 0,05mm em todas as direções coordenadas podem ser determinadas com o sistema de medição.

(b) Cálculo do valor médio do g_{VWS} para diferentes critérios de parada

Este experimento ajudou a esclarecer, qual a influência da escolha de um critério de parada sobre a precisão do sistema de medição (com o método da interseção a vante espacial). Na Tabela 2 estão representados os valores médios dos g_{VWS} para quatro séries de medição, cada uma de 225 calculadas a partir dos 225 valores individuais. Obtêm-se diferentes valores g_{VWS} em dependência do critério de parada. Escolhe-se este um pouco maior quanto o limite superior nos itens 4.1.1(a) e 4.1.2(a) deduzida precisão de medição da interseção a vante, de modo que se obtenham precisões que sejam metades do tamanho do intervalo de parada. Aparentemente continua-se a medição até que em todas as três direções coordenadas um determinado valor seja alcançado. Nos critérios de parada maiores as precisões foram piores (cf. Tabela 2).

Tabela 2 – Valores médios de toda precisão da interseção a vante dos pontos de interseção medidos através de cada método.

Método das linhas de grade	Valor médio $M_{g_{VWS}}$ [mm] (Critério de parada de 0,08mm)	Valor médio $M_{g_{VWS}}$ [mm] (Critério de parada de 0,5mm)
Série de medição I	0,04	0,08
Série de medição II	0,03	0,08
Série de medição III	0,04	0,09
Série de medição IV	0,04	0,07

Aparentemente acontece aqui, do mesmo modo do que acontece quanto ao número de iterações, além disso, a focalização normalmente não modificada automaticamente tem um significado. Pois para o intervalo de parada grande foram necessárias apenas poucas iterações. Em comparação com o intervalo de parada pequeno aconteceram de certa forma muitas iterações, por exemplo, 16. Quando a focalização era efetuada manualmente, enquanto a medição estava sendo realizada, foram necessárias poucas iterações. Entende-se aqui por Série de medição I, II, III e IV a realização dos respectivos métodos: o método das secantes, o método do gradiente (cf. item 3.2), o método de Newton e o método da bisseção (cf. item 3.1).

(c) Cálculo do desvio padrão ($\sigma_{\Delta x}$, $\sigma_{\Delta z}$) de distâncias tomadas por pares entre pontos de interseção localizados vizinhos dois a dois

Este experimento deve continuar ajudar a esclarecer, como a escolha do critério de parada influencia na procura das linhas de grade. Primeiramente é calculada cada diferença de coordenadas Δx e Δz entre dois pontos de interseção (Figura 9) e estas então com as diferenças de coordenadas exigidas. Destas diferenças deixam-se então reproduzir os desvios padrões $\sigma_{\Delta x}$ e $\sigma_{\Delta z}$ de cada par de distância (Tabela

3). Os testes comprovaram que os desvios padrões $\sigma_{\Delta x}$ e $\sigma_{\Delta z}$ são menores que o respectivo e exigido critério de parada e maiores ou iguais a exigida precisão (cf. item 4.1.1(a) e 4.1.2(a)) da interseção a vante. Percebe-se, além disso, como o desvio padrão das distâncias tomadas por pares é dependente do critério de parada. Como já mostrado na Tabela 2, na Tabela 3 seguinte, mostra-se também que com o critério de parada de 0,5mm podem ser determinados pontos com a precisão média da interseção a vante.

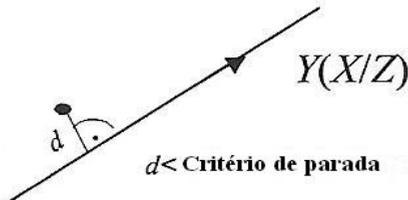
Tabela 3 – Desvios padrões $\sigma_{\Delta x}$ e $\sigma_{\Delta z}$ das distâncias tomadas duas a duas (por pares) entre dois pontos de interseção posicionados lado a lado

Parâmetros	Intervalo de parada = 0,08mm		Intervalo de parada = 0,5mm	
	$\sigma_{\Delta x}$ [mm]	$\sigma_{\Delta z}$ [mm]	$\sigma_{\Delta x}$ [mm]	$\sigma_{\Delta z}$ [mm]
Métodos das linhas de grade				
Série de medição I	0,05	0,08	0,10	0,11
Série de medição II	0,05	0,05	0,10	0,08
Série de medição III	0,06	0,07	0,11	0,09
Série de medição IV	0,06	0,07	0,13	0,08

(d) Cálculo do valor médio M_d das distâncias perpendiculares d entre os pontos de interseção realizados e as linhas de grade

As distâncias d (Figura 7) foram determinadas e reproduzidas para todos os 225 pontos-objeto. Tabela 4 mostra os resultados para todos os quatro métodos.

Figura 7 – Menor distância de um ponto a linha de grade.



Com o critério de parada de 0,08mm os valores médios estão para os valores esperados para d algo menor que o critério. Com o intervalo de parada grande os

valores médios estão mesmo assim muito pequenos. Os valores na coluna 3 dão uma visão na precisão, com a qual o teodolito pode ser comandado.]

Tabela 4 – Valores médios das distâncias perpendiculares entre os pontos de interseção realizados e as linhas de grade.

Métodos das linhas de grade	Valor médio M_d [mm] (critério de parada = 0,08mm)	Valor médio M_d [mm] (critério de parada = 0,5mm)
Série de medição I	0,06	0,20
Série de medição II	0,05	0,10
Série de medição III	0,06	0,20
Série de medição IV	0,06	0,20

(e) Cálculo da precisão de repetição para um ponto-objeto

Foi realizada uma “medição zero” e uma medição de repetição e determinadas as coordenadas de cada ponto-objeto dos 225 pontos virtuais da placa. Das diferenças de coordenadas foram então reproduzidos os desvios padrões para as medições duplas (realizadas duas vezes). Tabela 5 mostra os resultados.

Tabela 5 – Precisão de repetição a partir das medições duplas (realizadas duas vezes).

Métodos das linhas de grade	σ (critério de parada = 0,08mm)			σ (critério de parada = 0,5mm)		
	x[mm]	y[mm]	z[mm]	x[mm]	y[mm]	z[mm]
Série de medição I	0,03	0,03	0,05	0,03	0,06	0,06
Série de medição II	0,05	0,04	0,04	0,04	0,07	0,08
Série de medição III	0,04	0,03	0,04	0,03	0,05	0,07
Série de medição V	0,04	0,07	0,04	0,05	0,05	0,06

Mostrou-se que a influência do intervalo de parada grande (0,5mm) aparece agora menor. Isto corresponde ao esperado, pois a influência na “medição zero” e na medição de repetição tem um efeito semelhante. Além disso, aqui também é comprovado que a piora dos resultados nas Tabelas 2 e 3 provavelmente são ocorridos pela influência do intervalo grande de parada.

(f) Cálculo de um plano ajustado

Um plano está claramente determinado por três pontos, os quais não estão em uma reta. Quando o número mínimo de pontos de medição é ultrapassado, então, deixa-se calcular um plano ajustado, o qual é caracterizado, de modo que a soma ao quadrado das distâncias de todos os pontos medidos do plano tende a um mínimo (KRAUS, 1996). Neste trabalho o ajustamento do plano foi realizado com o Programa Orient – Programa de compensação híbrido do Instituto de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto da Universidade Técnica de Viena (IPF, TU-Wien). O desvio padrão σ_{plano} fornece com qual precisão um ponto está em um plano. Para quatro séries de medição obtiveram-se com a placa padrão em uma distância de 3 metros e $0,01 < g_{vWS} < 0,1[mm]$ os valores mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Desvio padrão σ_{plano} .

	Intervalo de parada = 0,08mm	Intervalo de parada = 0,5mm
	σ_{plano}	σ_{plano}
Em 3m	0,05mm	0,05mm

Obteve-se aqui, que o valor do critério de parada não tem nenhuma influência sobre o cálculo do desvio padrão σ_{plano} . Uma comparação com a Tabela 1 mostra, que os valores reproduzidos lá se confirmam de novo aqui. Os experimentos mostram, além disso, que a precisão da placa padrão corresponde ao dado pela firma. Outros experimentos foram realizados ainda para as distâncias de 5 e 10m do objeto. Tabela 7 mostra os resultados.

Tabela 7 – Desvio padrão σ_{plano} .

	σ_{plano}
Em 5m (critério de parada = 0,5mm)	0,10mm
Em 10m (critério de parada = 0,5mm)	0,40mm

Reconhece-se agora, que a geometria da configuração do triângulo de determinação influencia muito a precisão do desvio padrão σ_{plano} .

4.1.3. Verificação da Planitude de Superfícies de Objeto

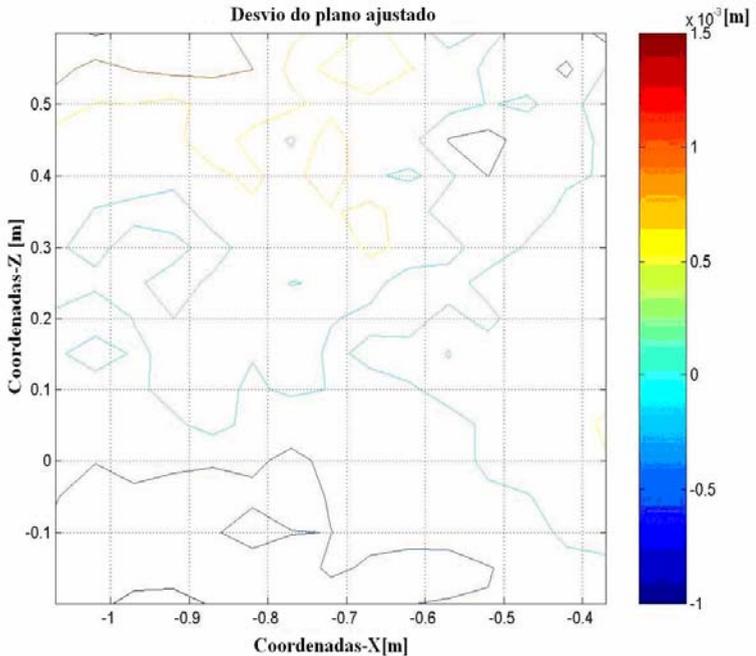
Estes experimentos têm o objetivo de demonstrar como o sistema pode ser empregado para aplicações na prática. Foi investigado a planitude (terminologia empregada na Engenharia Mecânica para definir uma superfície plana) de uma porta de elevador. A Figura 8 apresenta o ordenamento do sistema de medição e a porta metálica observada do elevador.

Figura 8 – Ordenamento de medição.



Como comprovação para a planitude deve ser usada novamente σ_{plano} (cf. item 4.1.2(f)). As linhas de grade Y(X/Z) foram escolhidas de modo que 255 pontos de interseção fossem definidos. Elas possuíam na direção X e Z respectivamente uma distância de 0,05m. O sistema de medição estava a uma distância de 3,7m da superfície. A partir de uma série de medição obteve-se depois de um ajustamento do plano o desvio padrão σ_{plano} com 0,49mm. A Figura 9 mostra as isolinhas das distâncias perpendiculares dos pontos ao plano ajustado.

Figura 9 – Isolinhas das distâncias perpendiculares dos pontos ao plano ajustado.



Pode-se aqui reconhecer uma não planitude média da porta do elevador. Deixa-se com isto dizer que a porta do elevador possui uma não planitude média de 0,49mm. Com a ajuda da escala de cores (Figura 9) são representados e visualizados os desvios positivos e negativos. Esse teste comprovou novamente a alta precisão do método de medição.

5. CONCLUSÕES

Técnicas ópticas de medição tridimensional (DE SEIXAS et al, 2007) estão sendo desenvolvidas e adaptadas de acordo com a aplicabilidade de medição, seja esta voltada a um ambiente de risco, a áreas inacessíveis ou para o controle e monitoramento de estruturas complexas, frequentes, dentre outras, na área da Engenharia Civil e Mecânica. A automação de processos de medição é decorrente das exigências industriais e da necessidade da detecção on-line de riscos (DE SEIXAS E BURITY, 2005) em áreas ambientais e estruturas da Construção Civil.

A reconstrução tridimensional de objetos ou de superfícies vem sendo realizada com o emprego de sistemas de medição 3D. Quando na superfície do objeto não é possível materializar os alvos passivos, utiliza-se da tecnologia do LASER para se projetar alvos ativos. Atualmente a utilização de sistema de medição 3D como apresentado nesse trabalho vem sendo discutida em larga escala.

Os testes realizados com o sistema de medição 3D apresentado nesse trabalho mostraram que: (a) o método de medição (interseção a vante espacial com um teodolito apontador e um teodolito identificador (cf. item 3) comprova uma precisão g_{VWS} melhor que 0,1mm; (b) os pontos de interseção das linhas de grade com a superfície plana da placa padrão podem ser determinados com uma precisão 3D de $\sigma_p \leq 0,1mm$; (c) estes resultados são independentes do algoritmo de medição; e (d) o intervalo de parada é para ser escolhido alguma coisa maior que a precisão de medição (com as condições dadas nesse experimento melhor que 0,1mm).

Além do sistema de medição polar à base de teodolitos e do sistema de medição polar, vale ressaltar o sistema de medição a LASER. Os três sistemas de medição industrial são empregados dentro da concepção de técnicas de medição ópticas tridimensionais. A determinação de pontos-objeto ocorre dentro de três grandes categorias: da reconstrução do objeto; do controle de qualidade (análise de formas); e do monitoramento de formas e superfícies (análise de deformação).

Um sistema de medição polar à base de um ou mais teodolitos e um sistema de varredura a LASER são empregados tanto em trabalhos que envolvem medição de deformação, quanto em trabalhos que envolvem medição de superfícies. A análise pontual e a análise superficial do objeto como um todo caracteriza a distinção entre o emprego destas técnicas de medição. Pode-se até mesmo citar que as técnicas de varredura tridimensionais estão caracterizando o cenário do setor de medição e do setor de construção nestes últimos oito anos. O sistema de varredura a LASER foi concebido no início da década de '90, por exemplo, o SMART 310 (SHERTENLEIB, 1995), sendo empregado para a determinação de pontos-objeto em grandes quantidades. A tecnologia de varredura a LASER propõe um novo método de medição para a determinação da geometria de superfícies de objeto. Possui uma maior economia de tempo e um grande espectro de aplicação (RUNNE, NIEMEIER, KERN, 2001). No Brasil esta tecnologia de medição vem sendo empregada pela PETROBRÁS e EMBRAER.

AGRADECIMENTOS

A pesquisa foi apoiada pela “Fonds zur Foerderung der Wissenschaftlichen Forderung” (FWF) austríaca, projeto número: 14664 – INF. A autora deseja expressar seus agradecimentos ao o.Univ. Prof. Dr. Heribert Kahmen, a o.Univ. Prof. Dr.techn. Inge Troch e aos Professores do Departamento de Engenharia Geodésica da TU-Wien.

BIBLIOGRAFIA

- BILL, R. *Automatische Mess- und Berechnungssysteme fuer den Industriebereich*. ANV6, 1985.
- DREXLER, E. *Analyse der Form und Lage von Objekten im Raum*. Muenchen, Reihe C, Heft Nr. 409, Dissertation, 1993.
- Diodo LASER DL3. *Firmenschrift Leica, Gebrauchsanweisung*, 1996.
- FABIANKOWISCH, J. *Automatische Richtungsmessung mit digitalen Differenzbildern*. Dissertation, TU-Wien, 1990.
- INGENSAND, H. E BOECKEM, B. *Automatic location and pointing techniques in local positioning systems*. Optical 3-D measurement Techniques IV. Gruen;Kahmen (Eds.). Zurich, 1997.
- KAHMEN, H. *Vermessungskunde, Angewandete Geodaesie*, de Gruyter, 20.Auf., 2005.
- KAHMEN, H., NIESSNER, A., De SEIXAS, A., *3D Object Sensing Using Rotating CCD Cameras*, chapter 17. In: *Digital Image Analysis: Selected Techniques and Applications*. Springer Verlag New York, 2001, editors H. Bischof, W. Kropatsch.
- KRAUS, K. *Photogrammetrie*. Band 2. Verfeinerte Methode und Anwendungen, mit Beiträgen von J. Jansa und H. Kager. Duemmeler/Bonn, 1996.
- KATOWISKI, O. *RMS2000 – ein System zum beruehrungslosen Messen grosser Objekte*. S. 221 – 229, AVN, 1992 (1985).
- LEICA TPS- SYSTEM 1000. *Firmenschrift Leica: TPS-System 1000, Gebrauchsanweisung*. 1995.
- MISCHKE, A. *Entwicklung eines Videotheodolit-Messsystems zur automatischen Richtungsmessung von nicht signalisierten Objektpunkten*. Dissertationsarbeit – TU-Wien, 1998.
- ROIC, M. *Erfassung von nicht signalisierten 3D-Strukturen mit Video Theodoliten*. Dissertation _ TU-Wien, 1996.
- RUNNE, H., NIEMEIER, W., KERN, F., *Application of Laser Scanners to Determine the Geometry of Buildings*. Paper presented at the conference organized at Vienna, October 1-4, 2001, p. 41 to 48, In: *Optical 3-D Measurement Techniques V*, editors A. Gruen, H. Kahmen.
- SHERTENLEIB, W. *Measurement of Structures (Surfaces) Utilizing the SMART 310 Laser-Tracking-System*. Paper presented at the conference organized at Vienna, October 2-4, 1995, p.59 to 68, In: *Optical 3-D Measurement Techniques III*, editors A. Gruen, H. Kahmen.
- SCHLEMMER, H. E WELSCH, W. *Beruehrungslose geodaetische Nesssysteme fuer die Industrievermessung – ein Ueberblick*. S. 397 – 411, AVN, 1996 (1989).
- STAIGER, R. *Theoretische Untersuchungen zum Einsatz von Industrierobotern*. DGK bei der Bayrisch. Akad. Der Wissenschaften, Reihe C, Heft Nr. 340, Muenchen, 1988.

- DE SEIXAS, A. Objektrekonstruktion mittels Gitterlinien-Verfahren. Áustria, 2001. 128f. Tese (Doutorado em Geodésia Aplicada à Engenharia). Instituto de Geofísica e Geodésia Aplicada. Departamento de Geodésia Aplicada à Engenharia. Universidade Técnica de Viena.
- DE SEIXAS, A. *Sistema de medição polar à base de teodolitos e definição do método de linhas de grade*. Revista Brasileira de Cartografia, V. 56/2, 2004.
- DE SEIXAS, A., BURITY, E.F., 2005. *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., PACHECO, A.P., VEIGA, L.V., PERROZO, D., FAGGION, L.P. *Uma abordagem geodésica de técnicas ópticas de medição tridimensional para determinação e transporte de alturas em áreas de risco*. Bol. Ciênc. Geod., séc. Artigos, Curitiba, v. 13, nº. 1, p. 165 – 185 jan – jun, 2007.
- WILD TM 3000. *Wild TM 3000, Gebrauchsanweisung*. 1989.
- WIESER, A. *Ingenieurgeodaetischen Ueberwachungsmessungen mit Videotheodoliten*. Diplomarbeit – TU-Wien, 1995.

(Recebido em novembro / 08. Aceito em fevereiro / 09).